

UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



“Evaluación de la influencia del contenido de caucho reciclado en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente frente a ciclos hielo-deshielo”

Por

Francisco Leonardo Garay Albillar

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en
Ciencias de la Ingeniería y título de Ingeniero Civil

Prof. Guía Guillermo Brante Lara

Julio, 2015

“La mayor gloria no es nunca caer, sino levantarse siempre”

Nelson Mandela

Dedicatoria

Dedico esta tesis a todas las personas que confiaron en mí, especialmente a mi familia y polola que siempre apoyaron mi deseo de ser Ingeniero Civil, ya sea en lo emocional como en la económico siendo la motivación y los pilares fundamentales e incondicionales de este gran paso, sin duda alguna, no lo hubiese logrado sin su apoyo. No hay forma de retribuir toda la comprensión y el enorme esfuerzo que han realizado. Este trabajo ha sido por y para Ustedes. Es difícil no dejar fuera o no nombrar a un montón de gente que pasó por todo ese proceso dejando enseñanzas, alegrías y momentos difíciles.

A mis compañeros que pasaron a lo largo de todo mi periodo universitario y los amigos que he formado, tengo más que claro que serán para siempre. Al vernos todo el día y todos los días, ya sea en clases, estudiando o simplemente compartiendo, pasamos a ser una familia.

A mis amigos y compañeros de la Selección de Básquetbol de la Universidad de Valparaíso y al Club New Crusaders que pasamos largos años juntos, compartiendo entrenamientos, partidos, campeonatos y vivencias que nos hacían ser un verdadero equipo dentro y fuera de la cancha.

Agradecimiento

Primero que todo quiero partir agradeciendo a mi familia, ya que la persona que soy la soy gracias a ellos, todo lo que me anda enseñado e inculcado, valores, lo bueno y lo malo, lo lindo y lo feo, en fin, una parte de lo que soy, porque la otra la he formado y la seguiré formando viviendo la vida día a día.

A mi profesor guía, el señor Guillermo Brante quien me ha ayudado y apoyado durante este largo proceso, siempre con la mejor disponibilidad y excelente voluntad. Gracias por permitirme realizar este trabajo en conjunto.

A todo el equipo que conforma el Laboratorio regional de vialidad de la Quinta Región, ya que siempre me apoyaron, ayudaron y resolvieron cualquier duda existente, que en ese momento eran bastantes.

Agradezco a la Señora Gabriela Muñoz, quien es la Jefa Subdepartamento. Normalización, Desarrollo y Control del Laboratorio Nacional de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, quien es la pionera en Chile en la utilización de polvo de caucho en mezclas asfálticas en caliente, por su disposición, conocimientos y excelente voluntad. A su vez, al Laboratorio Nacional de Vialidad especialmente al Departamento de Asfalto, en donde pude realizar los ensayos a las probetas.

Dar gracias a mi tía Elizabeth Zurita, quien me ayudó en la extensa y fastidiosa simulación del ciclo hielo-deshielo, haciéndolo de la mejor manera posible.

Dar gracias también al profesor Andres Jamet, quien me ayudó a encontrar el tema del trabajo de título y también ayudó en dudas que surgieron durante el desarrollo de este.

Y por último, agradezco también a todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Valparaíso, a los que están y los que estuvieron, gracias por formarme como Ingeniero Civil.

Índice

Índice.....	5
Glosario.....	8
Lista de figuras.....	11
Listas de tablas.....	13
Lista de ecuaciones.....	15
Resumen.....	16
1. CAPÍTULO I : Introducción.....	17
1.1 Introducción.....	17
1.2 Planteamiento del problema.....	23
1.3 Objetivos.....	24
1.3.1 General.....	24
1.3.2 Específicos.....	24
1.4 Alcance de la investigación.....	25
1.5 Metodología de la investigación.....	26
2. CAPÍTULO II: Marco teórico.....	30
2.1 Caucho.....	30
2.2 Polvo de caucho.....	31
2.2.1 Neumático fuera de uso (NFU).....	31
2.2.2 Obtención del polvo de caucho.....	33
2.3 Mezclas asfálticas.....	37
2.3.1 Mezclas asfálticas en caliente.....	37
2.4 Mezclas asfálticas en caliente con incorporación de polvo de caucho (NFU).....	43

2.4.1	Técnica de incorporación de mezcla asfáltica	43
2.4.2	Ventajas Técnicas	49
2.4.3	Ventajas Ambientales.....	50
2.4.4	Desventajas.....	50
2.4.5	Propiedades físicas y químicas del polvo de caucho	51
2.5	Ciclos hielo-deshielo.....	52
2.5.1	Temperatura	52
2.5.2	Cambios de temperatura	53
2.5.3	Asfalto frente a los Ciclos hielo-deshielo.....	54
3.	CAPÍTULO III : Método de ensaye y control	56
3.1	Trabajo en Laboratorio	56
3.1.1	Materiales constituyentes	56
3.1.2	Diseño de mezclas asfálticas en caliente	60
3.1.3	Caracterización de mezclas asfálticas.....	69
3.1.4	Simulación ciclo hielo-deshielo.....	71
4.	CAPÍTULO IV: Estudio Comparativo del comportamiento mecánico entre las mezclas asfálticas convencionales y mezclas con polvo de caucho	72
4.1	Caracterización de los materiales.....	72
4.1.1	Áridos	72
4.1.2	Cemento asfáltico.....	74
4.1.3	Mezcla de áridos	76
4.1.4	Polvo de caucho	78
4.2	Diseño de mezclas	80
4.2.1	Mezcla asfáltica convencional	80
4.2.2	Mezcla asfáltica con polvo de caucho de NFU nacional incorporado por vía seca	81
4.3	Comparación de las propiedades de las mezclas	85

4.3.1	Estabilidad Marshall.....	86
4.3.2	Tracción Indirecta	89
5.	CAPÍTULO VI: Conclusiones y recomendaciones	93
5.1	Conclusiones generales	93
5.2	Conclusiones específicas	94
5.2.1	Probetas sin exposición al ciclo hielo-deshielo.....	94
5.2.2	Probetas con exposición al ciclo hielo-deshielo.....	95
5.3	Recomendaciones.....	96
	Bibliografía	97
	Anexo A.....	100
	Diseño Marshall.....	100
	Anexo B.....	102
	Sensibilidad al agua	102
	Anexos C.....	106
	Parámetros Marshall	106
	Anexo D	115
	Tracción Indirecta.....	115
	Anexo D	124
	Distribución t de Student	124

Glosario

Abrasión: Proceso de desgaste producido en una superficie por pérdida de material causadas por agentes externos.

Agregado Pétreo: Árido compuesto de partículas duras, de forma y tamaño estables.

Ahuellamiento: Depresión longitudinal del pavimento que coincide con la zona donde pasan con mayor frecuencia las ruedas de los vehículos (huella).

Árido Fino: Árido que pasa por el tamiz de abertura 5 mm (hormigón) y 2,5 mm (asfalto) y es retenido en de 0,08 mm.

Árido Grueso: Árido retenido en el tamiz de abertura 5 mm (hormigón) y 2,5 mm (asfalto).

Asfáltenos: Componentes de los asfaltos, solubles en tricloroetileno, pero insolubles en ciertos hidrocarburos parafínicos livianos. Le confieren la propiedad de dureza a los asfaltos.

Asfalto Modificado con polímero: Material que se obtiene al modificar un cemento asfáltico con un polímero, resultando un ligante de características reológicas mejoradas.

Asfalto Modificado con polvo de caucho: Material que se obtiene al modificar un cemento asfáltico con polvo de caucho de neumáticos fuera de uso, por proceso vía seca o húmeda, resultando un ligante de características reológicas mejoradas.

Capa de Rodadura: Capa superficial de un camino que recibe directamente la acción del tránsito. Debe ser resistente al deslizamiento, a la abrasión y a la desintegración por efectos ambientales.

Cemento Asfáltico: Material obtenido por refinería de residuos de petróleo y que debe satisfacer los requerimientos establecidos para su uso en la construcción de pavimentos.

Compactación: Operación mecanizada para lograr en una capa de mezcla asfáltica la densidad deseada.

Craqueo térmico: Este proceso tiene por objeto la ruptura (cracking) de cadenas de hidrocarburos de alto peso molecular, mediante la acción combinada de alta temperatura y tiempo de residencia .

Cubicidad de partículas: Con este ensayo, se determina el contenido porcentual de partículas chancadas, rodadas y lajeadas de la fracción de un pétreo retenida en el tamiz 5 mm.

Deformación elástica, reversible o no permanente: El cuerpo recupera su forma original al retirar la fuerza que le provoca la deformación.

Deformación plástica, irreversible o permanente: Modo de deformación en que el material no regresa a su forma original después de retirar la carga aplicada.

Densidad Real Seca: Densidad real en que se considera solamente la masa del pétreo seco.

Densidad Neta: Densidad en que se considera el volumen macizo de las partículas de material pétreo más el volumen de los poros inaccesibles.

Estabilidad Marshall: Carga máxima que soporta la probeta asfáltica cuando se somete al ensayo Marshall.

Exudación: Afloramiento superficial del exceso de ligante de un tratamiento o mezcla asfáltica.

Fluidez o Fluencia Marshall: Deformación correspondiente a la carga máxima de rotura de una probeta asfáltica en el ensayo Marshall.

Granulometría: La distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen el agregado pétreo.

Ligante asfáltico: Cemento basado en asfalto producido a partir de residuos de petróleo, ya sea con o sin adición de modificadores orgánicos no particulados.

Maltenos: Componentes de los asfaltos, solubles en sulfuro de carbono, tetracloruro de carbono e hidrocarburos parafínicos livianos, que le confieren la propiedad de cohesividad o ligazón a los asfaltos.

Reología: Es parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir.

Resiliencia: Es una magnitud que cuantifica la cantidad de energía por unidad de volumen que almacena un material al deformarse elásticamente debido a una tensión aplicada.

Resistencia al desgaste: El objetivo de este ensayo, es medir la dureza de los pétreos mayores a 2.5 mm, mediante la máquina de Los Ángeles.

Stripping: Desprendimiento de la película asfáltica que recubre el agregado pétreo debido a la penetración de agua entre la superficie del agregado y la película de asfalto, ya que dada la mayor afinidad del agua con el pétreo la unión entre los materiales que componen la mezcla asfáltica se rompe.

Susceptibilidad térmica: Es la variación de la consistencia del ligante con la temperatura.

Polímero: Sustancia de alto peso molecular, formada por la unión de moléculas pequeñas llamadas monómeros, formando macromoléculas de diversas formas: cadenas en escalera, cadenas termófilas (que no son afectadas por cambios de temperatura), cadenas largas y moléculas sueltas, etc.

Presión hidrodinámica: Es la presión que un fluido ejerce sobre un cuerpo que se desplaza.

Tensiones térmicas: Cuando a un sistema se le aplica un incremento de temperatura que hace que se dilate, y hay alguna causa que impide el alargamiento (debido a la dilatación) aparecen unas tensiones denominadas de origen térmico.

Trabajabilidad: Facilidad con que una muestra puede ser elaborada, distribuida, conformada y terminada.

Tracción: Esfuerzo interno a que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúen en sentido opuesto, y tienden a estirarlo.

Vacíos en el Agregado Mineral: Es el volumen de vacíos entre las partículas de agregado de una mezcla compactada; incluyendo los huecos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como porcentaje del volumen total.

Lista de figuras

Figura 1-1: Rangos de temperaturas por mes del año 2014, en la ciudad de los Andes.	17
Figura 1-2: Empresa Polambiente S.A.	20
Figura 1-3: Diagrama de flujo de la metodología de la investigación (parte 1).....	28
Figura 1-4: Diagrama de flujo de la metodología de la investigación (parte 2).....	29
Figura 2-1: Nomenclatura del caucho natural.	30
Figura 2-2: Árbol de caucho.	30
Figura 2-3: Principales componentes de un neumático.....	33
Figura 2-4: Resultados de la trituración de NFU.	33
Figura 2-5: Etapas para la obtención del polvo de caucho.....	34
Figura 2-6: Proceso de trituración ambiental.....	35
Figura 2-7: Proceso de trituración criogénica.....	36
Figura 2-8: Planta Asfáltica, proceso de fabricación de una mezcla asfáltica en caliente.....	38
Figura 2-9: Proceso por Vía Húmeda.....	44
Figura 2-10: Proceso por Vía Seca	45
Figura 3-1: Realización de granulometría al árido.....	57
Figura 3-2: Confección de la dosificación de los áridos según diseño.	62
Figura 3-3: Martillo de compactación Marshall.....	62
Figura 3-4: Prensa marshall y mordaza de carga.	63
Figura 3-5: Probetas en saturación al vacío.....	67
Figura 3-6: Prensa Marshall equipada con el bastidor de ensayo (prensa Lottman).	68
Figura 4-1: Curva distribución granulométrica Banda IV-A-12	78
Figura 4-2: Curva distribución granulométrica del polvo de caucho	79
Figura 4-3: Gráfico de resistencia a tracción indirecta (ITS) para probetas secas y húmedas.....	84
Figura 4-4: Control de temperatura a la simulación ciclo hielo-deshielo	85

Figura 4-5: Gráfico Estabilidad Antes v/s Después ciclos hielo-deshielo87

Figura 4-6: Resistencia a la Tracción Indirecta antes y después del ciclo hilo-deshielo90

Listas de tablas

Tabla 1-1: Investigaciones nacionales sobre la incorporación de polvo de caucho en mezclas asfálticas por vía húmeda.	21
Tabla 1-2: Investigación nacionales sobre la incorporación de polvo de caucho en mezclas asfálticas por vía seca, realizadas en LNV.....	22
Tabla 2-1: Composición de los neumáticos en la Unión Europea.	32
Tabla 2-3: Terminología asociada al uso de polvo de caucho en mezclas asfálticas.....	43
Tabla 2-4: Diferencias entre los procesos de mezclado Seco y Húmedo	48
Tabla 2-5: Banda granulométricas especificadas para el polvo de caucho.....	52
Tabla 3-1: Ensayes de caracterización y requisitos para áridos en carpeta.....	57
Tabla 3-2: Banda granulométrica Semidensa IV-A-12	58
Tabla 3-3: Ensaye de caracterización y requisitos para el CA 24.	59
Tabla 3-4: Requisitos para la utilización del polvo de caucho, según NCh 3258-2012	60
Tabla 3-5: Bandas granulométricas del polvo de caucho.....	60
Tabla 3-6: Requisitos de las propiedades Marshall.....	64
Tabla 4-1: Granulometría áridos utilizados.....	73
Tabla 4-2: Constantes físicas e hídricas de los áridos.	73
Tabla 4-3: Parámetros de ensayos al cemento asfáltico.....	75
Tabla 4-4: Constantes físicas e hídricas de la mezcla de áridos.....	76
Tabla 4-5: Banda granulométrica mezcla áridos	77
Tabla 4-6: Aporte porcentual áridos	77
Tabla 4-7: Granulometría y banda de trabajo polvo de caucho.....	78
Tabla 4-8: Requisitos físicos y contaminantes del polvo de caucho	79
Tabla 4-9: Parámetros de diseño Marshall mezcla 0% Caucho.....	80
Tabla 4-10: Parámetros de diseño Marshall mezcla 0,5% y 1,0% Caucho	81
Tabla 4-11: Resumen diseño de mezclas	82

Tabla 4-12: Resultados ensayo cámara presión	82
Tabla 4-13: Resultados ensayo sensibilidad al agua	83
Tabla 4-14: Resultados de Densidades y Estabilidad Marshall para cada mezcla	86
Tabla 4-15: Variación de la Estabilidad antes y después del ciclo hielo-deshielo	87
Tabla 4-16: Parámetros Marshall mezcla con polvo de caucho	89
Tabla 4-17: Resultados ITS antes y después del ciclo hielo-deshielo.....	90
Tabla 4-18: Variación ITS antes y después ciclos hielo-deshielo.....	92

Lista de ecuaciones

Ecuación 3-1: Expresión resistencia a la tracción indirecta (ITS).....	68
Ecuación 3-2: Expresión de la resistencia conservada por tracción indirecta.....	69

Resumen

En el presente trabajo se evalúa y compara las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica convencional con la mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho nacional mediante proceso vía seca frente a los ciclos hielo-deshielo, con la idea de utilizar esta adición (polvo de caucho) como una alternativa sustentable y físicamente viable para lograr un aumento en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica.

El aumento del uso del polvo de caucho de los neumáticos fuera de uso (NFU) en el área vial ha sido motivada, por una parte, para conseguir mejoras estructurales en las mezclas asfálticas modificadas con este y por otro lado, a que la fabricación de esta mezcla pueda significar un costo menor a las actuales alternativas.

Se analizó a nivel de laboratorio las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas utilizadas, a través de la simulación de los ciclos hielo-deshielo, parámetros Marshall, tracción indirecta y sensibilidad al agua.

Los resultados arrojados por la evaluación, validan el uso del polvo de caucho en las mezclas asfálticas en caliente, ya que en todo momento obtuvieron un desempeño aceptable, ya sea antes o después del ciclo hielo-deshielo.

Se concluye entonces, que una mezcla con polvo de caucho de NFU es una opción viable como material de pavimentos de camino, además de poseer buenas características para enfrentar el problema de los cambios climáticos, particularmente el ciclo hielo-deshielo. Por último, se recomienda complementar este trabajo de título con una experiencia en terreno.

Palabras clave: mezcla asfáltica, caucho, NFU, ciclo hielo-deshielo, comparación.

1. CAPÍTULO I : Introducción

1.1 Introducción

En Chile, debido a su disposición geográfica, existe una gran diversidad de climas, lo que conlleva a que sus temperaturas sean completamente distintas en diferentes zonas. A su vez, el crecimiento económico hace necesaria constantes inversiones de recursos, mayormente de tecnología, para responder de mejor forma ante los eventuales problemas que surgen día a día. En el ámbito de los medios de transporte se ha requerido mejoras de los estándares de las carreteras, con el fin de prestar un servicio óptimo y así abarcar un mayor volumen de vehículos y aumentar la seguridad, entre otros aspectos. Permanentemente se trabaja para mejorar el diseño de la geometría de los caminos, como también en avanzar con la implementación de nuevos materiales para mejorar y brindar una mejor respuesta de los caminos frente a los problemas con que se encuentran en su vida útil, como las condiciones climáticas, zonas de alto tránsito, etc.

Específicamente en la zona cordillerana de la V Región, ciudad de los Andes y San Felipe el clima es de transición entre clima estepárico cálido con gran sequedad atmosférica y mediterráneo cálido con estación seca prolongada de 6 a 7 meses, con una precipitación promedio anual de 86,98mm. La temperatura media anual para Los Andes es de 16 °C con una particular amplitud térmica, en donde los meses de mayor insolación pueden llegar fácilmente a los 37 °C y los meses de invierno puede bajar levemente de los -6,2 °C como se muestra en la Figura 1-1. [1]

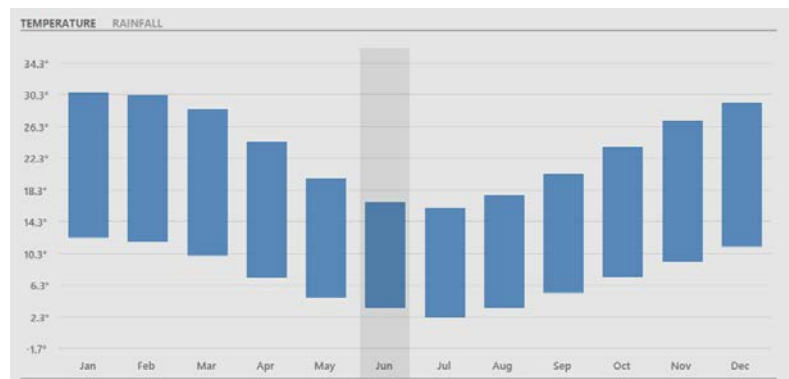


Figura 1-1: Rangos de temperaturas por mes del año 2014, en la ciudad de los Andes.

Fuente: <http://www.msn.com>

En los meses de invierno ocurre el conocido ciclo hielo-deshielo en la zona cordillerana de la región de Valparaíso, el cual afecta directamente al pavimento asfáltico. Los cambios de temperatura son la causa principal de los daños a los pavimentos de carreteras, por lo tanto, conseguir un mejor conocimiento del impacto de aumentar o disminuir la temperatura es un logro muy importante para solucionar este problema, para mejorar el rendimiento del pavimento asfáltico de las carreteras. Los resultados del estudio han demostrado que existen importantes efectos negativos de los ciclos de hielo-deshielo en las propiedades de ingeniería del concreto asfáltico [8].

El pavimento asfáltico es una parte importante de la infraestructura de transporte, que se expone en la atmósfera, y sufre el efecto climático, medio ambiente, y la carga vehicular directamente [2]. El asfalto es un material termoplástico, y la mezcla de concreto asfáltico (AC) presentan características viscoelásticas [2]. Numerosos estudios han encontrado que las solicitaciones del pavimento tienen gran relación con el clima y el medio ambiente, así como también las cargas [2],[3]. De acuerdo a la referencia bibliográfica mostraron que la temperatura y la humedad son los factores de mayor impacto en el comportamiento del pavimento de asfalto [2],[4]. Debido a la sensibilidad a la temperatura y la humedad del pavimento asfáltico, el rendimiento y capacidad de servicio de éstos se ve más afectados que en otro tipo de solución de carpeta de rodadura. Grietas térmicas, daño debido a la humedad y otras fallas son producto de bajas temperaturas en pavimentos de asfalto en las regiones frías [5].

Agrietamiento a baja temperatura y agrietamiento por fatiga térmica son las dos formas de agrietamiento térmico en el pavimento de asfalto [2]. Cuando la temperatura cae rápidamente existe baja temperatura continua, se forma el estrés de temperatura en el pavimento de asfalto. Agrietamiento a baja temperatura se produce cuando la tensión de tracción térmica en pavimento de asfalto supera su resistencia a la tracción [2],[5]. Si la tensión integral (tensión por temperatura, tensión de carga, etc.) es menor que la resistencia a la tracción, al interior se acumulan microdaños en vez de formar grietas. Después de un gran número de ciclos de congelación-descongelación, el esfuerzo integral excede la resistencia a la rotura de la mezcla de asfalto, lo que conduce a grietas y otros deterioros aparentes [3], [6]. El agua causa la interrupción de la unión entre el asfalto y el agregado en la interfaz de asfalto-agregado, este fallo prematuro de la adhesión se conoce comúnmente como decapado en pavimentos de asfalto [7].

Considerando lo anterior, se plantea la idea de la utilización de los neumáticos fuera de uso, de manera que el pulverizado de éstos pueda ayudar con la estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente frente a los ciclos hielo-deshielo. Los neumáticos fuera de uso constituyen una gran

problemática medioambiental en Chile y en el mundo, debido principalmente a las dificultades que conlleva su adecuada disposición final. Estos elementos poseen un lento proceso de descomposición, que requiere entre 500 y 3000 años, convirtiéndose prácticamente en un residuo no degradable. Además, lo dificultoso que resulta su gestión, por su gran volumen y generación dispersa, y la falta de políticas y normas medioambientales que los regulen, hace que la mayoría de los neumáticos desechados se encuentren generando contaminación, acumulándose en sitios eriazos y vertederos clandestinos o siendo quemados a cielo abierto para disminuir el gran espacio que ocupan, sin los cuidados que esto requiere. El sector de los NFU representa el 90% de su totalidad, afectando gravemente el paisaje, degradando la imagen de las comunidades aledañas y al medioambiente.

Las mezclas asfálticas en caliente utilizadas en pavimentos, pueden incorporar una parte importante del caucho contenido en éstos, y por consiguiente tiene un interesante potencial para consumir neumáticos en desuso. La adición de caucho a las mezclas asfálticas no tan sólo contribuye a mitigar el problema ambiental asociado a éstos, sino que también permite mejorar las propiedades del pavimento de una manera más económica que con otros modificadores alternativos. En efecto, las mezclas asfálticas con incorporación de caucho proporcionan un pavimento con mejores respuestas a los cambios térmicos, así como también mayor resistencia a la fisuración por fatiga, al ahuellamiento y al envejecimiento, de esta manera, se aumenta la vida útil de los caminos y disminuyen los costos de mantenimiento. Adicionalmente, reducen el nivel de ruido generado por los vehículos al contacto con el pavimento y aumentan el contraste con las “marcas viales” (superficies de un color más negro y durable).

En Chile, el mayor uso de los neumáticos fuera de uso (NFU) lo realizan las empresas cementeras como combustible. En el año 2010 se instala la empresa Polambiente como se muestra en la Figura 1-2, la cual es la primera que procesa los neumáticos obteniendo granos de caucho de distintas granulometrías y también polvo de caucho [27].

La empresa Polambiente está produciendo polvo y granos de caucho producto de NFU a través del proceso de trituración ambiental. Los granos de caucho son utilizados en canchas de pasto sintético, superficies deportivas y recreacionales. Otro uso particular, es la incorporación del polvo de caucho en mezclas asfálticas. [9]



Figura 1-2: Empresa Polambiente S.A.

Las formas más comunes de incorporación del polvo de caucho reciclado dentro de las mezclas asfálticas son la vía húmeda y la vía seca. En la primera, el caucho es mezclado previamente con el cemento asfáltico a temperaturas elevadas para producir un ligante modificado denominado asfalto-caucho, que se añade posteriormente a los agregados pétreos. En la vía seca, el polvo de caucho se añade a la mezcla como un agregado más (fracción fina de áridos), antes de la incorporación del cemento asfáltico, siendo el producto usualmente denominado mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho. En ambos métodos, el caucho interactúa con el asfalto en un proceso denominado digestión, se entiende por digestión a la reacción que tiene el caucho al interactuar con el asfalto en la mezcla, que ocurre desde la superficie del grano hasta el centro de este, y es más fuerte cuando el tiempo de digestión es mayor, las temperaturas son más altas y para granulometrías de caucho más finas. [10]

La digestión tiene principalmente dos efectos en el asfalto: el primero es el aumento de su viscosidad, y el segundo es la modificación de su reología (su comportamiento en función de la temperatura y el tiempo de carga), que aumenta su resiliencia y elasticidad a altas temperaturas y disminuye su susceptibilidad térmica [23].

El grado de aporte de la adición de caucho a la mezcla, queda determinada por su granulometría, la tecnología de incorporación (vía seca o húmeda), el porcentaje de adición, el tiempo y temperatura de digestión del caucho.

En Chile, estas nuevas tecnologías tienen muy poco uso, y se han tratado de integrar a través de investigaciones y estudios para, a través de ellos, dar a conocer y fomentar su utilización en proyectos viales, en la Tabla 1-1 y Tabla 1-2 se observa un resumen con las experiencias en estas tecnologías. En relación a la vía húmeda, la Dirección de Vialidad ha realizado dos tramos de prueba con estas mezclas asfálticas en capas de rodadura; el primero de ellos, se encuentra en la Ruta X-65 de la Undécima Región de Aysén y se construyó el año 2004, y el segundo tramo se ejecutó en la Rehabilitación de la Ruta 60-CH de la Provincia de Los Andes, V Región, el año 2005.

Con respecto al proceso por vía seca, se han realizado una serie de investigaciones para la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, llevadas a cabo desde el año 2006 por el Laboratorio Nacional de Vialidad (LNV) a través de estudiantes que han desarrollado su memoria de pregrado guiados por profesionales del área. En estas, se ha estudiado progresivamente a nivel de laboratorio el efecto de la incorporación de polvo de caucho de NFU en las mezclas asfálticas bajo los estándares españoles, ajustando tal proceso a la realidad nacional y con resultados acordes a los esperados según la experiencia internacional, en la Tabla 1-2 se muestra investigaciones nacionales sobre la incorporación de polvo de caucho por vía seca.

Tabla 1-1: Investigaciones nacionales sobre la incorporación de polvo de caucho en mezclas asfálticas por vía húmeda.

Año	Nombre	Autor	Universidad
2000	Estudio del mejoramiento del asfalto en base a reciclados de neumáticos	Empresa Probisa	-
2001	Incorporación de caucho de neumático desechables en asfalto	Patricio Gutiérrez Ruiz	Universidad de Chile
2002	Estudio de factibilidad técnica y estimación de la demanda de pavimentos de asfalto modificado con caucho de neumático desechados	Pablo Badilla Montes	Universidad de Chile
2005	Aplicación de mezclas asfálticas modificadas con caucho, programa de seguimiento en ruta X-65 y 60-CH	Yasmila Herrera Toledo	Universidad de Chile

Fuente: Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Nayade Navarro Dupré.

Tabla 1-2: Investigación nacionales sobre la incorporación de polvo de caucho en mezclas asfálticas por vía seca, realizadas en LNV.

Año	Nombre	Autor	Universidad
2006	Estudio de la utilización de caucho de neumático en mezclas en caliente mediante proceso seco	Náyade Ramírez Palma	Universidad de Chile
2007	Estudio del efecto de la variación en la granulometría del caucho en mezclas asfálticas por vía seca	Raúl Segovia Airaudó	Universidad de Chile
2011	Evaluación cuantitativa del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas modificadas incorporando polvo de caucho de NFU nacional mediante vía seca	Ricardo Urrutia Torres	Universidad Andrés Bello
2013	Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho nacional de neumático fuera de uso (NFU) mediante vía seca	Nicole Navarro Dupré	Universidad de Chile
2013	Estudio Comparativo del comportamiento de mezclas asfálticas modificadas versus mezclas asfálticas en caliente con polvo de caucho de NFU nacional mediante vía seca	Camilo Jorquera Rivas y Andrea Peñaloza Navarro	Universidad de Santiago

Fuente: Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Nayade Navarro Dupré, con actualización.

Hasta el momento el Laboratorio Nacional de Vialidad ha definido los criterios que rigen la selección y uso del polvo de caucho de NFU en la confección de mezclas asfálticas por vía seca (porcentaje de adición, granulometrías, etc.) y se han formulado especificaciones técnicas tentativas para la dosificación, fabricación y puesta en obra de estas mezclas asfálticas modificadas, siempre optimizando el empleo del polvo de caucho para conseguir los beneficios potenciales de la técnica por vía seca.

1.2 Planteamiento del problema

En Chile, específicamente en la zona cordillerana de la V Región, surgen problemas causados por una serie de fenómenos climáticos de tipo cíclico, que afectan la vida útil de la mezcla asfáltica que se utiliza en la elaboración de estructuras viales. Uno de estos problemas es generado por el fenómeno que ocurre en la época de heladas, con bajas temperaturas en la madrugada y altas temperaturas en el día, los llamados ciclos de hielo-deshielo. Este fenómeno causa problemas serios a los pavimentos en sus propiedades mecánicas, específicamente el daño causado por la expansión del agua que resulta en la disminución de la resistencia a la tracción indirecta. Y el otro es el daño en la interface entre el asfalto y el agregado, o fractura de mortero de asfalto, que produce un mayor aumento de la pérdida de peso. [11]

A su vez, existe un grave problema medioambiental que ataca al planeta día a día. Se trata del uso excesivo de medios de transporte terrestre, independientemente de su naturaleza resulta evidente que se trata de uno de los principales problemas medioambientales de hoy en día, produciendo un gran daño ecológico con los gases tóxicos que emiten, así como también con los materiales y productos que desechan, específicamente los neumáticos. Las principales dificultades generadas por este residuo, tienen que ver con su disposición final, ya que la mayoría de los neumáticos fuera de uso, se encuentran botados a la orilla del camino, sitios eriazos o vertederos clandestinos, ocupando gran espacio. Hoy en día en Chile se generan desechos anuales de un poco menos de 3 millones de neumáticos fuera de uso (NFU), cantidad equivalente a unas 42.000 toneladas de residuo, cifra que sin duda se encuentra en alza. [12]

Con el objetivo de afrontar los temas anteriormente mencionados, nace el interés de utilizar un material existente que ya ha sido estudiado y ha quedado demostrado las mejoras en las propiedades mecánicas del material, dando énfasis a la mejor respuesta frente a los distintos cambios de temperatura, contribuyendo a la problemática vial del ciclo hielo-deshielo en el comportamiento mecánico de los pavimentos asfálticos en caliente, esto genera un menor costo ecológico debido a la reutilización de los neumáticos desechados. Esta idea se basa en un material mejorado, que resulta de una mezcla asfáltica en caliente con caucho reciclado mezclado por vía seca, donde se utiliza el caucho en un granulometría pequeña (polvo de caucho) y se mezcla con asfalto como si fuera un áridos más.

Este trabajo pretende demostrar que dicha mezcla respondería de mejor manera que la mezcla asfáltica tradicional a los ciclos climáticos que se presentan en la zona cordillerana de la V Región.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

- Evaluar experimentalmente el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente con distintos contenidos de caucho reciclado frente a la acción de los ciclos hielo-deshielo

1.3.2 Específicos

- Evaluar el resultado en el proceso de ciclo hielo-deshielo en laboratorio aplicable a mezclas asfálticas en caliente, según los parámetros basados en la norma de hormigón ASTM c666- c666m (*American Society for Testing and Materials*).
- Definir el tamaño y cantidad de caucho para la mezcla con el asfalto en caliente, luego compararla con la mezcla sin modificar. Con esto determinar la cantidad óptima de caucho en la mezcla para la solución del problema de la resistencia ante los ciclos hielos-deshielos.
- Evaluar experimentalmente la influencia que el contenido de caucho tiene en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente frente a la acción de los ciclos hielo-deshielo, mediante los “ensayos de estabilidad de marshall”, que mide la resistencia al flujo plástico de probetas cilíndricas de un mezcla de pavimentación bituminosa cargado en la superficie lateral por medio del aparato marshall y el “ensayo de tracción indirecta”, que destaca por ser un método simple y representativo, que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible y obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de la falla.
- Determinar la relación óptima entre el porcentaje y tamaño de caucho en la mezcla asfáltica y la resistencia de ésta frente al ciclo hielo-deshielo.

1.4 Alcance de la investigación

- Condiciones climáticas equivalentes a la zona cordillerana de la V Región (rango temperatura entre -6 a 15°C).
- Ciclo hielo-deshielo se simulará basado en lo estipulado por la ASTM c666- c666m.
- Ensayos de “estabilidad Marshall” y “tracción indirecta” se realizarán de forma experimental en el Laboratorio Nacional de Vialidad, Región Metropolitana.
- La combinación de la mezcla asfáltica y el caucho reciclado se realizará mediante el proceso ya mencionado anteriormente, “vía seca”.
- Se considerará una temperatura de digestión de 170°C, correspondiente a la temperatura a la cual se realizará el proceso vía seca, temperatura estimada según recopilación de información de procesos anteriores.
- Se estima conveniente para el proceso de digestión por vía seca un tiempo de duración de 1 horas, estimada según recopilación de información de procesos anteriores.
- El porcentaje de asfalto óptimo a utilizar se obtendrá del diseño marshall que se le realizará a la mezcla asfáltica sin adición de caucho, luego con ese porcentaje de asfalto, a las probetas con caucho se ensayarán mediante la “determinación de la sensibilidad al agua” de las probetas de mezclas bituminosas de la norma Española UNE-EN 12697-12, para verificar que cumple los requisitos mínimos para su construcción.
- Para la evaluación de la propuesta se estimó conveniente utilizar un tamaño de caucho reciclado que corresponde a P2, definido por la norma NCh03258-2012, ya que por estudios anteriores, son los rangos en los que el caucho es un beneficio para la mezcla y es el producto que actualmente no es utilizado, siendo el principal desecho del reciclaje de neumáticos fuera de uso en Chile.
- Se utilizará distinto porcentaje de caucho en la mezcla (0%, 0,5% y 1%) con respecto al peso del agregado pétreo. No se utiliza un mayor porcentaje debido a que está comprobado que no existe mayor beneficio en las propiedades mecánicas de la mezcla con adiciones superiores a las antes mencionadas.

1.5 Metodología de la investigación

- Recopilación referente a los temas estudiados, correcto diseño de las probetas con caucho mediante vía seca y simular de la mejor forma el ciclo hielo-deshielo.
- Adquirir el caucho reciclado, áridos y cemento asfáltico.
- Realizar diseño marshall a la mezcla asfáltica convencional para determinar el porcentaje óptimo de asfalto.
- Establecer la proporción del caucho a utilizar, relacionada con el peso de los áridos.
- Con el porcentaje óptimo de asfalto, polvo de caucho y mezcla de los áridos, se realizan las probetas de caucho para verificar si la mezcla cumple con lo estipulado en la norma UNE-UN 12697-12.
- Mezclar los agregados calientes con la cantidad de caucho que corresponda, y colocarlos en horno entre 150° y 190°C por aproximadamente 5 minutos para que el caucho aumente su temperatura.
- Adicionar el asfalto, previamente calentado a la mezcla.
- Colocar la mezcla asfáltica por un periodo de digestión en el horno de 1 horas.
- Retirar la mezcla del horno y remover el material.
- Verificar si el contenido de asfalto para las mezclas con caucho cumplen con la normativa vigente, para esto se debe realizar el ensayo de sensibilidad al agua. Es decir se debe compactar la mezcla en caliente en moldes marshall (63.5 mm altura y 101.6 mm diámetro) precalentados. La compactación se lleva a cabo a una temperatura de 10°C más baja que la de la digestión, con 50 golpes de martillo marshall.
- Realizar el ensayo de sensibilidad al agua a las probetas, donde la resistencia por tracción indirecta tras inmersión de la mezcla asfáltica, según la norma UNE-EN 12697-12, debe ser mayor o igual al 85%.

- Al cumplir, se realizan las probetas necesarias para realizar el trabajo de título con distintos porcentajes de polvo de caucho.
- Compactar la mezcla caliente en moldes marshall (63.5 mm altura y 101.6 mm diámetro) precalentados, con 75 golpes de martillo marshall por lado.
- Dejar reposar por 24 horas a 60°C antes de extraer la probeta del molde.
- Realizar la primera parte del muestreo, los ensayos de “estabilidad de marshall y de “tracción indirecta”.
- Someter a las probetas restantes a los ciclos hielo-deshielo en laboratorio por aproximadamente 60 ciclos de una duración de 16 horas (8 horas en el congelador a una temperatura de -6 grados +-1 y 8 horas a una temperatura de 15 grados +-1). Simulando el proceso de hielo en un refrigerador y el deshielo a temperatura ambiente.
- Terminada la simulación ensayar las probetas de la misma forma anteriormente descrita, obteniendo los últimos valores que se necesitan para determinar la correlación.
- Analizar los resultados y concluir

A continuación se esquematiza en un diagrama de flujo la metodología de la investigación en la figura 1-3 y figura 1-4.

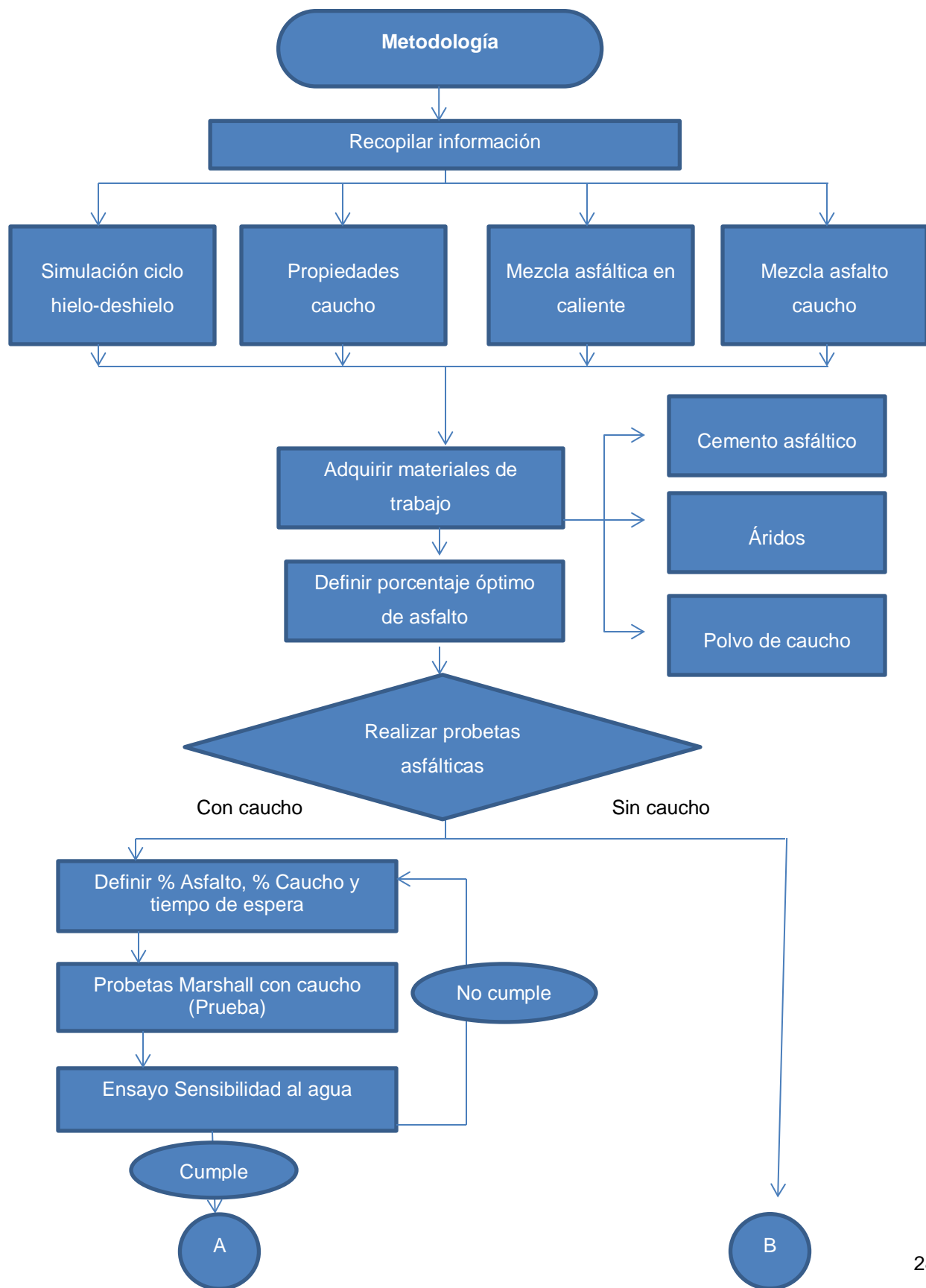


Figura 1-3: Diagrama de flujo de la metodología de la investigación (parte 1)

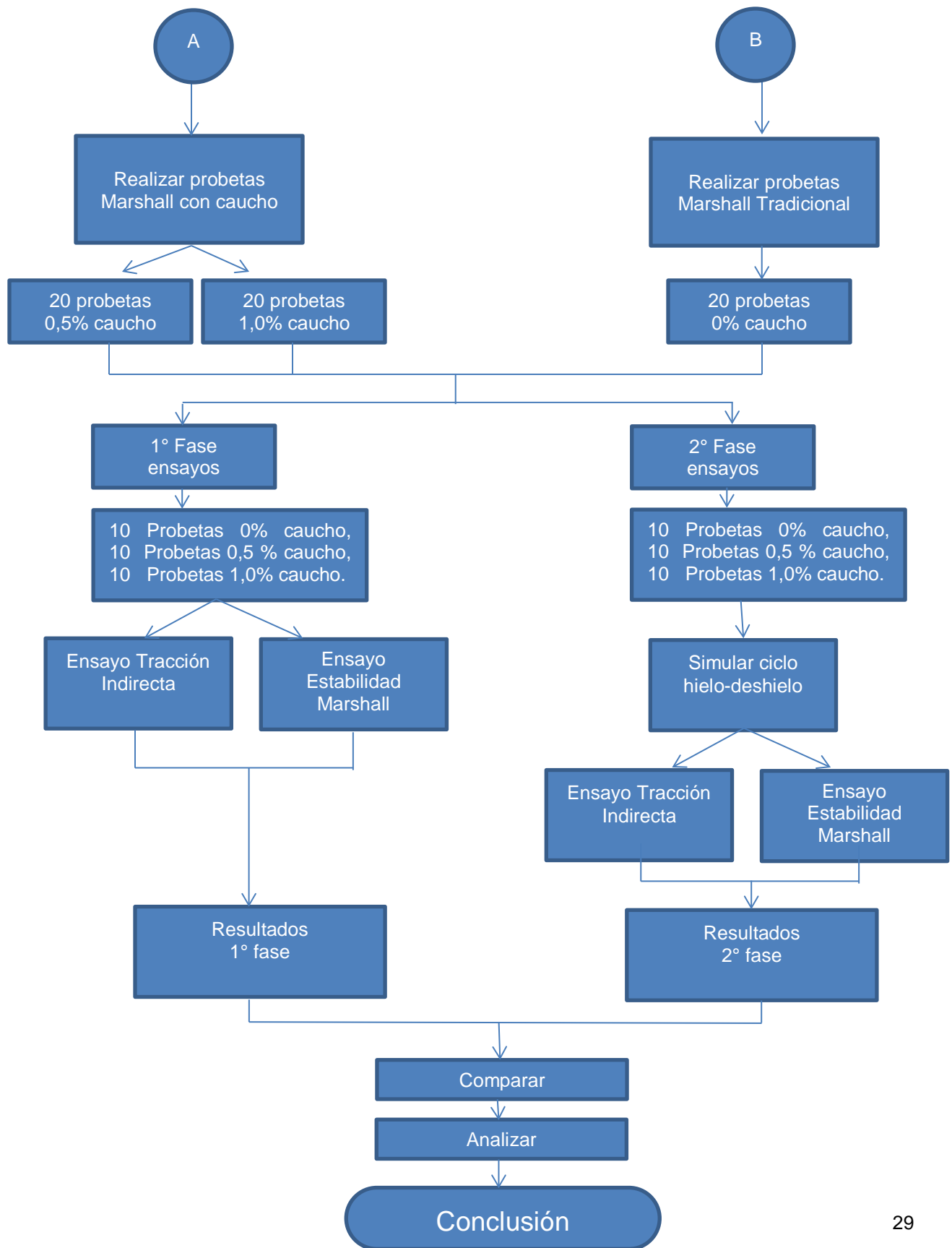


Figura 1-4: Diagrama de flujo de la metodología de la investigación (parte 2)

2. CAPÍTULO II: Marco teórico

2.1 Caucho

El caucho es una sustancia natural o sintética que se caracteriza por su elasticidad, repelencia al agua y resistencia eléctrica.

En estado natural, el caucho es un polímero constituido fundamentalmente por cis-1,4-poliisopreno, proveniente de un líquido lechoso de color blanco denominado látex, lo que queda ilustrado en la Figura 2-1 y Figura 2-2. El cual se obtiene de la corteza del árbol de Hevea, más conocido como árbol de caucho. Este tipo de árbol se encuentra en selvas húmedas tropicales como Brasil, Colombia y Tailandia. Otra planta productora de caucho es el árbol del hule, castilla elástica, originario de México [13].

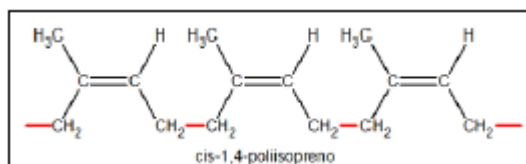


Figura 2-1: Nomenclatura del caucho natural.

Fuente: www.textoscientificos.com/caucho/diolefinas



Figura 2-2: Árbol de caucho.

Fuente: <http://www.staralfasa.com/caucho.html>

El látex es una dispersión acuosa, que contiene de 25% a un 40% de caucho. Para ser utilizado se requiere unir entre si las cadenas poliméricas del látex [13].

En cambio, el caucho sintético se obtiene por reacciones químicas, conocidas como condensación o polimerización, a partir de determinados hidrocarburos insaturados. Los compuestos básicos del caucho sintético llamados monómeros, tienen una masa molecular relativamente baja y forman moléculas gigantes denominadas polímeros [26].

Los principales tipos de caucho sintético son: neopreno, buna o caucho artificial, caucho de butilo y otros cauchos especiales.

2.2 Polvo de caucho

2.2.1 Neumático fuera de uso (NFU)

Los neumáticos generalmente son estructuras radiales en su mayoría. Están constituidos por una banda de rodadura elástica, una cintura prácticamente inextensible, una estructura de arcos radialmente orientados sobre una membrana inflada y acabando en unos aros inextensibles que sirven de fijación para las llantas de la rueda. [14]

Son estructuras muy complejas elaboradas con un total aproximado de doscientos componentes. El principal componente es el caucho, que es casi la mitad de su peso, y puede ser de dos tipos: natural o sintético. El caucho natural normalmente le proporciona elasticidad al neumático, mientras que el sintético lo que aporta es estabilidad térmica.

El caucho natural se obtiene a partir de un fluido lechoso de color blanco, conocido como látex, que corresponde a la savia de varias plantas específicas. La principal fuente comercial de látex son las euforbiáceas del género *Hevea*, que contienen entre un 30% a un 40% de caucho. Por otro lado, los cauchos producidos sintéticamente se obtienen por reacciones químicas, conocidas como polimerización, a partir de determinados hidrocarburos insaturados [23].

Ambos tipos de cauchos son polímeros elastoméricos. Esto es, un material con la propiedad mecánica de poder sufrir mucha más deformación elástica bajo tensión que la mayoría de los materiales y regresar a su tamaño previo sin deformación permanente [23].

Durante la fabricación del neumático, los cauchos se someten al proceso de vulcanización consistente en entrelazar las cadenas de polímeros con moléculas de azufre mediante la acción de altas presiones y temperaturas. Los enlaces así formados son muy estables lo que hace que el

proceso de desvulcanización sea difícil. Esta es la principal causa por la cual no es posible reciclar neumáticos desechados para la fabricación de neumáticos nuevos [23].

Otro componente de los neumáticos que entra en proporciones altas, es el negro de carbono, que sirve para mejorar la resistencia de los cauchos a la oxidación. El acero y material textil constituyen el tercer y cuarto componente en magnitud del neumático, con la misión de ser el esqueleto del mismo y soportar y transmitir las cargas y esfuerzos que se producen sobre él durante la circulación de los vehículos. El óxido de zinc, el azufre y otra serie de productos químicos, que actúan como catalizadores, plastificantes, adhesivos, etc., terminan de dar la composición al neumático como queda demostrado en la Figura 2-3 [23].

La clasificación de los neumáticos se hace generalmente según el tipo de vehículos que los utiliza. Se ha estimado que un 80% de los neumáticos desechados proceden de automóviles o camionetas (peso aproximado de 8kg), un 19% de vehículos pesados (peso aproximado de 65kg), y alrededor del 1% restante son neumáticos especiales para motocicletas, aviones, equipos de construcción u otros.

En un neumático, las proporciones de los componentes pueden variar en función del tipo de neumático y del fabricante, aunque generalmente se aproximan a las que se exponen en la Tabla 2-1 (porcentajes en peso). Es importante señalar que el mayor porcentaje de caucho se encuentra en la banda de rodado y el mayor porcentaje de acero, en el anillo interno del neumático que se sujeta a la llanta (talón) [23].

Tabla 2-1: Composición de los neumáticos en la Unión Europea.

Material	Vehículo Turismo (%)	Vehículo Pesado (%)
Caucho	48	45
Negro de carbono y sílice	22	22
Metal	15	25
Textil	5	-
Óxido de zinc	1	2
Azufre	1	1
Aditivos	8	5

Fuente: Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas.

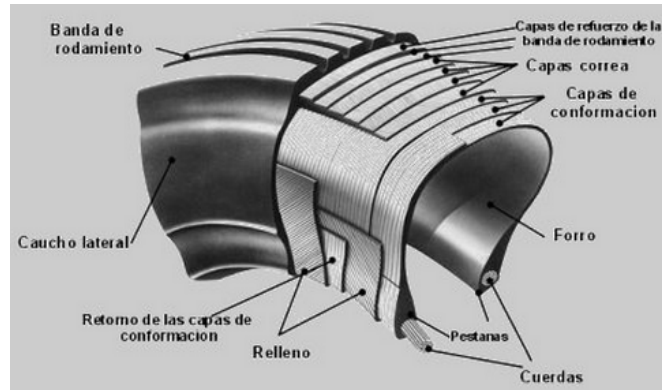


Figura 2-3: Principales componentes de un neumático.

Fuente: <http://www.sabelotodo.org/automovil/neumaticos.html>

2.2.2 Obtención del polvo de caucho

La utilización en mezclas asfálticas en caliente, precisa que el caucho reciclado esté en forma de polvo; un material constituido por partículas finas de caucho natural y sintético vulcanizado, de tamaños inferiores a 2.3mm, obtenido triturando los neumáticos fuera de uso hasta el tamaño deseado y separando los metales, tejidos (fibras textiles) y otras impurezas que puedan incorporar como se aprecia en la Figura 2-4[15].

Las técnicas más utilizadas, son la trituración mecánica a temperatura ambiente y la trituración criogénica ilustradas en la Figura 2-5, a baja temperatura, y se realizan en plantas de reciclaje de neumáticos desechados, especialmente diseñadas para este propósito [16],[17].



Figura 2-4: Resultados de la trituración de NFU.

Fuente: <http://www.cauchoperu.com/servicios/molidodecaucho.html>

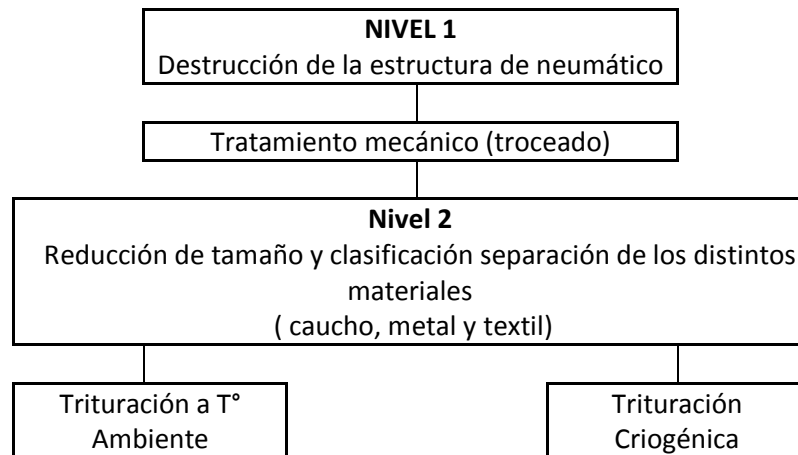


Figura 2-5: Etapas para la obtención del polvo de caucho.

2.2.2.1 Trituración ambiental

Éste es un proceso puramente mecánico, donde el material entra en un molino o granulador a temperatura ambiente, la cual aumenta considerablemente durante el proceso debido a la fricción generada al ser desgarrado [26].

Éste proceso se puede realizar de dos modos: por granulación y por molienda. Los granuladores reducen el tamaño del caucho mediante corte por la acción de cuchillas. El tamaño del producto es controlado por tamices ubicados dentro de la máquina, los cuales pueden ser cambiados para variar el tamaño del producto final. El caucho obtenido por el proceso ambiental se clasifica según el tamaño de las partículas: en neumáticos cortados, neumáticos triturados en astillas, caucho en polvo y caucho en migas [26].

En cambio, por molienda consiste en pasar el material por una serie de molinos (primarios, secundarios y finales), los cuales operan básicamente bajo el mismo principio, éstos usan dos rodillos grandes que van rotando, poseen dentaduras que van cortando el material, ubicadas en uno o ambos rodillos. La diferencia de los rodillos está en la configuración que se les da; éstos funcionan cara a cara, muy juntos y con distintas velocidades. El tamaño del producto es controlado por el espacio libre entre los rodillos. El caucho, por lo general, es pasado por 2 o 3 molinos para alcanzar varias reducciones de tamaño del grano, y así poder separarlo de los otros componentes que se encuentran en los neumáticos [26].

Los granos de caucho resultantes de este proceso son de forma irregulares, alargadas, angostas, de alta calidad y limpios de todo tipo de impurezas, facilitando la utilización de este material en nuevos procesos y aplicaciones.

La eficacia de la separación del acero, textiles y caucho, está en función del grado de molienda. Los fragmentos de acero son extraídos con un imán y las fibra textil por la aplicación de corrientes de aire de modo tal de dejar únicamente partículas de caucho [25].

Proceso de trituración ambiental resumido en la Figura 2-6.

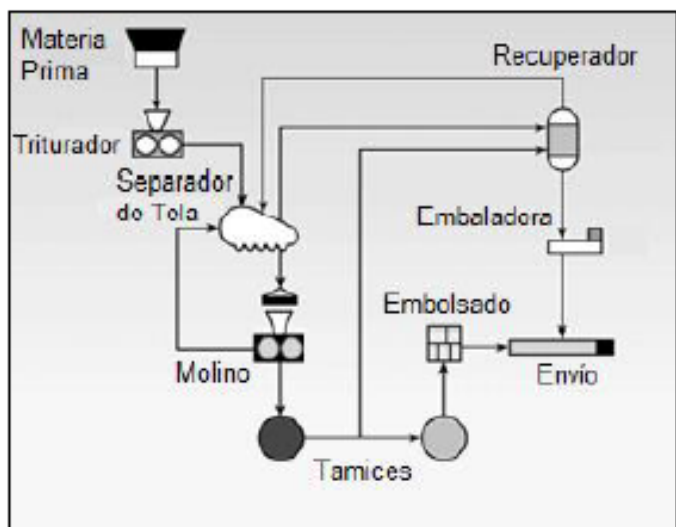


Figura 2-6: Proceso de trituración ambiental

Fuente: www.scraptirenews.com/crumb.php

2.2.2.2 Trituración criogénica

El proceso de trituración criogénica requiere el enfriamiento previo de los trozos de neumático a través del uso de nitrógeno líquido u otros métodos para congelarlos. A temperaturas por debajo de los 200°C bajo cero, el caucho pierde su elasticidad característica, volviéndose frágil y fácil de desintegrar. Luego, para reducir su tamaño y convertirlos en elementos más finos, los trozos congelados pasan por un molino de impacto [23].

Finalmente, el material obtenido se seca, se separa de la fibra textil (por aspiración) y el metal (mediante imanes) y se clasifica según tamaño como se resume en la Figura 2-7.

La forma de trituración de los NFU, determina la forma, textura y granulometría de las partículas de caucho y el contenido remanente de contaminantes metálico y textil, las cuales definen las propiedades del polvo de caucho obtenido, y por lo tanto, influyen en su reacción con el cemento asfáltico. En relación a este aspecto, cabe destacar que para las partículas con gran área superficial, como las conseguidas a través de la trituración ambiental, que tienen forma y textura irregular, la reacción con el ligante se produce en forma rápida, a diferencia de lo que ocurre con las partículas con baja área superficial obtenidas por la trituración criogénica, dado que al tener forma ovalada y superficies planas, disminuye el nivel de reacción con el asfalto [23].

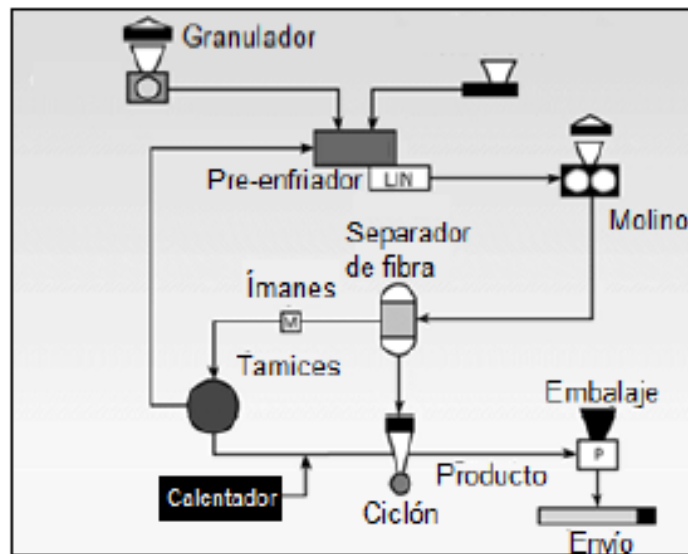


Figura 2-7: Proceso de trituración criogénica.

Fuente: www.scraptirenews.com/crumb.php

2.3 Mezclas asfálticas

La mezcla asfáltica es básicamente una combinación, en proporciones preestablecidas, de agregados pétreos de diferentes granulometrías, un material asfáltico y, eventualmente, aditivos, donde todas las partículas de agregado están recubiertas con una película continua y homogénea de cemento asfáltico.

La mezcla asfáltica para pavimentación es sometida a un proceso de compactación, que le permite a los materiales constituyentes trabajar como un conjunto, en el cual el material asfáltico actúa como un agente ligante que aglutina las partículas de agregado en una masa cohesiva y poco permeable, y el agregado mineral ligado, actúa como un esqueleto pétreo, que aporta resistencia y rigidez al sistema [23].

Existen diversos tipos de mezclas asfálticas que, según su temperatura de fabricación, pueden clasificarse principalmente en mezclas en caliente (confeccionadas a temperaturas sobre los 100°C) o en frío (confeccionadas a temperatura ambiente o ligeramente superior), siendo más usadas y con mayor resistencia las primeras. A este tipo de mezclas se enfoca el presente estudio [23].

2.3.1 Mezclas asfálticas en caliente

Para confeccionar una óptima mezcla asfáltica en caliente, el cemento asfáltico y los agregados pétreos se deben llevar a temperaturas elevadas, generalmente en el rango de los 150°C, con el objetivo de obtener una adecuada viscosidad en el ligante (estado de fluidez) que asegure la trabajabilidad necesaria para mezclar y compactar la mezcla. La viscosidad de una mezcla asfáltica a una temperatura específica depende exclusivamente del tipo de asfalto a emplear.

El proceso de fabricación de una mezcla asfáltica en caliente se realiza en una “planta asfáltica”, que es una instalación compuesta por un conjunto de equipos, en los cuales los agregados se dosifican, combinan, calientan, secan y mezclan con el asfalto, para producir la mezcla con las proporciones deseadas y que cumpla con todas las especificaciones técnicas de proyecto, de acuerdo a su uso en el pavimento, como capa base, intermedia o de rodadura. Las mezclas asfálticas se transportan al lugar de pavimentación en camiones tolva, los cuales deben disponer de cubiertas de protección para minimizar las pérdidas de temperatura durante el transporte, ilustrada en la Figura 2-8.

Antes de iniciar las faenas de colocación en terreno, se debe preparar la superficie a pavimentar con el objetivo principal de producir una membrana ligante que adhiera fuertemente la superficie con la capa asfáltica que la cubrirá. Si se coloca la capa asfáltica sobre un pavimento asfáltico antiguo debe colocarse un riego de liga, y si se coloca sobre una base granular, debe colocarse un riego de imprimación.



Figura 2-8: Planta Asfáltica, proceso de fabricación de una mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: <http://www.ciber.com.br>

La pavimentación consiste en distribuir y compactar la mezcla asfáltica en caliente que ha sido producida en Planta (en el espesor proyectado). La compactación debe comenzar tan pronto como sea posible después que el material ha sido distribuido por la pavimentadora o *finisher*. Con este proceso se logra aumentar la resistencia y estabilidad de la mezcla asfáltica, disminuyendo el volumen de huecos y aumentando la densidad, y se obtiene una superficie suave y bien consolidada, resistente al desgaste producto del paso de los vehículos.

Los compactadores típicos utilizados son: rodillo liso (dos rodillos de acero montados sobre ejes tándem), rodillo vibratorio (dos rodillos de acero en tándem) y rodillo neumático (dos ejes tándem con 3 a 4 ruedas de caucho en el eje delantero y 4 a 5 en el eje trasero). La cantidad, peso y tipo de rodillos que se empleen deberá ser el adecuado para alcanzar la compactación requerida dentro del lapso de tiempo durante el cual la mezcla asfáltica es trabajable. La compactación debe continuar hasta eliminar toda marca de rodillo y alcanzar la densidad especificada, control que se

realiza en obra con un equipo denominado densímetro nuclear. Con la mezcla ya fría, se puede dar la apertura al tránsito [23].

2.3.1.1 Áridos

Los áridos que componen una mezcla asfáltica (alrededor del 95% de su peso), también denominados agregados pétreos, se clasifica en árido grueso, fino y polvo mineral o *filler*.

Según el Manual de Carreteras, se denomina agregado grueso a la porción del árido retenida en el tamiz ASTM N° 8 (abertura de 2,5mm) y agregado fino, a la porción que pasa dicho tamiz. Por su parte, el filler está constituido por polvo mineral fino, tal como cemento hidráulico, cal u otro material inerte, libre de materia orgánica y partículas de arcilla, cuyo tamaño máximo absoluto es 0,63mm, y que pasa por el tamiz ASTM N° 200 (0,08mm) en más del 70% en peso.

Para la confección de una mezcla asfáltica, los agregados deben ser limpios, tenaces y durables y, lo más importante, deben tener una granulometría correcta, de acuerdo al uso de la mezcla en el pavimento, como capa base, intermedia o de rodadura. Para esto, se le exige a la mezcla de áridos quedar comprendida en alguna de las bandas granulométricas especificadas en las Tablas 5.408.201.E a 5.408.201H del numeral 5.408.201 del Volumen N° 5 del Manual de Carreteras.

Se distinguen granulometrías continuas o bien graduadas, donde el agregado fino llena los huecos entre el agregado más grueso, y granulometrías discontinuas. Los distintos tipos de mezclas se clasifican según el contenido de finos (bajo tamiz N°8) en:

- Fina: % finos = 50-65%
- Densa: % finos = 35-50%
- Semidensa: % finos = 28-42%
- Gruesa: % finos = 20-35%
- Abierta: % finos = 5-20%

Se requiere además que los áridos posean un porcentaje considerable de material chancado (dos o más caras fracturadas) con superficie áspera, para proveer a la mezcla asfáltica de un esqueleto mineral con una trabazón interna muy fuerte, que resista las cargas de tránsito que la solicitan (sin desplazamiento de la mezcla), y limitar también el contenido de pétreos que puedan presentar gran desgaste (pulimiento) o romperse (partículas lajeadas), y con eso variar la granulometría, durante el proceso de compactación, o por el mismo tránsito. Para tal efecto, se le exige a la mezcla de

áridos cumplir los requisitos especificados en el numeral 5.408.201 del Volumen N° 5 del Manual de Carreteras.

2.3.1.2 Cemento asfáltico tradicional

El asfalto puede encontrarse de forma natural (como rocas y lagos de asfalto), u obtenerse por la refinación del petróleo extraído de pozos. Básicamente el empleado en pavimentación se obtiene a partir del pitch asfáltico, que es el producto residual del proceso de destilación y refinación de los constituyentes del petróleo [23].

El cemento asfalto convencional es un material semi-sólido, viscoso, pegajoso y de color negro, usado como aglomerante en mezclas asfálticas para la construcción de carreteras, autovías o autopistas.

2.3.1.2.1 Propiedades químicas

El asfalto está compuesto primordialmente por moléculas complejas de hidrocarburos, aunque también contiene átomos de oxígeno, nitrógeno, azufre, sulfuro y otros elementos.

En condiciones normales, los hidrocarburos forman una solución coloidal de dos fases, en la que los hidrocarburos más pesados, denominados asfaltenos, están dispersos en las moléculas de hidrocarburos más ligeros, denominados maltenos. Los asfaltenos por su color negro y similitud con el polvo grueso de grafito, le proporcionan su color y dureza al asfalto. Los maltenos son líquidos viscosos y pegajosos compuestos de resinas y aceites que le proporcionan las propiedades aglutinantes al asfalto (su valor cohesivo).

La proporción de asfaltenos y maltenos en un ligante varía normalmente debido al proceso de envejecimiento o endurecimiento que sufre el asfalto en el tiempo. El envejecimiento produce cambios considerables en sus propiedades, que lo transforman en un material más rígido y con menor poder aglomerante. El envejecimiento del asfalto se produce por variadas y complejas reacciones de oxidación, volatilización y polimerización, principalmente, cuando este está expuesto a agentes ambientales como las altas temperaturas y el oxígeno.

Durante la vida del asfalto, se pueden distinguir dos importantes procesos de envejecimiento, el primero el envejecimiento primario o de corto plazo, que se produce desde la fabricación de la mezcla en planta, hasta el proceso de compactación. Se debe principalmente a las altas temperaturas a las que se somete el asfalto durante los trabajos de construcción de los concretos

asfálticos. La volatilización es su causa principal (evaporación de los constituyentes más livianos del asfalto).

Y el segundo es el envejecimiento secundario o de largo plazo que sufre el asfalto durante la vida de servicio del pavimento. La oxidación es su causa principal (reacción del asfalto con el oxígeno) [23].

2.3.1.2.2 Propiedades físicas

El asfalto es un material aglomerante, resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero; capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo acción de calor o cargas permanentes. Componente natural de la mayor parte de los petróleos, en los que existe en disolución y que se obtiene como residuo de la destilación al vacío del crudo pesado. Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se le combina usualmente, en otras palabras, es un material altamente adherente a las partículas del agregado y entrega una cohesión a los materiales granulares. Su color varía entre el café oscuro y el negro; de consistencia sólida, semisólida o líquida, dependiendo de la temperatura a la que se exponga o por la acción de disolventes de volatilidad variable o por emulsificación.

Las propiedades físicas del asfalto de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de caminos son:

a. Durabilidad: Es la capacidad del asfalto de mantener sus características originales cuando se expone a procesos normales de envejecimiento y degradación.

b. Adhesión: Es la capacidad del asfalto para quedar fijo al agregado en la mezcla, incluso en presencia de agua, tránsito y cambios bruscos de temperatura.

c. Cohesión: Es la capacidad del asfalto de mantener unidas y firmes en su posición a las partículas de agregado en la mezcla compactada.

d. Susceptibilidad térmica: Indica la sensibilidad de la consistencia del asfalto a los cambios de temperatura.

e. Susceptibilidad a la duración de la carga: La viscosidad del asfalto depende también de la duración de los esfuerzos a los que está sometido, de manera similar a lo que sucede con la temperatura. En efecto, a altas temperaturas (clima desértico o verano) y/o cargas estáticas o

lentas (camiones moviéndose lento, intersecciones, etc.), el asfalto se comporta como un fluido viscoso que fluye rápidamente y cuya deformación no es recuperable (pavimento propenso a sufrir ahuellamiento). Por el contrario, a bajas temperaturas (climas fríos o invierno) y/o cargas rápidas (camiones moviéndose rápido), el asfalto se comporta como un sólido elástico cuya deformación es baja y recuperable (pavimento muy rígidos pueden ser susceptible al agrietamiento). Esta condición viscoelástica (semisólida) le concede a los asfaltos su capacidad de resistir altos esfuerzos instantáneos y solo fluir bajo la acción de cargas permanentes.

A nivel nacional, se utilizan casi exclusivamente los cementos asfálticos tradicionales del tipo CA 14 y CA 24, clasificados según grado de viscosidad absoluta (deben cumplir la especificación descrita en la Tabla 8.301.1a del Volumen N° 8 del Manual de Carreteras) [23].

2.3.1.3 Cemento asfáltico con polímeros

Se han logrado avances significativos al tratar el cemento asfáltico original con otras sustancias que permiten mejorar su comportamiento cuando es sometido a condiciones más exigentes, por ejemplo, climas extremos, tránsito de vehículos muy pesados, ambientes agresivos, solicitaciones concentradas en áreas específicas, etc.

La modificación del asfalto consiste en la adición de polímeros a los asfaltos tradicionales con el fin de mejorar sus características reológicas. Estos modificadores se incorporan en el proceso de fabricación del cemento asfáltico. Los polímeros comúnmente usados son los elastómeros, dentro de los que destacan el *SBS (Estireno-Butadieno-Estireno)*, *SBR (Estireno-Butadieno-Rubber)* y el *SB (Estireno-Butadieno)*. El caucho de neumático es un material elastomérico también usado como modificador, cuyo uso es relativamente reciente.

La modificación de la reología del asfalto otorga las siguientes ventajas, frente a los asfaltos tradicionales [25]:

- Aumento de la resistencia a la deformación permanente y a la rotura, en un rango más amplio de temperaturas, tensiones y tiempos de carga.
- Disminución de la susceptibilidad térmica, esto es, disminución de la fragilidad en tiempo frío (menos fisuramientos por efecto térmico a bajas temperaturas y fatiga por esfuerzos de tensión) y aumento de la cohesión en tiempo cálido (ligantes más viscosos aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación permanentes).
- Disminución de la susceptibilidad a los tiempos de aplicación de la carga.

- Mejora notable de la adhesividad de los áridos.
- Por otra parte, la reacción química asegura una alta estabilidad del producto, presentando una elevada inercia a agentes externos tales como sal, agua, radiación solar y al desgaste en el tiempo, por lo cual su vida útil aumenta.

2.4 Mezclas asfálticas en caliente con incorporación de polvo de caucho (NFU)

Es una mezcla asfáltica en caliente modificada con polvo de caucho obtenido de neumáticos en desuso. El polvo de caucho está constituido fundamentalmente por partículas finas de caucho natural y sintético vulcanizado de tamaño inferiores a 2,30 mm; el cual resulta de la trituración de los neumáticos fuera de uso (NFU) y la separación de metales, tejidos y otras impurezas que pueda componer el neumático.[25]

La incorporación de polvo de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso (NFU) a una mezcla asfáltica convencional mejora sus prestaciones como material para carreteras, ya que el caucho vulcanizado al ser un polímero, modifica las propiedades reológicas del ligante de una manera similar, pero en menor grado, que las mezclas con asfalto modificado con polímeros nuevos.

2.4.1 Técnica de incorporación de mezcla asfáltica

La incorporación de polvo de caucho proveniente de NFU a una mezcla asfáltica, se puede hacer de dos maneras, denominadas vía húmeda y vía seca. Ambos procedimientos se diferencian, además de la forma de ejecución, en el contenido de polvo de caucho que se utiliza para preparar la mezcla asfáltica. La denominación de los productos resultantes de ambos procesos de incorporación, se muestra en la Tabla 2-3.[23]

Tabla 2-2: Terminología asociada al uso de polvo de caucho en mezclas asfálticas.

Proceso	Producto	% de incorporación de polvo de caucho
Vía Húmeda	Asfalto modificado con polvo de caucho o Asfalto-Caucho	5-26% respecto al peso del cemento asfáltico
Vía Seca	Mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho	0,5-1,0% respecto al peso del árido

2.4.1.1 Proceso Vía Húmeda

Los betunes con caucho procedentes de NFU para mejorar sus propiedades se conocen desde 1840 según M.A Heitzaman [17].

Consiste en el mezclado previo del polvo de caucho con el cemento asfáltico en un estanque con agitación a alta temperatura, para su posterior empleo como ligante en la mezcla asfáltica en caliente. En esta forma, el polvo de caucho actúa como un polímero modificador del cemento asfáltico y el producto obtenido, denominado comúnmente asfalto-caucho, es usado de la misma manera que un cemento asfáltico modificado convencional.

El procedimiento de fabricación por vía húmeda, puede ser realizado de dos maneras: En el primer caso, denominado proceso en refinería, el asfalto-caucho se elabora en la planta productora de asfalto (asfaltera), desde donde es transportado a la planta asfáltica para ser combinado con los áridos y producir la mezcla asfáltica. En el segundo caso, denominado "en terreno", la modificación del asfalto se realiza en la misma planta asfáltica, para luego ser incorporado a los áridos en el proceso de mezclado como se muestra en la Figura 2-9.

En general, la mezcla de asfalto con polvo de caucho es muy viscosa, lo que dificulta su manipulación de manera estable (sin segregaciones). Para que el asfalto-caucho mantenga su consistencia uniforme, la mezcla debe estar en continua agitación y a alta temperatura, especialmente al ser almacenado y transportado. Esto también permite que se pueda descargar (trasegar) y bombear sin dificultades.[23]

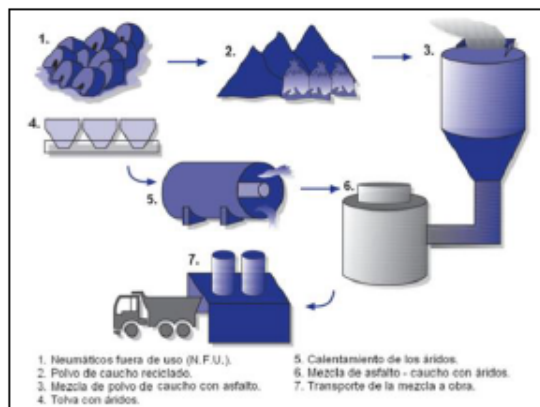


Figura 2-9: Proceso por Vía Húmeda

Fuente: Libro "Curso Laboratorista Vial, Volumen IV, Ligantes asfálticos y sellos de juntas"

2.4.1.2 Proceso Vía Seca

El procedimiento de fabricación de la mezcla asfáltica modificada por vía seca consiste en introducir el polvo de caucho directamente en el mezclador de la planta asfáltica, como un componente más de la mezcla, sin embargo, se requiere mezclar primero éste con el árido para lograr su total reparto y aumentar así su temperatura, antes de añadir el cemento asfáltico [23].

Las primeras experiencias sobre adición de trozos de caucho a una mezcla asfáltica, directamente en el mezclador de la central de fabricación, como si se tratase de una fracción más de árido, proceden de Suecia [16],[20].

En este proceso, el polvo de caucho actúa en parte como árido, pero sus partículas más finas interactúan con el cemento asfáltico modificando sus propiedades y consiguiendo así mejorar el comportamiento de la mezcla asfáltica. Por eso, luego de mezclar el ligante con los agregados más el caucho, se le debe dar el tiempo a esta mezcla para que suceda el proceso de digestión. Este tiempo en obra, la mayoría de las veces está garantizado con el tiempo que demora el camión entre la planta asfáltica al lugar de colocación del concreto asfáltico en terreno, ilustrado en la Figura 2-10 [23].

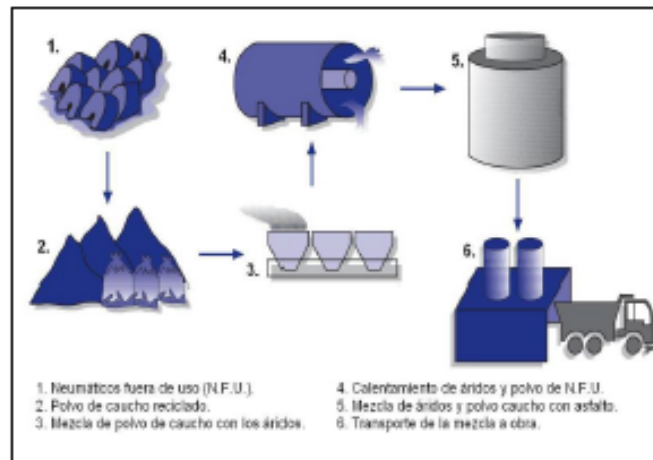


Figura 2-10: Proceso por Vía Seca

Fuente: Libro "Curso Laboratorista Vial, Volumen IV, Ligantes asfálticos y sellos de juntas"

2.4.1.2.1 Modificación de la mezcla asfáltica por vía seca:

En el método por vía seca, el polvo de caucho incorporado funciona como un sistema de dos componentes dentro de la mezcla asfáltica, en el que las partículas más finas (principalmente las que pasan por el tamiz 0,5mm) interaccionan con el asfalto a elevada temperatura y modifican su reología mediante un proceso similar al de vía húmeda, y por otro lado, las partículas más gruesas, como su área específica es reducida y el periodo de interacción con el asfalto es limitado, la digestión con el ligante se desarrolla solo superficialmente, ya que no hay tiempo suficiente para que la digestión se desarrolle en toda su masa. De esta manera, las partículas gruesas de caucho se comportan como un árido elastomérico dentro del esqueleto pétreo y se crea una interfase asfalto/caucho que cohesiona ambos materiales [23].

De igual manera que en el proceso por vía húmeda, la calidad de la mezcla asfáltica resultante depende del proceso de digestión que prolifera desde la superficie de la partícula de caucho hacia su interior, y que será más rápida y efectiva mientras más fino sea el polvo de caucho, menor su proporción dentro de la mezcla asfáltica, y cuanto más elevada sea la temperatura de la mezcla y el tiempo que se mantenga ésta caliente durante el proceso de fabricación y puesta en obra.

Por ello es preciso, durante el diseño de la mezcla asfáltica modificada por vía seca, estimar cuales serán la temperatura y el tiempo de digestión mínimos para alcanzar el grado de digestión suficiente. Esto se puede hacer a través de ensayos en laboratorio (limitando la resistencia al efecto del agua). El tiempo de curado de la mezcla es fundamental, ya que en caso de no realizarlo correctamente, no solo no se provoca la modificación del ligante, sino que se obtiene una mezcla de peores propiedades que una tradicional (se incrementan significativamente el contenido de vacíos de aire y el contenido de vacíos en los agregados) [23].

2.4.1.2.2 Aplicaciones de mezclas asfálticas modificadas por vía seca

El proceso de fabricación de la mezcla modificada con polvo de caucho por vía seca, fue desarrollado por una compañía sueca a finales de los años 60. Originalmente se diseñó como un sistema antihielo, en que se utilizaban principalmente partículas de caucho con tamaños relativamente gruesos para que se comportarán como áridos elásticos y se deforman en la superficie del pavimento por las sollicitaciones producidas por los vehículos, provocando la rotura del hielo cuando se comenzaba a formar [23].

La experiencia internacional se refiere principalmente al uso de estas mezclas asfálticas modificadas básicamente en capas de rodadura y, en menor medida, en capas intermedias. El proceso más habitual de incorporación es con polvo de caucho de tamaño máximo menor a 1mm y en proporciones inferiores a 1.0% respecto al peso total de los agregados de la mezcla [23].

Esta es una dosificación que reduce considerablemente los tiempos de espera entre la fabricación y la extensión y no obliga a prolongar excesivamente la compactación, proceso que también consume un tiempo que debe entenderse como de digestión del caucho, puesto que la mezcla permanece a más de 120°C (límite inferior del rango de temperaturas a las que se desarrolla la digestión, según bibliografía extranjera) [23].

2.4.1.2.3 Tecnologías para el uso de caucho reciclado mediante vía seca

Las tecnologías más usadas en Estados Unidos para el uso de caucho reciclado mediante este proceso son la tecnología PlusRide y la tecnología Genérica o sistema TAK. Otra tecnología muy popular es la conocida "granulometría convencional", la cual fue desarrollada en España y es actualmente usada en muchos países. [26]

- PlusRide: Esta tecnología fue originalmente desarrollada en Suecia a finales de los años 1960, y registrada en los Estados Unidos bajo el nombre comercial PlusRide por la firma EnviroTire. El caucho reciclado es agregado a la mezcla en proporciones que van de 1 a 3 por ciento del peso total de los agregados. Los granos de caucho utilizados son gruesos para sustituir algunos agregados de la mezcla. Las partículas de caucho van desde 4,2 mm (1/4") a 2,0 mm (tamiz N°10). El contenido de vacíos con aire en la mezcla asfáltica debe estar entre 2 y 4 por ciento, y por lo general son obtenidos con contenidos de ligante entre 7,5 a 9 por ciento [26].

- Genérica: Este sistema fue desarrollado por el Dr. Barry Takallou a finales de los años 1980 y a principio de los años 1990, para producir mezclas asfálticas en calientes con granulometría densa. Este concepto emplea tanto el caucho reciclado grueso como fino para compatibilizar la granulometría de los agregados obteniendo una mezcla asfáltica mejorada. En este proceso, la granulometría del caucho es ajustada para acomodar la granulometría de los agregados. A diferencia de las mezclas PlusRide, la granulometría del caucho se divide en dos fracciones en la que la parte fina se encarga de interactuar con el cemento asfáltico mientras la parte gruesa entra a comportarse como un agregado elástico en la mezclas asfáltica [26].

El caucho puede llegar a necesitar una pre-reacción o pre-tratamiento con un catalizador para alcanzar una óptima hinchazón de la partícula. En este sistema, el contenido de caucho reciclado no debe exceder el 2 por ciento del peso total de la mezcla para carpeta de rodadura.

- Convencional: Esta tecnología fue desarrollada en España para usar el caucho reciclado en la mejora de mezclas asfálticas empleando granulometrías convencionales que no implican consumos elevados de cemento asfáltico, pero que aportan menor cantidad de caucho, aproximadamente un dos por ciento del peso total de los agregados. El caucho utilizado es generalmente de granulometría fina, con tamaños de los granos no mayor a 0,5 mm. Estas mezclas asfálticas han sido evaluadas dinámicamente en el laboratorio y colocadas en la vía con buenos resultados [26].

Por último, en la Tabla 2-4 se resumen las diferencias significativas entre los procesos de mezclado del polvo de caucho por vía seca y húmeda.

Tabla 2-3: Diferencias entre los procesos de mezclado Seco y Húmedo

Características	Proceso	
	Seco	Húmedo
Tamaño de las partículas de caucho	0,63 a 9,5 mm 0,15 a 1,18 mm	0,85 a 15 mm
Cantidad de caucho utilizado	< 3% de la mezcla total	< 1,5% de la mezcla total
Equipos	No necesita equipos especiales	Necesita estanque para realizar la digestión
Costos	Costos iniciales menores	Costos iniciales mayores

Fuente: Memoria para optar al título de Ingeniero Constructor de Paulina Alejandra Delarze Díaz.

2.4.2 Ventajas Técnicas

La adición de polvo de caucho a un asfalto (vía húmeda) o a una mezcla asfáltica (vía seca) tiene dos efectos principales:

- a. El polvo de caucho actúa como espesante, aumentando la viscosidad del ligante. En las mezclas asfálticas esto permite envolver los áridos con películas más gruesas de asfalto sin que se produzcan escurrimientos o exudaciones.
- b. La adición de polvo de caucho modifica la reología de los asfalto, de manera que aumentan su elasticidad y resiliencia a temperaturas elevadas y disminuye la susceptibilidad térmica.

El efecto conjunto de estas modificaciones permite conseguir las siguientes ventajas técnicas en las mezclas asfálticas, con la consecuente reducción de costos de mantenimiento y de interrupción del tráfico por reparaciones en el pavimento [21]:

- Mayor resistencia a la deformación plástica acumulada (ahuellamiento) que las mezclas que utilizan cemento asfáltico tradicional, por su elevada viscosidad y resiliencia (ligante más elástico y viscoso a las temperaturas altas de servicio).
- Menor susceptibilidad térmica que las mezclas asfálticas fabricadas con cemento asfáltico tradicional.
- Mayor resistencia al agrietamiento, tanto por fatiga como por reflexión de grietas de las capas inferiores, que las mezclas fabricadas con cemento asfáltico tradicional, debido a los mayores contenidos de ligante que permiten estas técnicas.
- Mayor resistencia al envejecimiento y a la oxidación que las mezclas convencionales, por el potencial de utilizar mayores dotaciones de ligante y por la presencia de los antioxidantes del caucho de neumáticos.
- Otra ventaja adicional, desde la óptica de la seguridad vial, es que mantienen durante más tiempo el contraste con las marcas viales debido a que permiten introducir más asfalto y dura más el color negro de la superficie.

En la modificación de las mezclas asfálticas con polvo de caucho por vía seca se pueden conseguir ventajas semejantes, aunque en menor grado, que con los asfaltos modificados con polvo de caucho por vía húmeda. No obstante, las mezclas fabricadas por vía seca necesitan procedimientos específicos de fabricación y condiciones controladas de ejecución, por lo que

precisan empresas adiestradas y de un control de calidad riguroso. Su interés radica en las siguientes ventajas adicionales [21]:

- Se obtienen mezclas asfálticas más baratas que con los asfaltos modificados por vía húmeda.
- La tecnología se hace accesible a las empresas fabricantes de mezclas asfálticas y no sólo a las que fabrican asfaltos modificados. No requiere de un equipo especial de mezclado, solo un sistema de alimentación que proporcione la cantidad adecuada de caucho y que sea suministrada en el momento indicado (como un *filler* de aportación), antes que el ligante sea adicionado.

2.4.3 Ventajas Ambientales

Las principales ventajas ambientales que se derivan del empleo de polvo de neumático en los materiales asfálticos por vía húmeda o vía seca son las siguientes [23]:

- Se reciclan y reduce el volumen de neumáticos fuera de uso depositados en vertederos y en lugares desconocidos o no autorizados. El empleo de residuos permite a su vez ahorros en recursos naturales. En la técnica de las mezclas fabricadas por vía húmeda con porcentajes altos de incorporación de polvo de caucho (del orden del 20% respecto al peso del asfalto), se estima un aprovechamiento de 350 neumáticos de turismo por kilómetro de pista y por cada centímetro de espesor de mezcla asfáltica. Esta cifra es del orden de 75 a 150 en las otras técnicas, por vía húmeda o vía seca, con menores porcentajes de incorporación (entre 5 y 15% respecto al peso del asfalto).

2.4.4 Desventajas

- El incremento de la viscosidad genera un aumento en la temperatura de fabricación en planta y extensión en obra de la mezcla asfáltica modificada lo que genera una mayor dificultad y complejidad a la hora de construirla.
- Se realiza a temperaturas elevadas lo que genera la necesidad de mayor energía para la fabricación de la mezcla [23].

2.4.5 Propiedades físicas y químicas del polvo de caucho

Para que las mezclas asfálticas en caliente fabricadas por vía húmeda o seca tengan unas características adecuadas, se le debe exigir al polvo de caucho obtenido de la trituración de neumáticos fuera de uso, cumplir ciertas propiedades químicas y físicas. A nivel nacional, estas propiedades se encuentran especificadas en la Norma NCh 3258-2012 "Mezcla asfáltica- Polvo de caucho proveniente de los neumáticos fuera de uso- Requisitos".

Las especificaciones sobre composición química tienen como función principal asegurar que el material proviene del reciclado de neumáticos fuera de uso. La normativa nacional exige que las cenizas no sobrepasen límites específicos. Por otro lado, las propiedades físicas que se especifican son las siguientes:

- La granulometría del polvo de caucho, que debe estar comprendida dentro de alguna de las bandas granulométricas indicadas en la Tabla 2-5. El tamaño máximo y la granulometría de las partículas son los parámetros que tienen gran influencia en el comportamiento de la mezcla.
- La densidad relativa de las partículas de caucho, determinada según UNE 53526, que debe estar comprendida en el intervalo $1,15 \pm 0,05$. Esta propiedad permite identificar el caucho de neumáticos frente a otros tipos.
- El contenido de agua, que debe ser menor que 0,75%. Su determinación se tiene que realizar de acuerdo a la Norma NCh 1515, excepto en lo relativo a la temperatura de calentamiento en la estufa, que debe ser de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Se limita la humedad, porque puede producir espumas durante la fabricación.
- El contenido en contaminantes, como metales, impurezas y textiles, que se limita para evitar deterioros en los equipos de manejo y pérdidas de características en los productos fabricados (mezclas). Estas limitaciones son:
 - El contenido de materiales ferromagnéticos no debe ser mayor que 0,01% en peso del polvo de caucho.
 - El contenido de materiales textiles no debe ser mayor que 0,5% en peso del polvo de caucho.
 - El contenido de cualquier otro tipo de impurezas, tales como arena, madera, vidrio no debe ser mayor que 0,25% en peso del polvo de caucho.

Tabla 2-4: Banda granulométricas especificadas para el polvo de caucho.

Tamiz mm	P-1	P-2	P-3
2,30	100	-	-
1,25	60 - 100	100	-
0,63	30 - 80	40 - 100	100
0,315	15 - 60	10 - 70	30 - 60
0,160	0 - 40	2 - 40	0 - 30
0,080	0 - 20	0 - 20	0 - 18

Fuente: Norma NCh 3258-2012.

2.5 Ciclos hielo-deshielo

2.5.1 Temperatura

La temperatura es una magnitud referida a las nociones comunes de caliente, tibio o frío que puede ser medida con un termómetro. En física, se define como una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, definida por el “principio cero” de la termodinámica. De manera más específica, está relacionada directamente con la parte de la energía interna conocida como energía cinética, que es la energía asociada a los movimientos de las partículas del sistema, sea en un sentido traslacional, rotacional, o en forma de vibraciones. A medida de que sea mayor la energía cinética de un sistema, se observa que éste se encuentra más caliente, es decir, que su temperatura es mayor [24].

En el caso de un sólido, los movimientos en cuestión resultan ser las vibraciones de las partículas en sus sitios dentro del sólido. En el caso de un gas ideal monoatómico se trata de los movimientos traslacionales de sus partículas (para los gases multiatómicos los movimientos rotacional y vibracional deben tomarse en cuenta también) [24].

El desarrollo de técnicas para la medición de la temperatura ha pasado por un largo proceso histórico, ya que es necesario darle un valor numérico a una idea intuitiva como es lo frío o lo caliente.

Multitud de propiedades fisicoquímicas de los materiales o las sustancias varían en función de la temperatura a la que se encuentren, como por ejemplo su estado (sólido, líquido, gaseoso y

plasma), su volumen, la solubilidad, la presión de vapor, su color o la conductividad eléctrica. Así mismo es uno de los factores que influyen en la velocidad a la que tienen lugar las reacciones químicas [24].

La temperatura es una propiedad física que se refiere a las nociones comunes de calor o ausencia de calor, sin embargo su significado formal en termodinámica es más complejo. Termodinámicamente se habla de la velocidad promedio o la energía cinética (movimiento) de las partículas de las moléculas, siendo de esta manera, a temperaturas altas, la velocidad de las partículas es alta, en el cero absoluto (0 K) las partículas no tienen movimiento. A menudo el calor o el frío percibido por las personas tiene más que ver con la sensación térmica, que con la temperatura real. Fundamentalmente, la temperatura es una propiedad que poseen los sistemas físicos a nivel macroscópico, la cual tiene una causa a nivel microscópico, que es la energía promedio por la partícula. Y actualmente, al contrario de otras cantidades termodinámicas como el calor o la entropía, cuyas definiciones microscópicas son válidas muy lejos del equilibrio térmico, la temperatura solo puede ser medida en el equilibrio, precisamente porque se define como un promedio [24].

La temperatura está íntimamente relacionada con la energía interna y con la entalpía de un sistema: a mayor temperatura, mayor será la energía interna y la entalpía del sistema.

La temperatura es una propiedad intensiva, es decir, que no depende del tamaño del sistema, sino que es una propiedad que le es inherente y no depende ni de la cantidad de sustancia ni del material del que este compuesto.[24]

2.5.2 Cambios de temperatura

Un material puede presentar deformaciones, si la temperatura de éste cambia. Cuando la temperatura de un pavimento asfáltico varía, se produce un cambio de sus dimensiones (dilata o contrae), y a menudo deforma, lo anterior se conoce dilatación térmica. Cuando se recupera la temperatura inicial, se recuperan las dimensiones y la forma, y por tanto, el fenómeno es reversible. Cuando un material se calienta, se expande, si la expansión no es restringida, las dimensiones del material incrementan, pero no se genera ningún esfuerzo. Pero si se restringe la deformación en el material, se impedirá que sus dimensiones cambien, por lo que se presentará esfuerzos en la misma.

En algunas regiones los elementos de puentes y otros componentes estructurales se ven expuestos a temperaturas que oscilan desde -34°C hasta 43°C . Los vehículos y la maquinaria que operan a la intemperie experimentan variaciones de temperaturas similares. Con frecuencia, una pieza de una máquina comienza a operar a temperatura ambiente y luego se calienta demasiado durante el funcionamiento de la máquina. Algunos ejemplos son piezas de motores, hornos, máquinas cortadoras de metal, trenes de laminación, etc [24].

2.5.3 Asfalto frente a los Ciclo hielo-deshielo

En varias partes del mundo ocurren los conocidos ciclos hielo-deshielo, los que con la variación de la temperatura producen múltiples daños a los materiales, específicamente al pavimento asfáltico.

Los efectos de los ciclos de congelación y descongelación en diferentes capas de pavimentos se pueden apreciar en los diferentes niveles. Las características físicas y mecánicas de los agregados pueden verse afectados negativamente por los ciclos de congelar y descongelar.

Estudios se han llevado a cabo, en regiones frías, muestran el efecto de los ciclos de congelación y descongelación sobre el pavimento de asfalto. Los resultados han demostrado que existen importantes efectos negativos de los ciclos de hielo-deshielo en las propiedades de ingeniería del pavimento de asfalto. [11]

Agrietamiento a baja temperatura y agrietamiento por fatiga térmica son las dos formas de craqueo térmico en el pavimento de asfalto [2]. Cuando la temperatura cae rápidamente o en baja temperatura continua, se forma el estrés de temperatura en el pavimento de asfalto. Agrietamiento a baja temperatura se produce cuando la tensión de tracción térmica en pavimento de asfalto supera su resistencia a la tracción [2], [5]. Si la tensión integral (tensión por temperatura, tensión de carga, etc.) es menor que la resistencia a la tracción, el interior se acumulan micro-daños en lugar de formar grietas. Después de un gran número de ciclos de congelación-descongelación, el esfuerzo integral excede la resistencia a la rotura de la mezcla de asfalto, lo que conduce a grietas y otras angustias aparentes [3] [6]. Además, si el pavimento se encuentra en el medio ambiente de humedad, la presión hidrodinámica y la constricción de vacío aparecerán en la capa de superficie bajo las cargas del vehículo repetibles [3] [4]. El agua causa la interrupción de la unión entre el asfalto y el agregado en la interfaz de asfalto-agregado. Este fallo prematuro de la adhesión se conoce comúnmente como decapado en pavimentos de hormigón de asfalto [7]. Ciclos de hielo-deshielo se traducirá en la destrucción de agravación y vacíos aumentar en la superficie del concreto asfáltico.

En consecuencia, es en los meses de invierno donde ocurre el ciclo hielo-deshielo, el cual afecta directamente al pavimento asfáltico. Los cambios de temperatura son la causa principal de los daños a los pavimentos de carreteras, por lo tanto, conseguir un mejor conocimiento del impacto de aumentar o disminuir la temperatura es muy importante para el logro de la estabilidad de corriente alterna. Esta estabilidad determina el rendimiento el pavimento de la carretera. Los resultados del estudio han demostrado que existen importantes efectos negativos de los ciclos de hielo-deshielo en las propiedades mecánicas del cemento asfáltico [8].

3. CAPÍTULO III : Método de ensaye y control

En este capítulo, se describen los procedimientos, parámetros de evaluación (especificaciones) y métodos de ensayos ocupados en el presente trabajo, a nivel de laboratorio.

A nivel nacional, los métodos de ensayo para caracterizar las mezclas asfálticas y sus materiales componentes básicos, se encuentran descritos en el Volumen N° 8 del Manual de Carreteras (M.C.-V.8) y las especificaciones en el Volumen N° 5 (M.C. V.5).

3.1 Trabajo en Laboratorio

3.1.1 Materiales constituyentes

La mezcla asfáltica debe resistir las solicitaciones a la que está expuesta, siendo el espesor de la capa asfáltica la principal responsable de la resistencia de ésta, además de la composición de la mezcla asfáltica que la define. Es por esta razón, que para su proceso de diseño, todos los materiales que la conforman deben cumplir requisitos (controles de calidad) para decidir si son aptos para la construcción del pavimento.

En el caso de las mezclas asfálticas en caliente convencionales, se controlan los áridos y el cemento asfáltico, y en el caso de las mezclas con incorporación de polvo de caucho por vía seca, se debe evaluar también este componente adicional.

3.1.1.1 Áridos

Existen distintos tipos de áridos, que de acuerdo al uso de la mezcla en el pavimento, deben cumplir requisitos específicos para que la mezcla que conforman cumpla su función. En este capítulo, solo se señalan las propiedades competentes a la capa de rodadura, que es la capa asfáltica a analizar en este trabajo.

En la Tabla 3-1, se muestran los ensayos y evaluaciones para los áridos que conforman la mezcla asfáltica de rodadura. Los procedimientos para cuantificar cada propiedad, se encuentran descritos en el Capítulo 8.200 del M.C.-V.8, y las especificaciones respectivas en 5.408.201 del M.C.-V.5.

Tabla 3-1: Ensayes de caracterización y requisitos para áridos en carpeta.

Ensaye	Unidad	Exigencia	Método
Partículas Chancadas	%	Min. 09	8.202.6
Partículas Lajeadas	%	Máx. 10	8.202.6
Desgaste Los Ángeles	%	Máx. 25	8.202.11
Granulometría	-	Tabla 5.408.201F del M.C.-V5	8.202.3
Densidad Real Seca	Kg/m3	Informar	8.202.20
Densidad Neta	Kg/m3	Informar	8.202.21

Fuente: Manual de Carretera Vol. 8



Figura 3-1: Realización de granulometría al árido.

Las distintas fracciones de áridos, que como mínimo son tres, se combinan, según proporciones específicas, para definir la granulometría de la mezcla, denominada granulometría de diseño, ilustrada en la Figura 3-1. En particular, la granulometría a utilizar en este trabajo, para la capa de rodadura, debe cumplir la banda granulométrica de tipo semidensa IV-A-12 “especificaciones de proyecto”, la cual se señala en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Banda granulométrica Semidensa IV-A-12

Tamiz		Banda Granulométrica Semidensa IV-A-12
ASTM	mm	% pasante
3/4"	20	100
1/2"	12,5	80 - 95
3/8"	10	70 - 85
N° 4	5	43 - 58
N° 8	2,5	28 - 42
N° 16	1,25	-
N° 30	0,63	13 - 24
N° 50	0,315	8 .- 17

Fuente: Tabla 5.408.201F del M.C.-V.5.

3.1.1.2 Cemento asfáltico

Se debe analizar las diversas propiedades del cemento asfáltico, que varían según el tipo de cemento asfáltico a emplear. En la Tabla 3-3, se indica la caracterización y evaluación pertinente al cemento asfáltico tradicional del tipo CA 24, que es el que se utiliza en este trabajo.

Los procedimientos de ensayo para cuantificar cada propiedad, se encuentran descritos en el Capítulo 8.302 del M.C.-V.8, y las especificaciones respectivas, se enuncian en 5.408.202 del M.C.-V.5.

Tabla 3-3: Ensaye de caracterización y requisitos para el CA 24.

Ensaye	Unidad	Exigencia	Método
Producto Original:			
Viscosidad a 60°C	Poises	>2.400	8.302.15
Penetración, 100gr, 25°C, 5 seg	0,1 mm	Mín. 40	8.302.3
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min	cm	Mín. 100	8.302.8
Ensaye de la Mancha	% Xilol	Máx. 25%	8.302.7
Punto de Ablandamiento	°C	Informar	8.302.16
Índice de Penetración (Pfeiffer)	-	' -1,5 a + 1,0.	8.302.18
Índice de Fraass (°C)	°C	Informar	8.302.17
Viscosidad Cinemática a 135°C	Poises	Informar	8.302.13
Película Delgada Rotatoria:			
Pérdida por Calentamiento	%	Máx. 0,8	8.302.33
Viscosidad a 60°C	Poises	Informar	8.302.15
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min	cm	Min. 100	8.302.33
Índice de Durabilidad	-	Máx. 3,5	Residuo/original

Fuente: Tabla 8.301.1.A del M.C.-V.8.

Respecto al cemento asfáltico envejecido, se lleva a cabo su caracterización completa, que incluye la del material tras el envejecimiento primario, simulado en el “horno de película delgada rotatoria” (PDR) y la correspondiente al envejecimiento secundario, simulado en la “cámara de envejecimiento a presión” (PAV).

En el ensaye PDR, una muestra de asfalto original es sometida durante 75 minutos a una temperatura de 163°C con inyección de aire. En el PAV, la muestra previamente envejecida en el horno PDR, se envejece a una temperatura determinada (del orden de 100°C) y a una presión de trabajo de 305psi durante 20 horas.

3.1.1.3 Polvo de caucho

Las propiedades físicas y contaminantes del polvo de caucho de NFU, debe estar comprendida en la Norma NCh 3258-2012 “Mezcla asfáltica- Polvo de caucho proveniente de los neumáticos fuera de uso- Requisitos”. Estas se indican en la Tabla 3-4 y Tabla 3-5.

Tabla 3-4: Requisitos para la utilización del polvo de caucho, según NCh 3258-2012

Requisitos físicos	Rangos
Densidad relativa	1,15 +- 0,05
Contenido de agua	< 0,75%
Granulometría	P-1, P-2 o P-3
Contaminantes	Rangos
Contenido ferromagnéticos	< 0,01%
Contenido textiles	< 0,5%
Contenidos impurezas	< 0,25%

Fuente: Norma NCh 3258-2012.

Tabla 3-5: Bandas granulométricas del polvo de caucho.

Tamiz		P - 1	P - 2	P - 3
ASTM	mm	% pasante	% pasante	% pasante
N° 8	2,3	100	-	-
N° 16	1,25	60 - 100	100	-
N° 30	0,63	30 - 80	40 - 100	100
N° 50	0,315	15 - 60	10. - 70	30 - 60
N° 100	0,16	0 - 40	2. - 40	0 - 30
N° 200	0,08	0 - 20	0 - 20	0 - 18

Fuente: Norma NCh 3258-2012.

3.1.2 Diseño de mezclas asfálticas en caliente

En el diseño de la mezcla asfáltica en caliente lo que se busca obtener el mejor balance entre estabilidad, durabilidad, trabajabilidad e impermeabilidad, además de otras propiedades necesarias de acuerdo a su función en el pavimento.

Para tal efecto, se determina el contenido óptimo de asfalto, para una combinación particular de áridos, aditivos y otros materiales que puedan incorporarse como agregado, que le otorgue a la mezcla asfáltica las propiedades requeridas. El óptimo de asfalto depende, en gran parte, de las características del agregado, tales como su capacidad de absorción y granulometría (entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y, mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir todas las partículas). Es necesario además, que todas las

mezclas contengan cierto porcentaje de vacíos para absorber la consolidación producto del amasado del tránsito (sin exudaciones).

El proceso de dosificación y los requisitos exigidos (especificaciones) varían según el tipo de mezcla asfáltica a diseñar.

3.1.2.1 Mezclas asfálticas convencionales

El método marshall es la metodología oficial para determinar el contenido óptimo de asfalto en las mezclas asfálticas en caliente convencionales (dosificación de asfalto). Este método es aplicable sólo a mezclas que contengan agregados con tamaño máximo absoluto igual o inferior a 25mm (1").

Este procedimiento de diseño se encuentra descrito en 8.302.47 del M.C.-V.8, y requiere la confección de probetas, cuyo procedimiento de preparación y ensayo se describe en 8.302.40 del M.C.-V.8. Un breve resumen del método se presenta a continuación:

3.1.2.1.1 Confección de las probetas Marshall (8.302.40 del M.C.-V.8):

El desarrollo del método implica la confección de una serie de probetas cilíndricas normalizadas de 63,5mm de altura y 101,6mm de diámetro, a las cuales se les incorporan diferentes porcentajes de ligante. Las probetas con estas dimensiones reciben la denominación de probetas Marshall.

Para obtener las dimensiones requeridas en las probetas, se realiza la mezcla con 1100g de áridos según la dosificación de diseño, como se aprecia en la Figura 3-2. Suelen utilizarse al menos cinco contenidos de cemento asfáltico (porcentaje referido al peso del agregado), variando uno y otro en 0,5 puntos porcentuales y con al menos dos contenidos de asfalto bajo y sobre el óptimo esperado. Para cada contenido de ligante, se deben fabricar a lo menos tres probetas.



Figura 3-2: Confección de la dosificación de los áridos según diseño.

Las probetas se preparan de acuerdo a un procedimiento específico de calentamiento, mezclado y compactación. Las temperaturas de mezclado y de compactación dependen del cemento asfáltico que se utilice para fabricar la mezcla asfáltica, y se definen según el rango de viscosidades necesarias para realizar tales procesos.

La compactación dentro de los moldes se realiza por impacto a través del martillo de compactación marshall, ilustrada en la Figura 3-3. Este es un dispositivo de acero, de base plana y circular de 100mm de diámetro, con un peso de 4,54kg, construido de modo de obtener una altura de caída de 18". Las probetas se compactan con una energía de compactación de 75 golpes por cara, o como se especifique.



Figura 3-3: Martillo de compactación Marshall.

3.1.2.1.2 Procedimiento de ensayo (8.302.40 del M.C.- V.8) y determinación del contenido óptimo de asfalto (8.302.47 del M.C.-V.8):

Los dos aspectos principales de este método de diseño, son el análisis volumétrico (densidad-huecos) y el ensayo de estabilidad y flujo de las probetas compactadas. Para tal efecto, después que se ha determinado la densidad de cada una de las probetas, de acuerdo al método 8.302.38 del M.C.-V.8, y su contenido de huecos de aire, según 8.302.47 punto 4.7 del M.C.-V.8, se procede a ensayarlas a una temperatura de 60°C, para determinar su estabilidad y fluidez (8.302.40 del M.C.- V.8).

La estabilidad es la resistencia máxima en newton a la deformación plástica de una probeta a 60°C cuando es cargada en su manto lateral usando el equipo marshall, figura 3-3. Esta prensa permite aplicar una carga a una velocidad de deformación constante de 50,8mm/min, la cual se le transmite a la probeta a través de dos mordazas semicirculares, una inferior y otra superior, que rodean su manto cilíndrico. La fluidez es la deformación en cuartos de milímetros (0,25mm) que se produce desde el inicio de la carga hasta llegar a la carga máxima.



Figura 3-4: Prensa marshall y mordaza de carga.

Para definir la cantidad óptima de asfalto, es necesario previamente conocer el contenido de huecos de aire, la estabilidad y la densidad para cada serie de probetas, conformada con un mismo contenido de asfalto (cinco series). Los valores de estas propiedades se obtienen como el promedio de los valores individuales de las tres muestras que conforman el grupo.

El contenido óptimo de asfalto referido al peso del agregado (% r.a.), se determina promediando los porcentajes de ligante en donde se alcanza la densidad máxima (P_b1), la estabilidad máxima (P_b2) y un porcentaje de vacíos de aire de 5% (P_b3).

Finalmente, se determinan las propiedades marshall, definidas bajo el contenido óptimo de asfalto, que caracterizan a la mezcla asfáltica diseñada. Estas propiedades son principalmente la densidad, estabilidad, fluidez, huecos de aire (V_a) y vacíos en el agregado mineral (VAM). Este último parámetro y otros más requeridos, se determinan de acuerdo a 8.302.47 punto 4.1 al 4.8 del M.C.-V.8.

3.1.2.1.3 Evaluación de la mezcla asfáltica en Laboratorio (controles de calidad):

Para la evaluación de la mezcla asfáltica diseñada para la capa de rodadura, los requisitos necesarios, relativos a las propiedades marshall bajo el óptimo de asfalto, son los especificados en 5.408.203 M.C.-V.5, y se indican en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6: Requisitos de las propiedades Marshall.

Estabilidad (N)	Mín. 9000
Fluencia (0,25mm)	Mín. 8 - Máx. 16
Huecos en la Mezcla (%)	Mín. 4 - Máx.6
VAM (%)	Mín. 14

3.1.2.2 Mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho por vía seca

El diseño de una mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho por vía seca representa más dificultad que una mezcla asfáltica convencional debido a la mayor cantidad de parámetros que se deben determinar y a que todos están interrelacionados (variables que definen el proceso de digestión).

En efecto, dado que la incorporación de caucho a una mezcla modifica en cierto grado las propiedades del asfalto según las condiciones en que se ejecute el proceso de digestión del caucho, se hace prioritario definir las condiciones para efectuar este proceso de manera efectiva.

Así, a partir de la dosificación de áridos y polvo de caucho, de acuerdo a sus respectivas granulometrías, se deben determinar una temperatura y un tiempo de digestión mínimos.

3.1.2.2.1 Procedimiento para la confección de probetas

El procedimiento para preparar probetas difiere del empleado para una mezcla convencional por el proceso de digestión al que se debe someter la mezcla con incorporación de polvo de caucho. Las etapas a seguir son las siguientes estipuladas por el Laboratorio Nacional de Vialidad:

- a.** Establecer los porcentajes de polvo de caucho y asfalto que se van a utilizar, referidos al peso del agregado, y el tiempo y la temperatura a la que se llevará a cabo el proceso de digestión. Estos parámetros se definen mediante la evaluación de la resistencia conservada a la acción del agua, la cual puede ser determinada mediante alguno de los dos métodos equivalentes siguientes: el ensayo de Inmersión-Compresión (a 25°C) o el “ensayo de sensibilidad al agua” (tracción indirecta tras inmersión) a 15°C.
- b.** Combinar las distintas fracciones de áridos para obtener la granulometría proyectada (granulometría de diseño).
- c.** Calentar los agregados en horno a la temperatura de mezclado y pesar la cantidad de polvo de caucho a utilizar. La temperatura de mezclado se fija igual a la temperatura de digestión.
- d.** Mezclar los agregados calientes con la cantidad de caucho que corresponda y colocarlos en horno a la temperatura de digestión por aproximadamente 5 minutos para que el caucho aumente su temperatura.
- e.** Adicionar a la mezcla de agregados con caucho, el asfalto previamente calentado a la temperatura de digestión, y mezclar por 2 a 3 minutos.
- f.** Colocar la mezcla asfáltica en horno para el proceso de digestión, durante el tiempo y a la temperatura definidos con anterioridad.
- g.** Retirar la mezcla del horno y remover el material.
- h.** Compactar la mezcla caliente en moldes precalentados. La compactación se lleva a cabo a una temperatura 10°C más baja que la de digestión y según el procedimiento de compactación correspondiente al método que se esté llevando a cabo.

i. Dejar reposar por 24 horas antes de extraer la probeta del molde.

j. Remover la probeta a temperatura ambiente.

3.1.2.2.2 Ensayo de sensibilidad al agua

El ensayo de sensibilidad al agua, al igual que el ensayo de inmersión–compresión, evalúa el efecto de la acción del agua en la cohesión de una mezcla asfáltica, sin embargo, emplea una metodología de ensayo diferente para la determinación del índice de resistencia conservada.

Se obtiene la resistencia conservada de la mezcla, comparando las resistencias a tracción indirecta de dos grupos de probetas cilíndricas equivalentes, un grupo mantenido en seco a temperatura ambiente y el otro sometido un proceso de saturación y de inmersión acelerada en agua. El procedimiento de ensayo se realiza bajo las normas europeas que se señalan a continuación:

- UNE-EN 12697-12:2006 “Determinación de la sensibilidad al agua de probetas de mezcla bituminosa”
- UNE-EN 12697-23:2003 “Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas de mezcla bituminosa”.

La primera norma, define las condiciones de compactación de las probetas y su acondicionamiento, en húmedo y en seco, además de la determinación del Índice de resistencia conservada de la mezcla, mientras que la segunda norma, describe el procedimiento de ensayo para determinar la resistencia a tracción indirecta.

El ensayo requiere la confección de mínimo seis probetas cilíndricas del tipo marshall, de diámetro 101,6mm y espesor 63,5mm, compactadas por impacto mediante el martillo de compactación pero con 50 golpes por cara. Este número de golpes es el necesario para que la probeta tenga la densidad y el porcentaje de huecos que se espera tenga la mezcla en terreno, dada por el 97% de la densidad marshall de diseño (compactada con 75 golpes por cara).

El procedimiento consiste en dividir las seis probetas en dos grupos de tres, de manera que la densidad media y las longitudes medias de cada grupo, sean aproximadamente las mismas (las densidades de ambos grupos no deben diferir en más de 30kg/m³ y las diferencia en las dimensiones no deben exceder los 5mm).

Para el acondicionamiento, un grupo se mantiene en seco a una temperatura ambiente de $20 \pm 5^\circ\text{C}$, mientras que el otro grupo se somete a una saturación en agua aplicando vacío hasta una presión de 6,7kPa durante 30 minutos, ilustración del proceso en la Figura 3-5, y posteriormente las probetas son mantenidas en inmersión en un baño de agua a una temperatura de 40°C durante un periodo comprendido entre 68 y 72 horas.



Figura 3-5: Probetas en saturación al vacío.

Posteriormente, las probetas se proceden a ensayar a tracción indirecta a la temperatura de ensayo de 15°C (ver método en capítulo 3.1.3.2.1). Para esto, ambos grupos se deben acondicionar durante 2 horas como mínimo a la temperatura señalada; las probetas húmedas se colocan directamente en un baño de agua y las probetas secas se introducen a una cámara de aire controlada mediante un termostato.

El ensayo a tracción indirecta se realiza con la prensa marshall, que permite aplicar una carga de compresión a una velocidad de deformación constante de $50 \pm 2\text{mm/min}$. Esta debe ir equipada adicionalmente con el dispositivo para la instalación de la probeta, denominado Prensa Lottman, que permite cargar longitudinalmente la probeta, según su plano diametral vertical. El dispositivo consta principalmente de dos barras metálicas a través de las cuales se aplica la carga. La probeta se ensaya según la disposición señalada en la Figura 3-6, hasta alcanzar la carga diametral de compresión máxima.

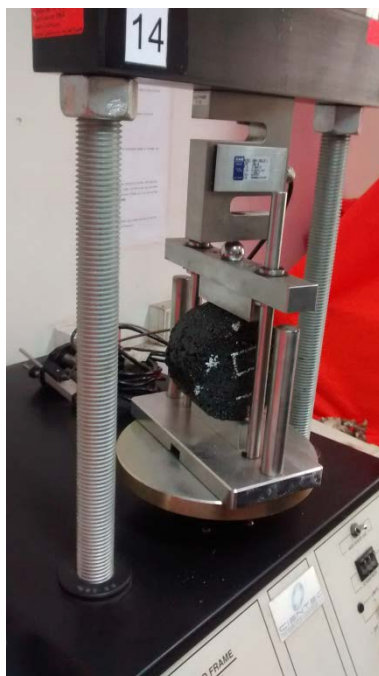


Figura 3-6: Prensa Marshall equipada con el bastidor de ensayo (prensa Lottman).

La resistencia a la tracción indirecta de cada probeta (ITS) se calcula según la siguiente expresión:

$$ITS = \frac{2 * P}{\pi * D * h}$$

Ecuación 3-1

Dónde:

ITS = Resistencia a la tracción indirecta de la probeta [MPa]

P = Carga máxima [N]

D = Diámetro de la probeta [mm]

H = Altura media de la probeta [mm]

Fuente: Norma UNE-EN 12697-23

Luego, la resistencia a tracción indirecta tras inmersión de la mezcla asfáltica, también denominada resistencia conservada por tracción indirecta (ITSR), se calcula como la razón entre el promedio de las resistencias a tracción indirecta de las probetas acondicionadas en húmedo (ITS_w) y las probetas acondicionadas en seco (ITS_d), como se indica en la en la siguiente expresión.

$$ITRS = \frac{ITS_w}{ITS_d} [\%]$$

Ecuación 3-2

Dónde:

ITRS = Resistencia conservada por tracción indirecta. [%]

ITS_w = Resistencia a la tracción indirecta para probetas en estado húmedo. [MPa]

ITS_d = Resistencia a la tracción indirecta para probetas en estado seco. [MPa]

Fuente: Norma UNE-EN 12697-12

- Exigencia para mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho:

Para la estimación de las condiciones de digestión de las mezclas asfálticas modificadas por vía seca, se toma como referencia la especificación española para mezclas asfálticas en caliente definida en la Orden Circular 24/2008. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3): Artículo: 542 - Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso.

La especificación limita el índice de resistencia conservada por ensayo de tracción indirecta realizado a 15°C, a un valor mínimo de 85% para capa de rodadura. Se especifica también que la compactación de las probetas debe efectuarse con 50 golpes por cara.

3.1.3 Caracterización de mezclas asfálticas

Mediante ensayos de laboratorio, se caracterizan los distintos tipos mezclas asfálticas según diversas propiedades mecánicas.

3.1.3.1 Resistencia a Tracción indirecta (compresión diametral)

Para determinar la resistencia a tracción indirecta de mezclas asfálticas, también conocida como resistencia a compresión diametral, se siguen dos metodologías de ensayos descritos en las siguientes normas:

3.1.3.1.1 Ensayo según UNE-EN 12697-23

Este método de ensayo se ejecuta bajo la norma europea UNE-EN 12697-23: 2003 "Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas de mezcla bituminosa", y es el mismo ocupado

para el ensayo de “sensibilidad al agua” de las probetas acondicionadas en seco, de acuerdo a UNE-EN 12697-12.

Este ensayo permite la determinación de la resistencia a tracción indirecta (ITS) de probetas cilíndricas tipo marshall compactadas con 50 golpes por cara, y consiste en la aplicación de una carga diametral de compresión, a lo largo de la dirección del eje de la probeta, a una velocidad constante de deformación de 50 ± 2 mm/min. El ensayo se debe realizar a una temperatura comprendida entre 5°C y 25°C, para lo cual las probetas se acondicionan durante 2 hrs. en una cámara de aire controlada mediante termostato.

Esta configuración de carga provoca un estado de tensiones en la probeta, en donde el esfuerzo de tracción es relativamente uniforme en todo su plano diametral vertical. La resistencia a la tracción indirecta de una probeta se calcula mediante una ecuación, la cual determina el esfuerzo a tracción máximo en función de la carga máxima aplicada (rotura de la probeta) y de las dimensiones de la muestra.

Con este ensayo se obtiene una forma de caracterizar la cohesión de una mezcla asfáltica, pues la mayor oposición a la falla la presenta la unión del asfalto con los agregados pétreos. Para la determinación de la resistencia a tracción indirecta representativa de la mezcla, se requieren mínimo tres probetas. Este valor se obtiene como el promedio de las resistencias individuales.

El ensayo de tracción indirecta reproduce el estado de tensiones en la fibra inferior de la capa asfáltica y permite cuantificar la falla provocada por tracción.

3.1.3.1.2 Ensayo según NLT-346

Este método de ensayo se ejecuta bajo la norma española NLT-346/90 “Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas”.

El procedimiento de ensayo es el mismo descrito anteriormente, según la norma europea, solo varían la temperatura de ensayo y las condiciones de acondicionamiento, dado que las probetas se acondicionan durante 6 horas en un baño de agua a 25°C. Dado que el método no especifica la cantidad de golpes para la compactación de las probetas Marshall, se opta por realizarla con 75 golpes por cara.

3.1.3.2 Estabilidad Marshall

Se usará este método de ensaye para obtener otro parámetro de comparación entre las probetas asfálticas estudiadas, lo que nos da otra apreciación comparando los resultados de la estabilidad y fluencia. Todo esto de igual forma como se explicó en el punto de evaluación de las mezclas asfálticas en laboratorio, según tabla 3-6.

3.1.4 Simulación ciclo hielo-deshielo

El fin de simular el ciclo hielo-deshielo es exponer a las probetas a las condiciones más reales posibles y así poder obtener los valores de los resultados exactos, lo que dará la facilidad de desarrollar un análisis real de la problemática.

Para esto se basó en la norma ASTM C 666/C 666M – 03. Resistencia del hormigón a una rápida congelación y descongelación (*Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*), ya que no existe ninguna norma nacional o internacional relacionada a los ciclos hielo-deshielo para los pavimentos asfálticos.

En el desarrollo de este ensayo, se definió un parámetro de tiempo y temperatura, los cuales serán los siguientes:

- Tiempo de simulación: Consiste en realizar 60 ciclos de hielo-deshielo, cada uno de estos tiene una duración de 16 horas, las que se dividen en 2 partes, la primera, las probetas se encuentran en el congelador por 8 horas y las últimas 8 horas estarán a temperatura ambiente.
- Temperatura de simulación: Durante las primeras 8 horas del ciclo en el congelador, las probetas están a una temperatura de $-6^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, y las horas restantes fuera del congelador están a una temperatura de $15^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

4. CAPÍTULO IV: Estudio Comparativo del comportamiento mecánico entre las mezclas asfálticas convencionales y mezclas con polvo de caucho

En el capítulo IV, se fundamentan los resultados finales de los procedimientos y de los métodos de ensayos ocupados (establecidos en el capítulo anterior) para poder hacer el análisis comparativo anteriormente mencionado en el capítulo I, en los anexos se respalda las tablas completas para mayor detalle.

4.1 Caracterización de los materiales

A continuación se presentan los resultados obtenidos en laboratorio con respecto a los áridos, cemento asfáltico y el polvo de caucho.

4.1.1 Áridos

Los áridos utilizados para la realización de esta tesis, provienen del Rio Aconcagua, facilitados por la Constructora Bitumix S.A. ubicada en la Región de Valparaíso, específicamente en Concón. Por dosificación se dispuso de 3 materiales pétreos:

Gravilla TM 3/4"

Gravilla TM 3/8"

Polvo roca TM 1/4"

TM= Tamaño máximo nominal del árido.

En la tabla 4-1 se dispone con más detalle de la información de los áridos.

Tabla 4-1: Granulometría áridos utilizados.

Identificación					
Material			Gravilla 3/4"	Gravilla 3/8"	Polvo Roca 1/4"
Procedencia			Río Aconcagua	Río Aconcagua	Río Aconcagua
Granulometría					
Tamiz	25 mm	1"			
Tamiz	19 mm	3/4"	100		
Tamiz	12,5 mm	1/2"	32	100	
Tamiz	9,5 mm	3/8"	1	74	100
Tamiz	4,75 mm	N°4		3	92
Tamiz	2,36 mm	N°8		1	62
Tamiz	1,18 mm	N°16		1	40
Tamiz	0,6 mm	N°30		1	28
Tamiz	0,3 mm	N°50			21
Tamiz	0,15 mm	N°100			15
Tamiz	0,075 mm	N°200			11

Según lo estipulado en el Capítulo III, puntualmente en la Tabla 3-1, se da a conocer los resultados de los ensayos y controles realizados a los áridos, permitiendo verificar las constantes físicas e hídricas de estos. Todo lo anteriormente mencionado queda resumido en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2: Constantes físicas e hídricas de los áridos.

Constantes físicas e hídricas		Gravilla 3/4"	Gravilla 3/8"	Polvo Roca 1/4"
Densidad aparente	kg/m ³	1458	1430	1736
Densidad real seca	kg/m ³	2652	2640	2648
Densidad neta	kg/m ³	2739	2741	2750
Partículas chancadas	%	96	97	100
Partículas lajeadas	%	0	0	0,3
Índice de lajas	%	7,4	14	6,1
Desgaste Los Ángeles	%	10	14	15,7
	Grado N°	5	6	7
Índice de plasticidad	%	N.P.	N.P.	N.P.

4.1.2 Cemento asfáltico

Se trabajó con cemento asfáltico CA-24, material facilitado por la Constructora Bitumix S.A. Este cemento asfáltico es el normalmente utilizado para la realización de pavimentos asfálticos en la Región de Valparaíso.

Este cemento asfáltico fue caracterizado según los siguientes ensayos:

- Viscosidad Brookfield a 60° y a 135° C
- Ductilidad
- Penetración
- Punto de ablandamiento
- Densidad
- Ensayo de la mancha
- Punto de fragilidad FRAASS

Posteriormente, fueron sometidos al proceso de envejecimiento en el horno de película delgada rotatoria (RTFO), el cual simula el envejecimiento a corto plazo, realizándose los siguientes ensayos:

- Pérdida por calentamiento
- Penetración
- Viscosidad absoluta a 60° C
- Ductilidad
- Índice de durabilidad
- Punto de ablandamiento

Estos determinan la calidad del cemento asfáltico que se está utilizando. Como se muestra en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Parámetros de ensayos al cemento asfáltico.

Parámetros	Unidad	Valor	Especificación
Viscosidad 60°C	Poises	3880	Min. 2400 Poises
Viscosidad 135°C	cSt	505,1	Informar
Ductilidad 25°C, 5Cm/min	cm	105	Mín. 100 cm
Ensaye de la mancha	% Xilol	-30	Máx. 30%
Ensaye de la mancha	% Xilol	-20	Máx. 20%
Punto de inflamación	°C	263	Min.232 °C
Punto de ablandamiento	°C	49	Informar
Índice de penetración		-0,95	-2,0 a +1,0
Penetración 25°C, 100 gr, 5 s.	0,1mm	62	Mín. 40
Solubilidad en tricloroetileno	%	99,8	Mín. 99%
Temperatura de mezclado	°C	155	Informar
Temperatura de compactación	°C	146	Informar
Película Delgada Rotatoria			
Penetración (%original)	%	63	Mín. 54%
Pérdida por calentamiento	%	0,21	Máx. 0,8%
Viscosidad 60°C	Poises	9050	Informar
Ductilidad 25°C, 5Cm/min	cm	105	Mín. 100 cm
Viscosidad Absoluta 60°C	Pa*s	898	Informar
Índice de durabilidad		2,3	Máx 4,0

4.1.3 Mezcla de áridos

4.1.3.1 Dosificación

Las propiedades del agregado pétreo de la mezcla utilizada en este estudio proporcionado por la empresa Bitumix S.A., se muestran en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4: Constantes físicas e hídricas de la mezcla de áridos.

Ensayos				
Partículas chancadas (2 caras)	%	98	mín.	90
Partículas lajeadas	%	0	máx.	10
Índice de Lajas	%	9		
Desgaste Los Ángeles	%	14	máx.	25
Índice de plasticidad	%	N.P.		N.P.
Sales solubles	%	0,2	máx.	2
Adherencia Método Estático	%	95	mín.	95
Adherencia Riedel- Weber	%	9-10.	mín.	0-5
Equivalente de arena	%	54	mín.	50
Desintegración en Sulfato de sodio F.gruesa	%	0,71	máx.	12
Desintegración en Sulfato de sodio F.Fina	%	0,71	máx.	15
Densidad real seca ponderada	Kg/m ³	2647		
Densidad efectiva	Kg/m ³	2658		
Absorción de asfalto	%	0,17		

La granulometría de la mezcla de agregados es del tipo “semidensa”, la cual comúnmente es utilizada en carpeta de rodadura. La granulometría utilizada corresponde a la banda IV-A-12 que se presenta en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5: Banda granulométrica mezcla áridos

Característica de la mezcla áridos				
Granulometría final			B. trabajo	Banda IV-A-12
Tamiz	25 mm	1"	100	
Tamiz	19 mm	3/4"	100	100 -100
Tamiz	12,5 mm	1/2"	86	80 -95
Tamiz	9,5 mm	3/8"	73	70 -85
Tamiz	4,75 mm	N°4	49	43 -58
Tamiz	2,36 mm	N°8	33	28 -42
Tamiz	1,18 mm	N°16	21	-
Tamiz	0,6 mm	N°30	15	13 -24
Tamiz	0,3 mm	N°50	11	8 -17
Tamiz	0,15 mm	N°100	8	6 -12
Tamiz	0,075 mm	N°200	6	4 -8

Cada material tiene distinto aporte porcentual en la mezcla, el cual queda definido en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6: Aporte porcentual áridos

Dosificación áridos en peso		
De acuerdo a las características de los áridos, estos son los porcentajes aportante:		
Gravilla 3/4"	20	%
Gravilla 3/8"	28	%
Polvo Roca 1/4"	52	%

En la siguiente Figura 4-1 se muestra el gráfico en donde queda definido los rangos y la banda de trabajo a utilizar para la realización de las probetas cilíndricas.

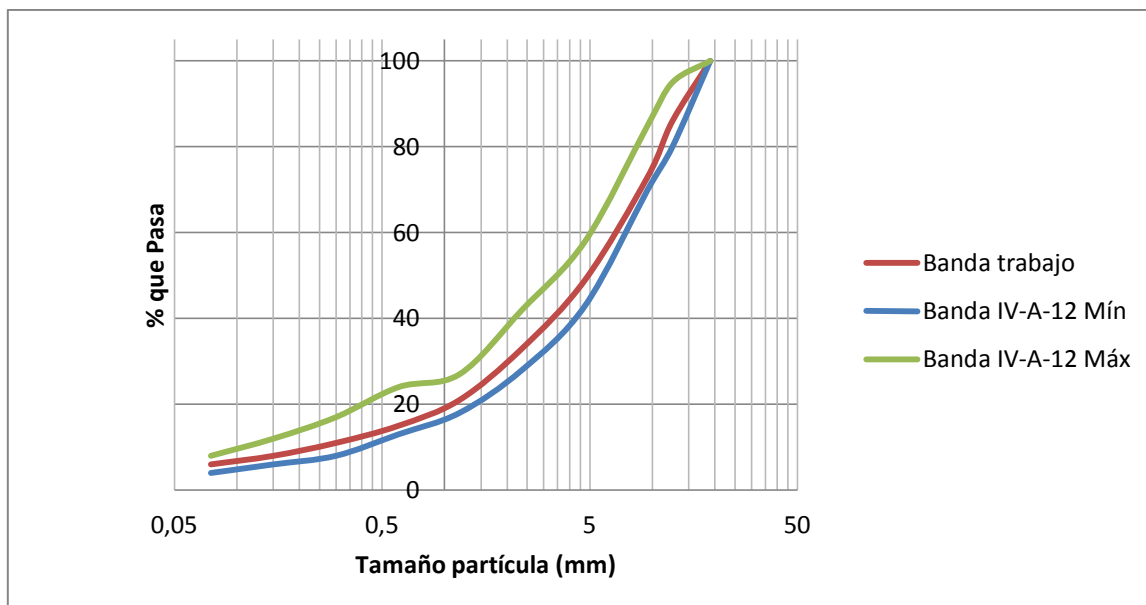


Figura 4-1: Curva distribución granulométrica Banda IV-A-12

4.1.4 Polvo de caucho

El polvo de caucho utilizado para la realización de las probetas cilíndricas fue obtenido de la empresa nacional POLAMBIENTE S.A., primera y única empresa en tratar los neumáticos fuera de uso. La idea de utilizar polvo de caucho nace en el hecho que en la actualidad no posee ningún tipo de uso. Este material posee una banda granulométrica que entra en el tipo P-2, según NCh 3258-2012. La granulometría y banda utilizada se presenta a continuación en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7: Granulometría y banda de trabajo polvo de caucho

Tamiz		Banda Trabajo	P - 2
ASTM	mm		% pasante
N° 8	2,3	-	-
N° 16	1,25	100	100
N° 30	0,63	100	40 - 100
N° 50	0,315	52	10. - 70
N° 100	0,16	12	2. - 40
N° 200	0,08	3	0 - 20

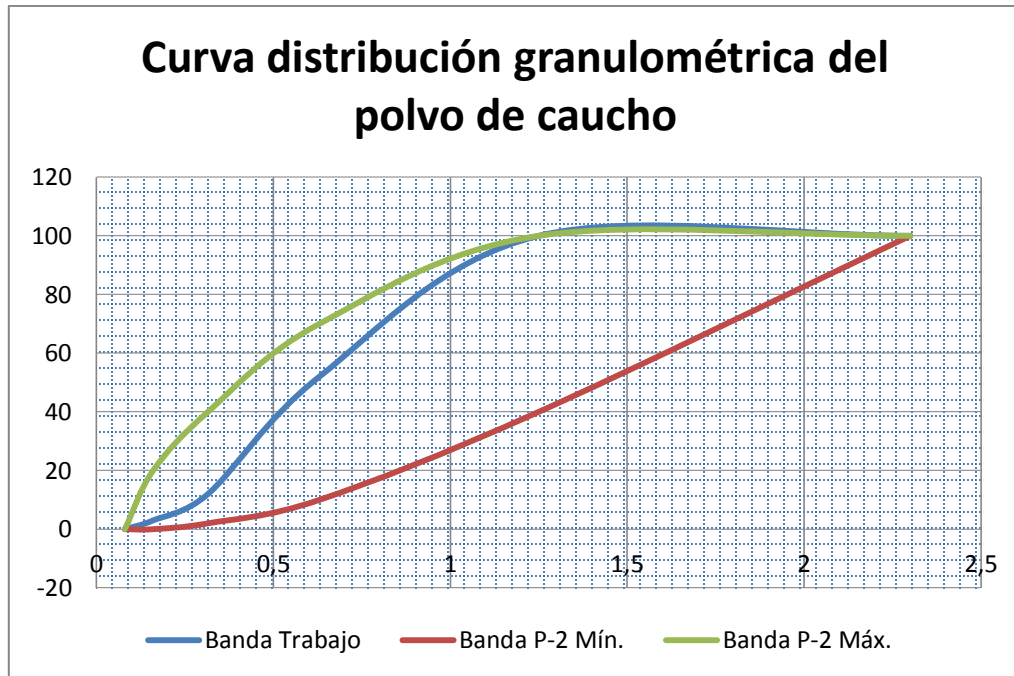


Figura 4-2: Curva distribución granulométrica del polvo de caucho

A continuación se presenta la Tabla 4-8, la cual contiene los resultados obtenidos de los ensayos realizados al polvo de caucho utilizado para la confección de probetas cilíndricas, donde los resultados cumplen correctamente con lo que estipula la norma NCh 3258-2012.

Tabla 4-8: Requisitos físicos y contaminantes del polvo de caucho

Requisitos físicos	Rangos	Resultados
Densidad relativa	1,15 +- 0,05	1,1
Contenido de agua	< 0,75%	0,11%
Granulometría	P-1, P-2 o P-3	P-2
Contaminantes	Rangos	Resultados
Contenido ferromagnéticos	< 0,01%	0,008%
Contenido textiles	< 0,5%	0,25%
Contenidos impurezas	< 0,25%	0,10%

4.2 Diseño de mezclas

A continuación, se presentan los parámetros de confección y diseño marshall de mezclas asfálticas haciendo uso de una probeta de 110 mm x 60 mm aproximadamente, tanto para las mezclas asfálticas con cemento asfáltico convencional como las modificadas con polvo de caucho de NFU nacional.

4.2.1 Mezcla asfáltica convencional

La mezcla utilizada para la realización de las probetas marshall consiste en CA-24, banda de trabajo de áridos mencionada en la Tabla 4-5 y donde su temperatura de mezclado y compactación son 160°C y 145°C respectivamente según monograma de Heukelom. Se determinó el porcentaje óptimo de asfalto y los parámetros necesarios para la realización de las probetas.

A continuación se presenta una tabla resumen de los ensayos realizados para definir todos los parámetros de la mezcla asfáltica convencional, definiendo la mezcla sin caucho al simbolizar como "0% Caucho".

Tabla 4-9: Parámetros de diseño Marshall mezcla 0% Caucho

		0% Caucho	Rangos
Caucho total	% ref. ag.	0	0
Asfalto total	% ref. ag.	5,2	5,2±0,3
DMM	kg/m ³	2463	Informar
Densidad	kg/m ³	2354	Informar
Huecos	%	4,4	Mín. 4 - Máx.6
V.A.M.	%	15,5	Mín. 14
Fluencia	0,01"	12,3	Mín. 8 - Máx. 16
Estabilidad	N	9697	Mín. 9000

Como se observa en la tabla anteriormente nombrada, los parámetros de la mezcla asfáltica convencional se encuentran dentro de los rangos establecidos por el Manual de Carretera, lo que indica que la mezcla se puede utilizar para la realización de las probetas cilíndricas que se utilizarán en el estudio.

4.2.2 Mezcla asfáltica con polvo de caucho de NFU nacional incorporado por vía seca

En la Tabla 4-10 se presentan los resultados obtenidos en el diseño marshall, utilizando un cemento asfáltico tipo CA-24 con el porcentaje de asfalto obtenido de la mezcla convencional ($5,2 \pm 0,3$ % Asfalto), banda de trabajo de áridos mencionada en la Tabla 4-5, polvo de caucho definido en 4.1.4, específicamente P-2, tiempo de digestión de 1 hora a 170°C y dos cantidades de caucho a utilizar: 0,5% y 1,0% polvo de caucho en relación al peso del árido y temperatura de mezclado y compactación de 170°C y 160°C respectivamente. Definiendo las mezcla con los nombres de "0,5% Caucho" y "1,0% Caucho"

Tabla 4-10: Parámetros de diseño Marshall mezcla 0,5% y 1,0% Caucho

		0,5% Caucho	1,0% Caucho	Rangos
Caucho total	% ref. ag.	0,5	1	0
Asfalto total	% ref. ag.	5,2	5,2	$5,2 \pm 0,3$
DMM	kg/m^3	2463	2463	Informar
Densidad	kg/m^3	2343	2341	Informar
Huecos	%	4,8	5,0	Mín. 4 - Máx.6
V.A.M.	%	15,8	15,9	Mín. 14
Fluencia	0,01"	12,3	12,3	Mín. 8 - Máx.16
Estabilidad	N	9697	9697	Mín. 9000

En la Tabla 4-10, queda demostrado que los parámetros de la mezcla asfáltica con polvo de caucho están dentro de los rango especificados por el manual de carretera.

A continuación se muestra una tabla resumen de los parámetros definidos en el punto 4.2, diseño de mezclas.

Tabla 4-11: Resumen diseño de mezclas

	Tipo Asfalto	% Asfalto	T° Mezclado	T° Compactación	Banda trabajo	Polvo caucho	Tiempo digestión
0% Caucho	CA-24	5,2 +-0,3	160°C	145°C	banda IV-A-12	-	0 Hrs
0,5% Caucho	CA-24	5,2 +-0,3	170°C	160°C	banda IV-A-12	P - 2	1 Hrs
1,0% Caucho	CA-24	5,2 +-0,3	170°C	160°C	banda IV-A-12	P - 2	1 Hrs

4.2.2.1 Evaluación mediante ensayo sensibilidad al agua.

En el punto anterior se determinó los parámetros a utilizar para la realización de las probetas marshall para mezclas asfálticas con polvo de caucho, pero el paso que sigue es verificar que estas probetas cumplen con los requisitos mínimos, mediante el ensayo de sensibilidad al agua, específicamente se debe verificar la resistencia conservada por tracción indirecta tras inmersión de la mezcla asfáltica (ITSR). Las tablas extensas con toda la información se encuentran en el Anexo D.

Se realizó el primer paso, que es la verificación de volumen, realizada en la cámara de vacío, según la norma UNE-EN 12697-12. Obteniendo los resultados en la Tabla 4-12, los cuales indican que cumplen con lo establecido por la norma, permitiendo pasar al segundo paso para obtener los resultados del ITSR.

Tabla 4-12: Resultados ensayo cámara presión

VERIFICACION PROBETAS CÁMARA PRESIÓN						
	Antes			Después		
Probetas	A	B	C	A	B	C
Hprom (mm)	61,3	62,1	63,6	61,2	62,0	63,6
Dprom (mm)	102,8	101,5	101,6	102,6	101,5	101,5
Vol (mm³)	1017,1	1004,9	1030,3	1012,2	1004,5	1027,8
	Diferencia < 2%			0,48%	0,04%	0,25%
	H= Altura	D= Diámetro	Vol= Volumen	CUMPLE		

Mediante el ensayo de sensibilidad al agua, se obtuvieron los resultados de resistencia conservada por tracción indirecta (ITSR), los que se pueden apreciar en la Tabla 4-13. En el gráfico de la figura 4-3, el ensayo se realizó para un total de 12 probetas: 6 con 0,5% Caucho y la misma cantidad con 1,0% Caucho según la norma UNE-EN 12697-12.

Como fue mencionado anteriormente una mezcla asfáltica sometida a los efectos del agua reduce sus propiedades mecánicas debido a la afinidad de los agregados pétreos con este recurso, provocando el desprendimiento del asfalto. Este “envejecimiento” de la mezcla se simula en el ensayo de sensibilidad al agua, donde el porcentaje representa la variación de resistencia a la tracción indirecta de una probeta húmeda con respecto a una seca, en la figura 4-3 muestra la diferencia entre ITS seco e ITS húmedo, dado en los dos casos que las probetas húmedas poseen menor ITS.

Tabla 4-13: Resultados ensayo sensibilidad al agua

	PROBETAS	Estado	Densidades (kg/m ³)	ITS (MPa)	ITS Prom (MPa)	ITSR % ≥ 85%	
0,5% Caucho	A	Saturada	2290	1,12	1,11	87	Cumple
	B	Saturada	2286	1,15			
	C	Saturada	2292	1,05			
	D	Seca	2293	1,35	1,28		
	E	Seca	2285	1,28			
	F	Seca	2297	1,19			
1,0% Caucho	G	Saturada	2282	1,01	1,00	85	Cumple
	H	Saturada	2277	0,99			
	I	Saturada	2278	1,00			
	J	Seca	2281	1,16	1,17		
	K	Seca	2281	1,19			
	L	Seca	2277	1,18			

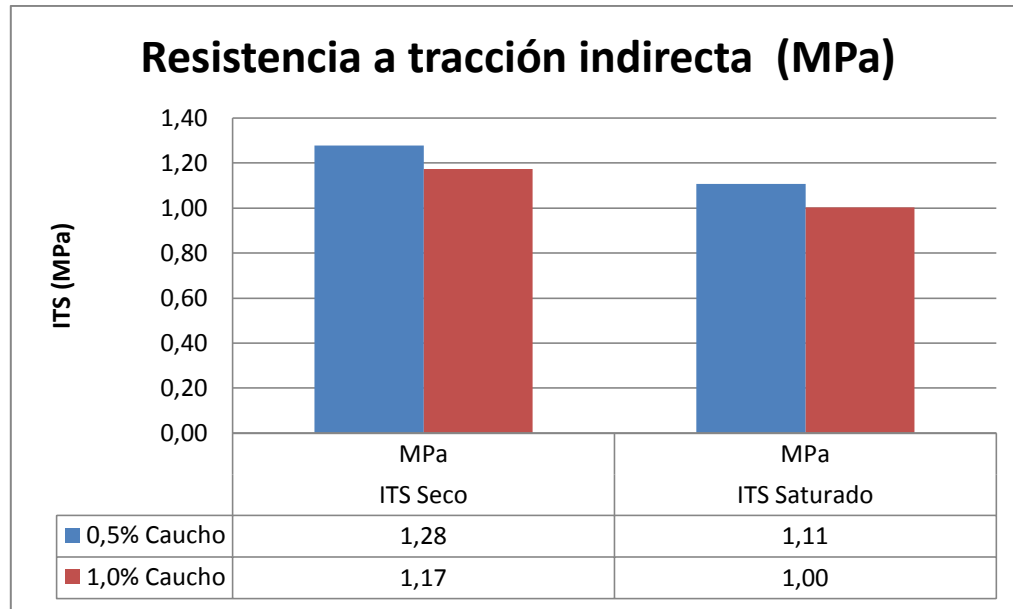


Figura 4-3: Gráfico de resistencia a tracción indirecta (ITS) para probetas secas y húmedas

En los resultados dados, se aprecia que las probetas con 0,5% Caucho y 1,0% Caucho cumplen con lo estipulado según la norma UNE-EN 12697-12. Superando el mínimo que es el 85% de la resistencia conservada por tracción indirecta (ITSR), por lo que la dosificación de asfalto, áridos y polvo de caucho se pueden utilizar para poder realizar los próximos ensayos, sean estos los de estabilidad marshall y tracción indirecta.

Los valores de la resistencia a la tracción indirecta(secos y húmedos) en las probetas con 0,5% Caucho son mayores a los valores del 1,0% Caucho, esto dice que las probetas con menor cantidad de caucho posee un mejor resultado, lo que se puede deber a que un exceso de caucho en la mezcla no permita que el asfalto interactúe completamente con el polvo de caucho y por sobre todo disminuyen la cantidad de asfalto disponible entre las partículas de agregado (menores espesores de la película de asfalto), lo que reduce esta capacidad y así las propiedades mecánicas a la mezcla.

4.3 Comparación de las propiedades de las mezclas

Con el objetivo de obtener una comparación más amplia del comportamiento de las propiedades de cada mezcla asfáltica, se llevó a cabo los siguientes ensayos:

- Estabilidad Marshall (8.302.40 del M.C.-V.8).
- Tracción Indirecta (UNE-EN 12697-12).

Como se definió en el Capítulo I, específicamente en el punto 1.5 de la metodología de la investigación, se realizaron un total de 60 probetas cilíndricas del tipo marshall, de las cuales la mitad se utilizaron para obtener los resultados patrones, estas probetas se ensayaron por estabilidad y tracción indirecta, luego las siguientes 30 probetas se expusieron a la simulación del ciclo hielo-deshielo, donde pasaron aproximadamente un mes y medio, completando un total de 60 ciclos de 16 horas, los cuales consistieron en 8 horas en una cámara de refrigeración a $-6^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ y las 8 horas restante a temperatura ambiente, puntualmente a $15^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, lo que se midió con un termómetro como se muestra en la Figura 4-4.

Para hacer un estudio comparativo más fiable, los resultados obtenidos en los ensayos anteriormente mencionados, se expusieron a un estudio estadístico llamado "T de Student", lo que permite determinar si la diferencia entre resultados del mismo tipo son o no realmente significativas.



Figura 4-4: Control de temperatura a la simulación ciclo hielo-deshielo

4.3.1 Estabilidad Marshall

En la Tabla 4-14, se resumen los resultados de las estabilidades antes y después del ciclo hielo-deshielo, según los ensayos marshall, obtenidas para los distintos porcentajes de caucho utilizados, para mayor detalle dirigirse al Anexo C. Se incluye también la variación de la estabilidad por efecto de la incorporación de polvo de caucho, tomando la mezcla asfáltica convencional como patrón de comparación.

Tabla 4-14: Resultados de Densidades y Estabilidad Marshall para cada mezcla

Probetas	Densidades Kg/m³	Estabilidad Antes Ciclo (N)	Variación %
0% Caucho	2353	13133	0
0,5% Caucho	2345	16147	23
1,0% Caucho	2341	15483	18

Probetas	Densidades Kg/m³	Estabilidad Después Ciclo (N)	Variación %
0% Caucho	2356	10642	0
0,5% Caucho	2341	15546	46
1,0% Caucho	2340	14868	40

Como se puede observar, las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho por vía seca poseen diferencias estadísticamente significativas en valores de estabilidad con respecto a la mezcla asfáltica convencional, esto es el factor común en las probetas antes de los ciclos hielo-deshielo y después. Esto se debe a que la incorporación de polvo de caucho, hace aumentar la viscosidad del cemento asfáltico, mejora la cohesión y, en consecuencia, la estabilidad de las mezclas asfálticas.

En los resultados de estabilidad antes de los ciclos hielo-deshielo, se aprecia que la estabilidad de las probetas 0% Caucho, que son las patrones o mezclas tradicionales, respecto a las mezclas modificadas con 0,5% Caucho y 1,0% Caucho son un 23% y 18% más bajas, lo que da a entender o validar lo que se expresa en tesis anteriores. Así sigue predominando las mezclas asfálticas con 0,5% de polvo de caucho, obteniendo el óptimo de polvo de caucho usando el 0,5%, ya que aumentando a 1% de polvo de caucho las propiedades mecánicas tienden a disminuir.

También, en la tabla 4-14 se expresa la superioridad de las estabilidades de las probetas con polvo de caucho sometidas a los ciclos hielo-deshielo, nuevamente predominado las con 0,5% Caucho, pero ahora se distingue el aumento estadísticamente significativo en la variación de las probetas aumentando a casi la mitad de la estabilidad. Investigaciones anteriores mostraron que la temperatura y la humedad son los factores de mayor impacto en el comportamiento del pavimento de asfalto [4], por lo que el paso de los ciclos hielo-deshielo en las probetas, las afecta en los valores de la estabilidad, puntualmente a las probetas con 0% Caucho. En la siguiente figura se muestra el gráfico en donde se aprecia de mejor manera el daño causado por los ciclos a las probetas.

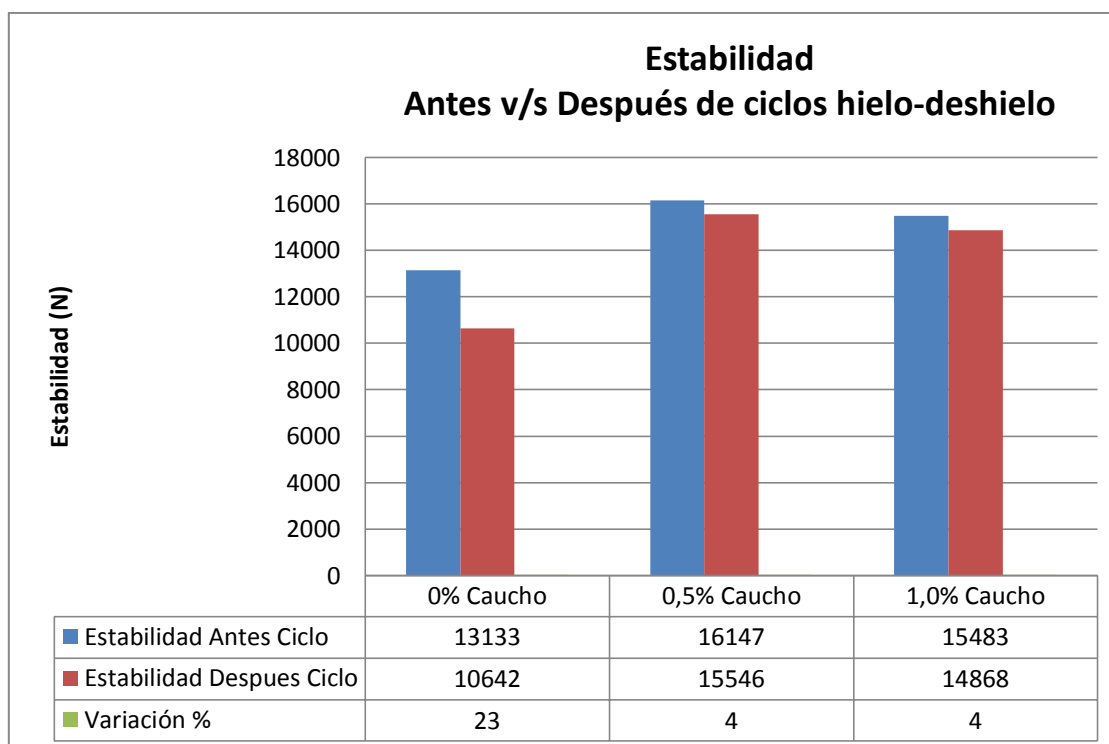


Figura 4-5: Gráfico Estabilidad Antes v/s Después ciclos hielo-deshielo

Tabla 4-15: Variación de la Estabilidad antes y después del ciclo hielo-deshielo

Probetas	Estabilidad		Variación Estabilidad
	Antes Ciclo	Después Ciclo	
0% Caucho	13133	10642	23%
0,5% Caucho	16147	15546	4%
1,0% Caucho	15483	14868	4%

Sin embargo es posible observar en la Tabla 4-15 que la pérdida de estabilidad producto de ciclos hielo-deshielo es mermada por la adición de caucho a la mezcla. Esto es prácticamente independiente del porcentaje de adición de caucho.

Como se mencionó anteriormente, las probetas expuestas a la simulación de los ciclos hielo-deshielo, poseen diferencias estadísticamente significativas y se vieron perjudicadas ya que los valores de la estabilidad disminuyeron, debido a la sensibilidad a la temperatura y la humedad, el rendimiento y capacidad de servicio del pavimento de asfalto son propensos a deteriorarse. Grietas térmicas, daño de la humedad y otros deterioros, son consecuencia de las bajas temperaturas en el pavimento de asfalto en regiones frías [5]. Se observa que las probetas 0% Caucho disminuyen considerablemente en un 23% después del ciclo hielo-deshielo, la mezcla asfáltica tradicional disminuye drásticamente las propiedades mecánicas debido a los constantes cambios de temperatura, específicamente el daño causado por la expansión del agua. Estos cambios producen un estrés en el pavimento, lo que produce agrietamiento cuando la tensión de tracción térmica en pavimentos asfálticos superan su resistencia a la tracción, esto va produciendo acumulación de micro-daños en lugar de formar grietas, pero después de numerosos ciclos hielo-deshielo la acumulación de micro-daños provoca grietas y otros deterioros del pavimento.

Por otra parte, el Manual de Carretera indica que los valores altos de estabilidad (sobre 14.000 (N)) pueden tener efectos adversos al colocar este tipo de mezcla en terreno, debido a que se asocia a un elemento de carácter frágil. Por otro lado, tener una mayor fluidez es indicio de que la resistencia mejora la fatiga, como es el caso de la mezcla con caucho, que a mayor cantidad de caucho, aumenta la fluidez, como se muestra en la Tabla 4-16.

Los valores de estabilidad en las probetas con polvo de caucho están directamente relacionados con los vacíos de la mezcla, son inversamente proporcionales, ya que a mayor estabilidad, menor es el porcentaje de vacíos, y si hay menos vacíos implica que el asfalto no se pueda reacomodar produciendo el fenómeno de exudación. A su vez al no haber tantos vacíos, ya que muchos de ellos están siendo ocupados por el polvo de caucho que no alcanza a mezclarse con el asfalto, el agua no tiene mucho espacio donde entrar. El agua causa la interrupción de la unión entre el asfalto y el agregado en la interfaz de asfalto-agregado. Este fallo prematuro de la adhesión se conoce comúnmente como decapado en pavimentos de asfalto [5].

Sin embargo según la Tabla 4-16, los valores de vacíos cumplen con lo que dice el Manual de Carretera. Por lo tanto, las mezclas con polvo de caucho logran alta estabilidad y alta fluidez, lo que le da resistencia y rigidez según lo primero y flexibilidad debido al polvo de caucho según lo

segundo. Teniendo un material resistente a la deformación plástica, con mayor estabilidad y fluidez actuando de forma apta frente a los ciclos hielo-deshielo.

Tabla 4-16: Parámetros Marshall mezcla con polvo de caucho

		0,5% Caucho	1,0% Caucho	Rangos
Caucho total	% ref. ag.	0,5	1	0,5 o 1
Densidad	kg/m ³	2343	2341	Informar
Huecos	%	4,8	5,0	Mín. 4 - Máx.6
Fluencia Antes C.	0,01"	15	16	Mín. 8 - Máx. 16
Fluencia Después C.	0,01"	16	17	Mín. 8 - Máx. 16

En la mezcla asfáltica con implementación de polvo de caucho, hay factores fundamentales para su correcto desempeño. El tiempo de digestión, tamaño de las partículas de polvo de caucho y el porcentaje. En este estudio se definió 1 hora de tiempo de digestión, polvo de caucho P-2 (granulometría media) y dos porcentajes (0,5% y 1,0 Caucho). En los resultados obtenidos se aprecia una superioridad de la mezcla con 0,5% Caucho, lo que se puede atribuir a que estas poseen menor cantidad de polvo de caucho, permitiendo la interacción casi completa de las partículas de caucho con el asfalto, permitiendo cambiar la reología del asfalto y mejorar las características mecánicas. En cambio para la mezcla con 1,0% Caucho una hora de digestión no es suficiente para que en la mezcla, el asfalto interactúe completamente con todo el polvo de caucho, quedando caucho libre, actuando como árido de baja resistencia.

4.3.2 Tracción Indirecta

En la Tabla 4-17, se resumen los resultados de la resistencia a la tracción indirecta (ITS) antes y después del ciclo hielo-deshielo, obtenidas para los distintos porcentajes de caucho utilizados, para mayor detalle dirigirse al Anexo D. Se incluye también la variación del ITS por efecto de la incorporación de polvo de caucho, tomando la mezcla asfáltica convencional como patrón de comparación.

Tabla 4-17: Resultados ITS antes y después del ciclo hielo-deshielo

Antes ciclo hielo-deshielo					
Probetas	Densidades (kg/cm ³)	ITS Seco (Mpa)	ITS Húmedo (Mpa)	ITS Promedio Antes Ciclo (Mpa)	Variación %
0% Caucho	2353	1,40	1,22	1,31	0
0,5% Caucho	2346	1,69	1,60	1,65	26
1,0% Caucho	2341	1,56	1,46	1,51	16
Después ciclo hielo-deshielo					
Probetas	Densidades (kg/cm ³)	ITS Seco (Mpa)	ITS Húmedo (Mpa)	ITS Promedio Después Ciclo (Mpa)	Variación %
0% Caucho	2355	1,18	1,01	1,10	0
0,5% Caucho	2342	1,56	1,48	1,52	38
1,0% Caucho	2340	1,40	1,32	1,36	24

De la Tabla, se observa que la resistencia a la Tracción Indirecta en las probetas con incorporación de polvo de caucho antes y después del ciclo hielo-deshielo, y en seco y húmedo poseen diferencias estadísticamente significativa que las probetas con mezcla asfáltica tradicional.

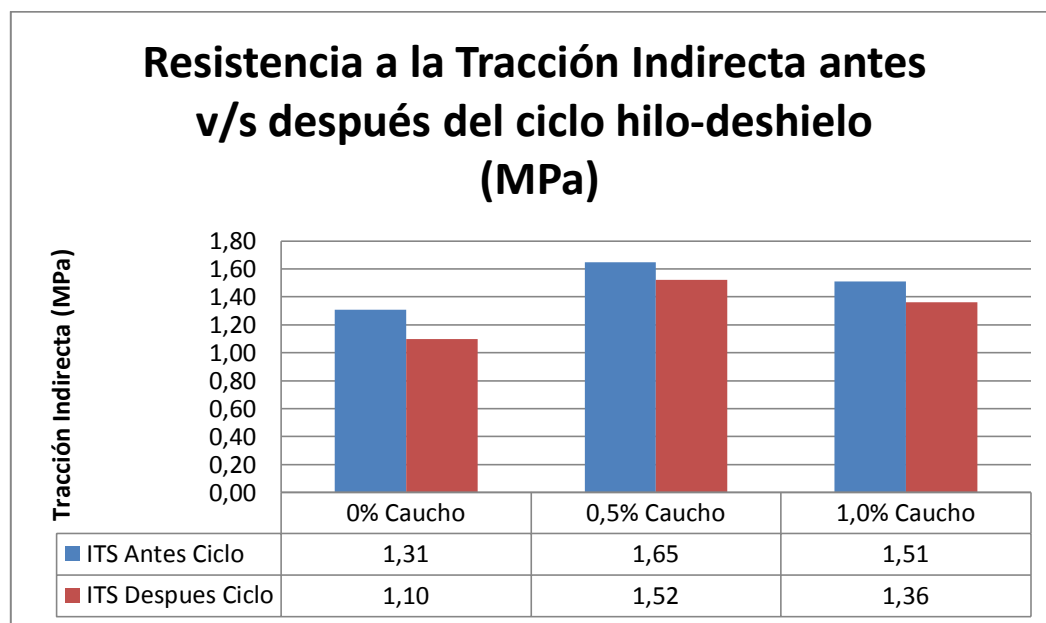


Figura 4-6: Resistencia a la Tracción Indirecta antes y después del ciclo hilo-deshielo

Primero, las probetas que no fueron expuestas al ciclo hielo-deshielo, específicamente las con 0% Caucho o probetas patrones son las que poseen un menor valor de ITS en comparación con las que tienen incorporado polvo de caucho. Probetas con 1,0% Caucho tras los resultados obtuvieron mayor ITS que las probetas patrones y menor resultado de ITS que las con 0,5% Caucho, dando a entender que al aumentar la cantidad de caucho en la mezcla no necesariamente aumenta las propiedades de la mezcla, por lo que se debe estimar un óptimo. Las probetas con 0,5% Caucho son las que obtienen estadísticamente mejor resultado en este ensayo, teniendo una variación en el ITS del 26% en comparación a las probetas patrones, con lo que queda claro que la adición de caucho a la mezcla asfáltica mejora las propiedades mecánicas de la mezcla.

Se debe tener en cuenta que, la resistencia a tracción indirecta de las mezclas asfálticas está definida principalmente por la cohesión que proporciona el asfalto, es decir, la propiedad de mantener ligadas las partículas de árido.

La incorporación de polvo de caucho por vía seca, tras el proceso de digestión, produce dos efectos en la mezcla asfáltica a la que se adiciona y que modifican su capacidad cohesiva resultante; una es aumentar la viscosidad del cemento asfáltico y la otra tiene relación con la variación de la cantidad de asfalto disponible en los huecos (V_b), no absorbido por el árido.

Las probetas expuestas al ciclo hielo-deshielo notoriamente sufrieron daño, ya que como muestra la tabla 4-17, tienden a reaccionar de la misma forma que las probetas que no fueron expuestas a los ciclos, pero se ve afectado su ITS, las probetas patrones son las con menor ITS y comparadas con las de 1,0% y 0,5% Caucho poseen un variación de 24% y 38% respectivamente, mucho mayor a las que no fueron expuestas a los ciclos.

En la tabla 4-18, compara los resultados de la resistencia a la tracción indirecta de las probetas antes y después de los ciclos hielo-deshielo, en donde se puede apreciar que las probetas más perjudicadas son las de 0% Caucho, con una variación del 19% en comparación del antes y después de los ciclos. Luego las probetas con adición de polvo de caucho poseen valores de ITS mayores y menores variaciones después de los ciclos, lo que lleva a entender que la utilización de polvo de caucho mejora la cohesión en la mezcla, permitiendo que esta actúe de mejor forma frente a los cambios climáticos.

Tabla 4-18: Variación ITS antes y después ciclos hielo-deshielo

Probetas	ITS Antes Ciclo (MPa)	ITS Después Ciclo (MPa)	Variación %
0% Caucho	1,31	1,10	19
0,5% Caucho	1,65	1,52	8
1,0% Caucho	1,51	1,36	11

Otro punto fundamental en el cual hay que hacer hincapié, es en la diferencia de ITS en seco y húmedo, ya que es ahí donde se aprecia el daño producido por el agua, mientras más variación, es mayor el impacto del agua en la mezcla y si a eso se le suma que el gran factor de daño en el ciclo hielo-deshielo es el cambio de volumen del agua cuando pasa de estado líquido a sólido.

Las probetas que poseen menor diferencia entre los resultados de ITS en seco y húmedo son las 0,5% Caucho, lo que es acorde con lo que se ha dicho anteriormente, en donde estas probetas se han desempeñado de la mejor forma antes los ciclos.

En el proceso de digestión, las partículas de caucho van progresivamente absorbiendo el asfalto incorporado. Mayores tiempos de digestión generan una mayor viscosidad del ligante, lo que mejora la capacidad cohesiva en la mezcla asfáltica modificada, pero disminuyen la cantidad de asfalto disponible entre las partículas de agregado (menores espesores de la película de asfalto), lo que reduce esta capacidad.

De esta manera, los resultados obtenidos responden a que la cohesión en una mezcla asfáltica modificada está principalmente definida por la cantidad de asfalto disponible en la mezcla, no absorbido por el polvo de caucho (ni el agregado), más que por la viscosidad del ligante, que también favorece esta propiedad pero en menor grado.

La incorporación de polvo de caucho a las mezclas asfálticas ensayadas a tracción indirecta han demostrado una mejoría en las propiedades mecánicas, ya que el caucho al ser un polímero, modifica su reología permitiendo adaptarse y actuar de mejor forma frente a los ciclos hielo-deshielo, permitiendo ser un material que posee menor susceptibilidad a la humedad (mejor cohesión), menos susceptibilidad térmica, mayor resistencia a la tracción, tanto en las condiciones secas como húmedas.

5. CAPÍTULO VI: Conclusiones y recomendaciones

En el presente capítulo, se da a conocer las conclusiones generales y específicas, además las recomendaciones para futuras investigaciones.

5.1 Conclusiones generales

Las probetas expuestas a los ciclos hielo-deshielo se vieron notoriamente afectadas en el comportamiento mecánico, existiendo diferencias significativas entre los grupos, bajando su resistencia notoriamente, ya sea en los ensayos de estabilidad marshall como en resistencia a la tracción indirecta.

Con respecto a la dosificación de las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho por vía seca, el óptimo de asfalto es el contenido mínimo que para una temperatura y un tiempo de digestión definidos, permite cumplir las exigencias de resistencia conservada a la acción del agua, determinada mediante el ensayo de inmersión-compresión o a tracción indirecta tras inmersión, manteniendo a la vez los criterios volumétricos (huecos), como también los de estabilidad y deformación marshall dentro de las especificaciones del Manual de Carreteras para mezclas asfálticas convencionales en carpeta (5.408.203 del M.C.-V.5), en el caso del estudio correspondió a 5,2% \pm 0,3% de asfalto con respecto al peso del árido.

El parámetro más crítico de la adición de polvo de caucho por vía seca es el tiempo de digestión, ya que es determinante en la calidad de la mezcla asfáltica modificada, además de la temperatura a la que se realiza la mezcla, la granulometría, el porcentaje de incorporación de polvo de caucho y el contenido de cemento asfáltico. En el caso del estudio correspondió a un tiempo de digestión de 1 hora, una temperatura de digestión de 170°C, granulometría del polvo de caucho P2 y se utilizó dos porcentajes de polvo de caucho (0,5% y 1,0%) con respecto al peso del árido.

Experiencias en Laboratorio Nacional de Vialidad determinaron que el tiempo de digestión óptimo era de 2 horas, siendo este tiempo un punto en contra, ya que se aleja de la realidad en obra, por lo que se optó por realizar las experiencias con 1 horas de tiempo de digestión, quedando demostrado en este trabajo de título que al trabajar con 1 horas de digestión y un porcentaje de 0,5% de polvo de caucho con respecto al peso del árido, mejora notoriamente las características de la mezcla asfáltica cumpliendo con las normas que la rigen, pero algo tan o más importante es su viabilidad en la implementación de esta mezcla asfáltica, ya que se asemeja o aproxima al

tiempo real que tiene la mezcla asfáltica desde la salida de la planta asfáltica hasta su colocación en obra, siendo este un punto principal para el auge de este material.

El caucho reciclado obtenido de neumáticos desechados, puede ser utilizado confiablemente para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas usándolo como un agregado (proceso seco). Por otro lado, la utilización del caucho trae beneficios ambientales al valorizar un desecho como son los neumáticos y solucionar el problema de la disposición final de ellos, disminuyendo la contaminación.

Si bien el polvo de caucho se incorpora como un árido en el proceso seco, no debe tratarse como tal, pues interactúa con el cemento asfáltico. Por la misma razón, no debe considerarse el polvo de caucho como un *filler* de aportación para afinar la granulometría de las mezclas.

La incorporación de polvo de caucho en las mezclas asfálticas en caliente puede aportar ventajas importantes desde el punto de vista técnico. Es factible su uso para mejorar el comportamiento a deterioros comunes de los pavimentos y además de una mejor respuesta a los cambios de temperaturas extremos (ciclo hielo-deshielo), ya que proporcionan un pavimento con mejores respuesta a los cambios de temperatura y así como también mayor resistencia a la fisuración por fatiga, al envejecimiento y susceptibilidad a la humedad. De esta manera, se aumenta la vida útil de los caminos y disminuyen los costos de mantenimiento.

5.2 Conclusiones específicas

5.2.1 Probetas sin exposición al ciclo hielo-deshielo

Las mezclas con incorporación de caucho (0,5% Caucho y 1,0% Caucho) mediante el proceso de vía seca en ensayos de estabilidad marshall obtuvieron estadísticamente mejores resultados que la mezcla asfáltica tradicional (0% Caucho), puntualmente la mezcla asfáltica con 0,5% de polvo de caucho y con 1 hora de digestión, es la que posee mayor resistencia obteniendo los valores más altos de la medición. Esto se debe a la incorporación de polvo de caucho, que hace aumentar la viscosidad del cemento asfáltico, mejora la cohesión y, en consecuencia, la estabilidad de las mezclas asfálticas.

Lo mismo ocurre para el ensayo de resistencia a la tracción indirecta en donde las mezclas con incorporación de caucho (0,5% Caucho y 1,0% Caucho) mediante el proceso de vía seca obtuvieron estadísticamente mejores resultados que la mezcla asfáltica tradicional (0% Caucho).

Destacando la capacidad del polvo de caucho de mejorar las propiedades mecánicas del pavimento. Nuevamente las probetas con 0,5% de polvo de caucho y con 1 hora de digestión fue la que obtuvo los mejores resultados en el presente ensayo, por sobre 0% Caucho y 1,0% Caucho, y a tener en cuenta que, la resistencia a tracción indirecta de las mezclas asfálticas está definida principalmente por la cohesión que proporciona el asfalto, es decir, la propiedad de mantener ligadas las partículas de árido.

5.2.2 Probetas con exposición al ciclo hielo-deshielo

Las probetas expuestas a los ciclos hielo-deshielo se vieron afectadas notoriamente, pero en particular, las con mezcla asfáltica tradicional, al contrario que las con adición de polvo de caucho, donde el efecto de este esfuerzo fue menor. Dando mérito al polvo de caucho, ya que no todo interactúa con el cemento asfáltico, quedando parte de este libre ocupando los huecos existentes en la mezcla, evitando en medida el ingreso de agua en los huecos. Si se considera que el agua es el gran problema en el fenómeno de ciclo hielo-deshielo, ya que causa la interrupción de la unión entre el asfalto y el agregado en la interfaz de asfalto-agregado. Este fallo prematuro de la adhesión se conoce comúnmente como decapado en pavimentos de asfalto.

En el ensayo de estabilidad marshall, se repite la tendencia de las probetas sin exposición a los ciclos hielo-deshielo. Las probetas sin adición de caucho presentaron estadísticamente la peor baja en la estabilidad, al contrario de las probetas con 0,5% Caucho que obtuvieron los mejores resultados. Dejando en claro la superioridad y los beneficios del polvo de caucho en la resistencia de las probetas ya sean para temperaturas normales como también para temperaturas extremas (ciclos hielo-deshielo).

Las probetas que se analizaron mediante el ensayo de resistencia a la tracción indirecta arrojaron que el mejor desempeño fue el de la mezcla asfáltica con 0,5% polvo de caucho, aunque al ser expuestas a los ciclos hielo-deshielo bajó notoriamente la resistencia, pero de todas maneras fueron superiores a los demás. Nuevamente destacando las probetas con adición de polvo de caucho por sobre la mezcla convencional, ya que el caucho al ser un polímero, modifica su reología permitiendo adaptarse y actuar de mejor forma frente a los ciclos hielo-deshielo, siendo así un material que posee menor susceptibilidad a la humedad (mejor cohesión), menos susceptibilidad térmica, mayor resistencia a la tracción, tanto en las condiciones secas como húmedas.

5.3 Recomendaciones

En función a las conclusiones anteriormente expuesta y considerando futuras investigaciones, se presentan a continuación una serie de recomendaciones con la intención de orientar de quienes decidan tomar como referencia éste documento.

- Analizar un diseño de una mezcla asfáltica con polvo de NFU nacional por vía seca que involucre la disminución del tiempo de digestión y evalúe sus propiedades en laboratorio y en terreno.
- Ejecutar un tramo de prueba que evalúe las propiedades mecánicas en terreno de las mezclas asfálticas usadas en el presente trabajo.
- Generar especificaciones técnicas a cerca de la mezcla asfáltica con polvo de NFU.
- En el presente trabajo de título no se sabe con certeza si las probetas llegaron a su deterioro máximo frente a los ciclos hielos-deshielo, ya que no existe una norma que rija esta simulación, ya sea en la cantidad y duración de los ciclos y los rangos de temperatura a utilizar. Por lo antes mencionado, se estima conveniente realizar un análisis completo para determinar la cantidad y duración de los ciclos para alcanzar el deterioro máximo de las probetas asfálticas frente a los ciclos hielo-deshielo, para lograr crear especificaciones técnicas y una normativa sobre la simulación en laboratorio de los ciclos hielo-deshielo.
- Con la dosificación óptima obtenida de la mezcla asfáltica con polvo de caucho (0,5% Caucho y 1 hora digestión), realizar un estudio comparativo entre las mezclas asfálticas tradicionales, mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho y mezcla asfáltica con adición de polímeros.

Bibliografía

- [1] www.msn.com/en-us/weather/records. Página web de MSN clima.
- [2] HUANG, YH. 2004. *Pavement analysis and design. 2nd ed. New Jersey: Prentice-Hall.*
- [3] Feng D, Yi J, Wang D, Chen L. 2010. *Impact of salt and freeze–thaw cycles on performance of asphalt mixtures in coastal frozen region of China. Cold Reg Sci Technol.*
- [4] HÖBEDA P. 1998. *Water sensitivity of asphalt pavements. Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI).*
- [5] SI W, MA B, XIAO N, GESANG ZR. 2003. *Analysis on compression characteristics of asphalt mixture under freeze–thaw cycles in cold plateau regions.*
- [6] KETTIL P., ENGSTRÖM G., WIBERG NE. 2005. *Coupled hydro-mechanical wave propagation in road structures. Comput Struct.*
- [7] ZHANG Z., DAMNJANOVI I. 2006. *Applying method of moments to model reliability of pavements infrastructure.*
- [8] ÖZGAN Ercan, SERIN Sercan. 2012. *Investigation of certain engineering characteristics of asphalt concrete exposed to freeze–thaw cycles.*
- [9] URRUTIA Torres, Ricardo. 2011. Evaluación cuantitativa del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas modificadas incorporando polvo de caucho de N.F.U. nacional mediante vía seca. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Santiago, Chile. Universidad Andrés Bello.
- [10] GALLEGO, Juan (Universidad Politécnica de Madrid, España). 2008. Tecnologías de mezclas bituminosas con caucho de neumáticos. Experiencia y normativa española.
- [11] WEI Si, BIAO Ma, NING Li, JUN-PING Ren, HAI-NIAN Wang. 2014. Reliability-based assessment of deteriorating performance to asphalt pavement under freeze–thaw cycles in cold regions.
- [12] CONAMA 2008, datos actualizados por ECOING

- [13] LABORATORIO NACIONAL DE VIALIDAD, MOP. Curso Laboratorista Vial. 5ª edición, Vol. II. Santiago, Chile, 2000.
- [14] CORTES, J. 1996. "Neumático: materia y energía reutilizable. Documento divulgativo de Neumáticos Michelin". Madrid.
- [15] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. 2012. 1a. ed. corregida. NCh 3258-2012. Mezclas asfálticas. Polvo de caucho proveniente de Neumáticos Fuera de Uso. Requisitos. Santiago, Chile.
- [16] RAZ, Tomás. 2007. "El polvo de neumático fuera de uso. Aplicaciones". Jornada Técnica sobre el empleo de polvo de neumático fuera de uso en mezclas bituminosas.
- [17] GALLEGO Medina, J. 1999. "Mezclas bituminosas modificadas por adición de polvo de neumáticos." Tesis doctoral.
- [18] SOTO, J. COLÁS, M^ªM. 2006. "Betunes modificados estables al almacenamiento mediante el empleo de polvo de caucho reactivado procedente de NFU's, para su uso en carreteras". IV Congreso Nacional de Firmes.
- [19] PÉREZ Lepe, A. y PÄES Dueñas, A. 2006. "Medida de la estabilidad del betún polvo de neumáticos por solubilidad en disolventes orgánicos." IV Congreso Nacional de Firmes.
- [20] MINISTERIO DE FOMENTO Y MEDIOAMBIENTE. 2007 España. Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas.
- [21] *California Department of Transportation. 2003. "Asphalt Rubber Usage Guide".*
- [22] VALENZUELA C. Cristóbal. 1995. Química general: introducción a la química teórica.
- [23] NAVARRO D. Nicole. 2013. Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho nacional de neumático fuera de uso (NFU) mediante vía seca. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.
- [24] www.es.wikipedia.org/wiki/Temperatura. Página web de Wikipedia.
- [25] JORQUERA R. Camilo, PEÑALOZA N. Andrea. 2013. Estudio comparativo del comportamiento de mezclas asfálticas modificadas versus mezclas asfálticas en caliente con polvo

de caucho de NFU nacional mediante vía seca. Memoria para obtener el Título de Ingeniero Civil en Obras Civiles. Universidad de Santiago de Chile.

[26] RAMÍREZ Palma, Náyade I. 2006. Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Santiago, Chile. Universidad de Chile.

[27] www.polambiente.cl. Página web de Polambiente S.A. Santiago, Chile. 2012.

Normas y Manuales

DIRECCION DE VIALIDAD, MOP. 2012. Manual de Carreteras, Volumen Nº 5, Especificaciones Técnicas Generales de Construcción. Santiago, Chile.

DIRECCION DE VIALIDAD, MOP. 2012. Manual de Carreteras, Volumen Nº 8, Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control. Santiago, Chile.

NORMA AASHTO. *American Association of State Highway and Transportation Officials. T 324-04. Hamburg Wheel - Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA).*

NORMA NLT-161/98. Resistencia a la compresión simple de mezclas bituminosas.

NORMA NLT-162/84. Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas compactadas.

NORMA NLT-346/90. Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas.

NORMA UNE-EN 12697-12. 2006. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12. Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa.

NORMA UNE-EN 12697-23. 2004. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 23. Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas.

Anexo A

Diseño Marshall

Tabla A. 1: Resultados determinación porcentaje óptimo de asfalto

densidad efectiva	2658	kg/m3					
densidad asfalto	1020	kg/m3					
densidad real seca	2647	kg/m3					
C-24*	% ref. ag.	4,5	5	5,5	6	6,5	Rangos
Asfalto total	% ref. ag.	4,5	5	5,5	6	6,5	
DMM	kg/m3	2486	2469	2453	2437	2421	
Densidad Bitumix	kg/m3	2316	2333	2344	2336	2332	
Densidad propia	kg/m3	2320	2338	2348	2336	2330	
Huecos	%	6,7	5,3	4,3	4,1	3,7	4-6
V.A.M.	%	16,1	15,9	15,9	16,7	17,3	min 14
Huecos Llenos	%	59	67	73	75	78	
Fluencia	0,01"	12,3	13,7	14,3	15,4	16,5	8-16
Estabilidad	N	9697	9901	9765	9682	9509	min 9000
Porcentaje Óptimo		huecos					
Óptimo por	5,5	4,3					
Óptimo por	5	5,3					
Óptimo para	5,2						
Optimo a usar	5,2	+/- 0,3					

Anexo B

Sensibilidad al agua

Tabla B. 1: Características de las probetas

%CAUCHO	0,5% (A-F), 1% (g-L)
%ASFALTO	5,2 +- 0,3
GRANULOMETRIA	P2
Numero Goles	50 P/ cara

Tabla B. 2: Verificación de probetas en cámara de presión

VERIFICACION PROBETAS CAMARA PRESIÓN						
Probetas	Antes			Después		
	A	B	C	A	B	C
h1	61,4	62	63,6	61,25	61,9	63,5
h2	61,1	62,1	63,4	61	62,05	63,5
h3	61,4	62,2	63,6	61,1	62,2	63,5
h4	61,4	62,2	63,8	61,3	61,96	63,8
d1	102,73	101,38	101,52	102,73	101,51	101,35
d2	102,78	101,57	101,59	102,56	101,56	101,55
Hprom	61,3	62,1	63,6	61,2	62,0	63,6
Dprom	102,8	101,5	101,6	102,6	101,5	101,5
Vol Cm3	1017,1	1004,9	1030,3	1012,2	1004,5	1027,8
Diferencia < 2%				0,48	0,04	0,25
CUMPLE						

Tabla B. 3: Detalle probetas asfálticas

PROBETAS	Caucho (g)	Asfalto (g)	Aridos (g)
A	5,5	59,1	1093,5
B	5,5	59,1	1094,5
C	5,5	59,1	1094,1
D	5,5	59,1	1093,9
E	5,5	59,1	1094,3
F	5,5	59,1	1093,3
G	10,9	59,2	1093
H	11	59,3	1094
I	11	59,2	1094,9
J	11	59,2	1094,3
K	11	59,3	1094,8
L	11	59,3	1094

Tabla B. 4: Alturas probetas asfálticas

PROBETAS	Caucho (g)	ALTURAS (mm)			
		h2	h3	h4	hProm
A	5,5	61,1	61,4	61,4	61,3
B	5,5	62,1	62,2	62,2	62,1
C	5,5	63,4	63,6	63,8	63,6
D	5,5	60,7	60,7	60,6	60,8
E	5,5	62,6	62,7	62,5	62,6
F	5,5	63,3	63	63	63,1
G	10,9	62,7	62,7	62,7	62,7
H	11	62,4	62,6	62,4	62,5
I	11	62,8	62,9	62,9	62,8
J	11	62	62,2	62,3	62,2
K	11	62,8	62,9	63,1	62,9
L	11	62,9	62,8	62,8	62,8

Tabla B. 5: Densidades probetas asfálticas

a	Masa de la probeta en aire (g)
b	Masa de la probeta en aire con superf. Seca (g)
c	Masa de la probeta en agua (g)

		SEGÚN 8.302.38					
PROBETAS	Caucho (g)	PORCENTAJE DE AGUA ABSORBIDA < 2				Densidades	
		a	c	b	Aab %	Brisquetas Kg/m3	
A	5,5	1144,5	646,1	1145,9	0,3	2290	
B	5,5	1146,1	645,7	1147,1	0,2	2286	
C	5,5	1140,8	648,2	1146	1,0	2292	
D	5,5	1143,7	645,3	1144	0,1	2293	
E	5,5	1146,2	646	1147,6	0,3	2285	
F	5,5	1143,1	646,4	1144	0,2	2297	
G	10,9	1153,5	648,3	1153,8	0,1	2282	
H	11	1151	645,6	1151,1	0,0	2277	
I	11	1155,9	649,8	1157,2	0,3	2278	
J	11	1150,8	648,3	1152,9	0,4	2281	
K	11	1153,2	648,7	1154,2	0,2	2281	
L	11	1149,9	645,4	1150,3	0,1	2277	

Tabla B. 6: Resultados resistencia conservada por tracción indirecta tras inmersión de la mezcla asfáltica

		SEGÚN NORMA ESPAÑOLA UNE-EN 12697-23						
PROBETAS	Caucho (g)	TRACCIÓN INDIRECTA						
		Estado probeta	Dprom	P (kN)	ITS (Mpa)	ITS Prom	ITSR % > 85%	
A	5,5	Saturada	102,7	11,10	1,12	1,11	87	Cumple
B	5,5	Saturada	101,6	11,38	1,15			
C	5,5	Saturada	101,6	10,68	1,05			
D	5,5	Seca	102,7	13,26	1,35	1,28		
E	5,5	Seca	101,6	12,82	1,28			
F	5,5	Seca	101,7	12,03	1,19			
G	10,9	Saturada	101,9	10,16	1,01	1,00	85	Cumple
H	11	Saturada	101,8	9,91	0,99			
I	11	Saturada	101,7	10,07	1,00			
J	11	Seca	102,6	11,62	1,16	1,17		
K	11	Seca	101,8	11,92	1,19			
L	11	Seca	101,6	11,79	1,18			

Anexos C

Parámetros Marshall

- Probetas analizadas antes ciclos hielo-deshielo

Tabla C. 1: Detalles de confección de probetas asfálticas

	Confección de Briquetas						
	% Asfalto	Temp	Temp	Nº	Peso	Peso	Peso
		Mezclado	Comp	Probeta	Material	Asfalto	Caucho
	°C	°C		(gr)	(gr)	(gr)	
Sin Ciclo Hielo-Deshielo	5,2 +- 0,3	145-170	120-160	7	1095,1	57,1	0
				8	1095,4	57	0
				9	1096,1	56,8	0
				10	1096,5	57,1	0
	5,2+- 0,3	145-170	120-160	29	1095,8	57,1	5,4
				30	1095,4	56,9	5,5
				31	1096,1	56,9	5,4
				32	1096,1	56,9	5,4
	5,2+- 0,3	145-170	120-160	49	1095,0	57,1	11
				50	1095,2	57,1	11
				51	1095,2	57,1	11
				52	1094,7	57	11

Tabla C. 2: Alturas probetas asfálticas

	Determinación de la alturas de las Briquetas					
	Nº	Altura (mm)				
	Probeta	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	h4 (mm)	Promedio (mm)
Sin Ciclo Hielo- Deshielo	7	60,8	61,0	60,8	60,8	60,9
	8	61,9	61,9	61,7	61,7	61,8
	9	61,1	61,3	61,0	61,0	61,1
	10	61,6	61,6	61,5	61,6	61,6
	29	62,4	62,3	62,4	62,3	62,4
	30	62,7	63,9	63,8	63,8	63,6
	31	61,6	61,6	61,4	61,5	61,5
	32	61,0	61,0	61,0	61,0	61,0
	49	62,7	62,8	63,0	62,8	62,8
	50	61,0	61,3	61,2	61,5	61,3
	51	62,6	62,6	62,7	62,7	62,7
	52	62,5	62,5	62,5	62,3	62,5

Tabla C. 3: Densidades probetas asfálticas

	Determinación de la Absorción de agua y Densidad de las Briquetas						
	Nº	Pesos (gr)			Absorción	Densidad	Promedio
	Probeta	Seco	Bajo agua	S.S.S	Agua (%)	(kg./m3)	Densidad
							(kg./m3)
Sin Ciclo Hielo- Deshielo	7	1141,7	656,0	1142,1	0,082	2348,7	2353
	8	1143,6	659,0	1144,7	0,226	2354,5	
	9	1143,6	658,5	1144,2	0,124	2354,5	
	10	1143,2	658,0	1143,7	0,103	2353,7	
	29	1143,8	658,5	1146,3	0,513	2344,8	2345
	30	1141,6	661,0	1147,7	1,253	2345,6	
	31	1142,5	659,9	1147,4	1,005	2343,6	
	32	1145,2	659,5	1147,4	0,451	2347,2	
	49	1153,9	663,3	1156,1	0,446	2341,5	2341
	50	1155,4	664,0	1157,5	0,426	2341,2	
	51	1152,6	662,6	1154,6	0,407	2342,7	
	52	1151,6	661,0	1153,1	0,305	2340,2	

Tabla C. 4: Determinación de Fluidez y Estabilidad de probetas asfálticas

	Determinación de Fluidez y Estabilidad de las Briquetas						
	Nº	Fluidez	Estabilidad	Factor	Estabilidad	Promedio	Promedio
	Probeta	Lectura	lectura	Corrección		Fluidez	Estabilidad
		(,01")	(N)	Altura	(N)	(,01")	(N)
Sin Ciclo Hielo- Deshielo	7	13	12546,2	1,074	13475	13	13133
	8	13	12551,2	1,046	13129		
	9	12	12153	1,068	12979		
	10	14	12123,3	1,068	12948		
	29	15	15886,6	1,029	16347	15	16147
	30	15	15682,4	0,998	15651		
	31	15	15751,9	1,056	16634		
	32	14	15108,5	1,056	15955		
	49	15	14982,3	1,019	15267	16	15483
	50	15	15017,5	1,062	15949		
	51	15	15073,8	1,021	15390		
	52	17	15010,3	1,021	15326		

- Probetas analizadas después ciclos hielo-deshielo

Tabla C. 5: Detalles de confección de probetas asfálticas

	Confección de Briquetas						
	% Asfalto	Temp	Temp	Nº	Peso	Peso	Peso
		Mezclado	Comp	Probeta	Material	Asfalto	Caucho
	°C	°C		(gr)	(gr)	(gr)	
Sin Ciclo Hielo-Deshielo	5,2 +- 0,3	145-170	120-160	7	1095,1	57,1	0
				8	1095,4	57	0
				9	1096,1	56,8	0
				10	1096,5	57,1	0
	5,2+- 0,3	145-170	120-160	29	1095,8	57,1	5,4
				30	1095,4	56,9	5,5
				31	1096,1	56,9	5,4
				32	1096,1	56,9	5,4
	5,2+- 0,3	145-170	120-160	49	1095,0	57,1	11
				50	1095,2	57,1	11
				51	1095,2	57,1	11
				52	1094,7	57	11

Tabla C. 6: Alturas probetas asfálticas

	Determinación de la alturas de las Briquetas					
	Nº	Altura (mm)				
	Probeta	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	h4 (mm)	Promedio (mm)
Con Ciclo Hielo- Deshielo	17	61,4	61,2	61,2	61,2	61,3
	18	61,8	62,0	62,1	62,0	62,0
	19	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0
	20	60,8	60,9	60,9	60,8	60,9
	21	63,6	63,8	63,8	63,8	63,8
	22	62,8	62,9	62,9	62,8	62,9
	39	62,0	61,8	62,2	61,9	62,0
	40	61,8	62,0	61,9	61,9	61,9
	41	60,3	60,3	60,4	60,5	60,4
	42	61,6	61,6	61,7	61,7	61,7
	43	62,2	62,5	62,6	62,2	62,4
	44	62,3	62,4	62,4	62,4	62,4
	59	62,3	62,2	62,1	62,0	62,2
	60	61,9	61,9	61,6	61,6	61,8
	61	61,7	61,6	61,8	61,5	61,7
	62	61,8	61,7	61,5	61,7	61,7
	63	61,9	61,9	61,6	61,7	61,8
64	59,0	59,3	59,1	59,3	59,2	

Tabla C. 7: Densidades probetas asfálticas

	Determinación de la Absorción de agua y Densidad de las Briquetas						
	Nº	Pesos (gr)			Absorción	Densidad	Promedio
	Probeta	Seco	Bajo agua	S.S.S	Agua (%)	(kg./m3)	Densidad
							(kg./m3)
Con Ciclo Hielo-Deshielo	17	1145,2	660,6	1146,3	0,226	2357,8	2356
	18	1144,1	660,0	1146,3	0,452	2352,7	
	19	1144,3	661,5	1147,4	0,638	2355,0	
	20	1146,4	661,0	1147,8	0,288	2355,0	
	21	1140,0	663,0	1147,0	1,446	2355,4	
	22	1139,4	660,0	1143,3	0,807	2357,5	
	39	1146,8	658,6	1148,0	0,245	2343,3	2341
	40	1144,1	657,0	1145,2	0,225	2343,5	
	41	1146,7	658,0	1148,2	0,306	2339,2	
	42	1143,7	656,0	1144,9	0,245	2339,3	
	43	1143,2	657,0	1145,6	0,491	2339,7	
	44	1141,5	656,0	1143,2	0,349	2343,0	
	59	1152,2	660,6	1154,5	0,466	2332,9	2340
	60	1141,4	657,0	1144,0	0,534	2343,7	
	61	1149,8	660,8	1152,2	0,488	2339,8	
	62	1145,8	658,0	1147,4	0,327	2341,2	
	63	1150,1	659,6	1151,2	0,224	2339,5	
	64	1146,4	657,6	1147,2	0,163	2341,5	

Tabla C. 8: Determinación de Fluidez y Estabilidad de probetas asfálticas

	Determinación de Fluidez y Estabilidad de las Briquetas						
	Nº	Fluidez	Estabilidad	Factor	Estabilidad	Promedio	Promedio
	Probeta	Lectura	lectura	Corrección		Fluidez	Estabilidad
		(,01")	(N)	Altura	(N)	(,01")	(N)
Con Ciclo Hielo-Deshielo	17	14	10128,9	1,062	10757	14	10642
	18	13	10193,5	1,04	10601		
	19	14	10290	1,04	10702		
	20	15	10100,8	1,074	10848		
	21	14	10140,6	0,993	10070		
	22	14	10705,5	1,016	10877		
	39	15	14884,4	1,04	15480	16	15546
	40	15	14896,4	1,043	15537		
	41	15	14786,5	1,09	16117		
	42	16	14829,1	1,049	15556		
	43	16	15004,5	1,024	15365		
	44	16	14865,8	1,024	15223		
	59	17	14079,7	1,035	14572	17	14868
	60	16	13876,5	1,046	14515		
	61	16	14043,9	1,049	14732		
	62	17	13980,8	1,049	14666		
	63	18	14310,6	1,046	14969		
	64	18	13965	1,128	15753		

Anexo D

Tracción Indirecta

- Probetas analizadas antes ciclos hielo-deshielo

Tabla D. 1: Detalles de confección de probetas asfálticas

	Confección de Briquetas						
	% Asfalto	Temp	Temp	Nº	Peso	Peso	Peso
		Mezclado	Comp	Probeta	Material	Asfalto	Caucho
	°C	°C		(gr)	(gr)	(gr)	
Inicial	5,2 +- 0,3	145-170	120-160	1	1096,0	57,1	0
				2	1095,0	57	0
				3	1096	57,1	0
				4	1096,3	57,3	0
				5	1094,7	57	0
				6	1095,3	57,1	0
	5,2 +- 0,3	145-170	120-160	23	1096,2	57,1	5,4
				24	1095,9	57,2	5,4
				25	1095	57	5,4
				26	1094,6	57	5,4
				27	1094,8	57,2	5,5
				28	1094,2	56,9	5,4
	5,2 +- 0,3	145-170	120-160	43	1094,0	57	11
				44	1093,0	56,9	11
				45	1095	57	11
				46	1094,3	57	11
				47	1095,4	57,1	11
				48	1095,0	57,1	11

Tabla D. 2: Alturas probetas asfálticas

	Determinación de la alturas de las Briquetas					
	Nº	Altura (mm)				
	Probeta	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	h4 (mm)	Promedio (mm)
Inicial	1	61,8	62,1	62,2	61,9	62,0
	2	63,9	63,6	63,4	63,6	63,6
	3	61,8	61,9	61,6	61,6	61,7
	4	61,9	61,9	62,4	62,4	62,2
	5	61,6	61,6	61,6	61,6	61,6
	6	61,6	61,8	61,6	61,6	61,7
	23	63,5	63,6	63,3	63,3	63,4
	24	61,0	61,1	61,2	61,2	61,1
	25	63,6	63,3	63,5	63,3	63,4
	26	63	63,1	63	63	63,0
	27	63,8	63,5	63,6	63,7	63,7
	28	62,2	62,3	62,4	62,2	62,3
	43	63,6	63,8	63,8	63,9	63,8
	44	62,4	62,6	62,5	62,7	62,6
	45	62,4	62,4	62,5	62,4	62,4
	46	62,4	62,5	62,2	62,2	62,3
	47	63,4	63,5	63,6	63,5	63,5
	48	61,4	61,4	61,4	61,4	61,4

Tabla D. 3: Densidades probetas asfálticas

	Determinación de la Absorción de agua y Densidad de las Briquetas						
	Nº	Pesos (gr)			Absorción	Densidad	Promedio
	Probeta	Seco	Bajo agua	S.S.S	Agua (%)	(kg./m3)	Densidad
							(kg./m3)
Sin Ciclo Hielo-Deshielo	1	1143,9	659,7	1145,7	0,4	2353,7	2353
	2	1141,6	659,0	1144,7	0,6	2350,4	
	3	1138,3	657	1140,2	0,4	2355,8	
	4	1141,7	657	1142,4	0,1	2352,1	
	5	1141,3	656,8	1141,8	0,1	2353,2	
	6	1137,7	657,0	1140,4	0,6	2353,5	
	23	1139,6	659,0	1144,5	1,0	2347,3	2346
	24	1139,5	656,8	1141,8	0,5	2349,5	
	25	1144,3	661,5	1149,4	1,0	2345,4	
	26	1140,3	660,3	1146,2	1,2	2346,8	
	27	1137,6	658,5	1143,4	1,2	2346,1	
	28	1140,9	657,0	1143,8	0,6	2343,7	
	43	1149,1	663,7	1154,4	1,1	2341,8	2341
	44	1150,3	662,3	1153,3	0,6	2342,8	
	45	1150,2	660,9	1152,5	0,5	2339,7	
	46	1150,9	664	1155,3	0,9	2342,6	
	47	1150,9	663	1154,7	0,8	2340,7	
	48	1152,1	661,2	1154,0	0,4	2337,9	

Tabla D. 4: Determinación de Resistencia a la Tracción Indirecta

Nº	Determinación de la Tracción Indirecta								
	Probeta	Estado	Diametro probetas			P	ITS	ITS	ITS
	Probetas		d1	d2	Dprom	(kN)	(Mpa)	Promedio	Final
Sin Ciclo Hielo-Deshielo	1	Saturado	101,8	101,5	101,7	12,032	1,22	1,22	1,31
	2	Saturado	101,4	101,5	101,5	12,131	1,20		
	3	Saturado	101,83	101,86	101,845	12,182	1,23		
	4	Seco	101,53	101,55	101,5	13,838	1,40	1,40	
	5	Seco	101,6	101,61	101,6	13,701	1,39		
	6	Seco	102,7	102,5	102,61	13,990	1,41		
	23	Saturado	101,9	102,0	101,9	16,003	1,58	1,60	1,65
	24	Saturado	102,3	102,5	102,4	16,077	1,64		
	25	Saturado	101,51	101,42	101,465	16,181	1,60		
	26	Seco	101,6	101,61	101,6	16,902	1,68	1,69	
	27	Seco	101,67	101,69	101,7	17,060	1,68		
	28	Seco	101,7	101,6	101,64	17,029	1,71		
	43	Saturado	101,6	101,7	101,7	14,716	1,44	1,46	1,51
	44	Saturado	101,6	101,7	101,7	14,749	1,48		
	45	Saturado	101,82	101,78	101,8	14,614	1,46		
	46	Seco	101,58	101,71	101,6	15,474	1,55	1,56	
	47	Seco	101,5	101,57	101,5	15,679	1,55		
	48	Seco	102,6	102,7	102,645	15,552	1,57		

- Probetas analizadas después ciclos hielo-deshielo

Tabla D. 5: Detalles de confección de probetas asfálticas

	Confección de Briquetas						
	% Asfalto	Temp	Temp	Nº	Peso	Peso	Peso
		Mezclado	Comp	Probeta	Material	Asfalto	Caucho
	°C	°C		(gr)	(gr)	(gr)	
Ciclo Hielo-Deshielo	5,2 +- 0,3	145-170	120-160	11	1095,9	56,9	0
				12	1095,8	57	0
				13	1096	57	0
				14	1096,1	57,1	0
				15	1096,2	57	0
				16	1098,0	57,2	0
	5,2 +- 0,3	145-170	120-160	33	1095,7	59,2	5,5
				34	1094,9	59,1	5,5
				35	1095,5	59,1	5,5
				36	1095	59,1	5,5
				37	1094,6	59,1	5,5
				38	1094,7	59,1	5,5
	5,2 +- 0,3	145-170	120-160	53	1094,3	59,2	11
				54	1095,2	59,1	11
				55	1094,7	59,2	11
				56	1095	59,2	11
				57	1095,2	59,1	11
				58	1094,8	59,2	11

Tabla D. 6: Alturas probetas asfálticas

	Determinación de la alturas de las Briquetas					
	Nº	Altura (mm)				
	Probeta	h1	h2	h3	h4	Promedio
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Ciclo Hielo- Deshielo	11	61,0	61,1	61,3	61,1	61,1
	12	61,5	61,4	61,8	61,4	61,5
	13	61	61,1	61	60,8	61,0
	14	61	61,3	61,2	61	61,1
	15	61,4	61,4	61,4	61,3	61,4
	16	61,0	60,9	61,0	61,0	61,0
	33	61,5	61,9	61,8	61,5	61,7
	34	61,6	61,7	62,0	61,5	61,7
	35	61,2	61,2	61,3	61,3	61,3
	36	60,5	60,8	61	60,6	60,7
	37	61,4	61,7	61,6	61,6	61,6
	38	60,3	60,0	60,2	60,0	60,1
	53	61,9	61,6	61,9	61,6	61,8
	54	60,7	60,9	60,8	60,6	60,8
	55	63,3	63,6	63,5	63,7	63,5
	56	62	62,2	62,1	62,1	62,1
	57	62,7	62,8	62,7	62,7	62,7
	58	62,7	62,5	62,7	62,7	62,7

Tabla D. 7: Densidades probetas asfálticas

	Determinación de la Absorción de agua y Densidad de las Briquetas						Promedio Densidad (kg./m3)
	Nº	Pesos (gr)			Absorción	Densidad	
	Probeta	Seco	Bajo agua	S.S.S	Agua (%)	(kg./m3)	
Con Ciclo Hielo- Deshielo	11	1145,2	660,0	1146,3	0,2	2354,9	2355
	12	1146,8	661,0	1148,1	0,3	2354,3	
	13	1142,5	658	1143,7	0,2	2352,3	
	14	1144,4	660	1145,8	0,3	2355,7	
	15	1143,2	660,5	1146,1	0,6	2354,2	
	16	1137,6	657,2	1140,0	0,5	2356,3	
	33	1146,6	659,0	1148,0	0,3	2344,8	2342
	34	1139,7	655,1	1141,5	0,4	2343,1	
	35	1144,3	656,3	1145,8	0,3	2337,7	
	36	1141,7	656,1	1142,8	0,2	2345,8	
	37	1146,9	659	1148,2	0,3	2344,4	
	38	1137,6	653,0	1139,5	0,4	2338,3	
	53	1150,3	661,4	1152,2	0,4	2343,7	2340
	54	1149,8	660,0	1150,7	0,2	2343,2	
	55	1147,4	659,4	1150,2	0,6	2337,8	
	56	1147,4	658,9	1149,6	0,4	2338,3	
	57	1152,7	662,3	1156,3	0,7	2333,4	
	58	1146,6	660,2	1149,5	0,6	2343,3	

Tabla D. 8: Determinación de la Resistencia a la Tracción Indirecta

	Nº	Determinación de la Tracción Indirecta								
		Probeta	Estado	Diametro probetas			P (kN)	ITS (Mpa)	ITS Promedio	ITS Final
				d1	d2	Dprom				
Con Ciclo Hielo- Deshielo	11	Saturado	101,5	101,6	101,6	9,9	1,01	1,01	1,10	
	12	Saturado	101,7	101,7	101,7	10,0	1,02			
	13	Saturado	101,6	101,6	101,6	9,7528	1,00			
	14	Seco	101,8	101,9	101,9	11,5054	1,18	1,18		
	15	Seco	102,7	102,8	102,8	11,7588	1,19			
	16	Seco	102,6	102,6	102,6	11,7	1,19			
	33	Saturado	101,9	101,9	101,9	14,5	1,47	1,48	1,52	
	34	Saturado	101,9	101,9	101,9	14,8	1,50			
	35	Saturado	101,6	101,9	101,75	14,5418	1,49			
	36	Seco	101,6	101,6	101,6	15,163	1,56	1,56		
	37	Seco	101,6	101,5	101,6	14,9855	1,53			
	38	Seco	102,7	102,7	102,7	15,3	1,58			
	53	Saturado	102,7	103,1	102,9	13,3	1,33	1,32	1,36	
	54	Saturado	101,9	101,9	101,9	13,2	1,36			
	55	Saturado	101,9	101,6	101,75	12,8856	1,27			
	56	Seco	102,2	101,8	102,0	14,1306	1,42	1,40		
	57	Seco	102	101,8	101,9	13,9085	1,39			
	58	Seco	101,9	101,8	101,85	14,0	1,39			

Anexo D

Distribución t de Student

Distribución T de Student

En probabilidad y estadística, la distribución t (de Student) es una distribución de probabilidad que surge del problema de estimar la media de una población normalmente distribuida cuando el tamaño de la muestra es pequeño.

Aparece de manera natural al realizar la prueba t de Student para la determinación de las diferencias entre dos medias muestrales y para la construcción del intervalo de confianza para la diferencia entre las medias de dos poblaciones cuando se desconoce la desviación típica de una población y ésta debe ser estimada a partir de los datos de una muestra. Todo el análisis se realizó en el programa Excel 2010.

En donde $\alpha = 0,05$

Si $\alpha > P(t \geq t)$, existe diferencia estadísticamente significativa.

Si $\alpha \leq P(t \geq t)$, no existe diferencia estadísticamente significativa.

Antes Ciclo hielo-deshielo		
0% vs 0,5%		
Prueba t para medias de dos muestras emparejadas		
	Variable 1	Variable 2
Media	13132,57	16146,73
Varianza	58218,67	186769,23
Observaciones	4,0000	4,0000
Coeficiente de correlación de Pearson	0,1007	
Diferencia hipotética de las medias	0,0000	
Grados de libertad	3,0000	
Estadístico t	-12,7374	
P(T<=t) una cola	0,0005220	
Valor crítico de t (una cola)	2,3534	
P(T<=t) dos colas	0,0010439	
Valor crítico de t (dos colas)	3,1824	
0% vs 1,0%		
Prueba t para medias de dos muestras emparejadas		
	Variable 1	Variable 2
Media	13132,5656	15482,8537
Varianza	58218,6696	98942,055
Observaciones	4,0000	4,0000
Coeficiente de correlación de Pearson	-0,1425	
Diferencia hipotética de las medias	0,0000	
Grados de libertad	3,0000	
Estadístico t	-11,1165	
P(T<=t) una cola	0,0007799	
Valor crítico de t (una cola)	2,3534	
P(T<=t) dos colas	0,0015597	
Valor crítico de t (dos colas)	3,1824	
0,5% vs 1,0%		
Prueba t para medias de dos muestras emparejadas		
	Variable 1	Variable 2
Media	16146,7323	15482,8537
Varianza	186769,227	98942,055
Observaciones	4,0000	4,0000
Coeficiente de correlación de Pearson	-0,7087	
Diferencia hipotética de las medias	0,0000	
Grados de libertad	3,0000	
Estadístico t	1,9197	
P(T<=t) una cola	0,0753417	
Valor crítico de t (una cola)	2,3534	
P(T<=t) dos colas	0,1506834	
Valor crítico de t (dos colas)	3,1824	
no cumple		

Después Ciclo hielo-deshielo		
0% vs 0,5%		
Prueba t para medias de dos muestras emparejadas		
	Variable 1	Variable 2
Media	10726,9978	15565,0495
Varianza	10686,017	154171,226
Observaciones	4,0000	4,0000
Coefficiente de correlación de Pearson	-0,1540	
Diferencia hipotética de las medias	0,0000	
Grados de libertad	3,0000	
Estadístico t	-22,9758	
P(T<=t) una cola	0,0000903	
Valor crítico de t (una cola)	2,3534	
P(T<=t) dos colas	0,0001806	
Valor crítico de t (dos colas)	3,1824	
0% vs 1,0%		
Prueba t para medias de dos muestras emparejadas		
	Variable 1	Variable 2
Media	10726,9978	14720,4042
Varianza	10686,017	35706,6939
Observaciones	4,0000	4,0000
Coefficiente de correlación de Pearson	0,4080	
Diferencia hipotética de las medias	0,0000	
Grados de libertad	3,0000	
Estadístico t	-45,7660	
P(T<=t) una cola	0,0000115	
Valor crítico de t (una cola)	2,3534	
P(T<=t) dos colas	0,0000230	
Valor crítico de t (dos colas)	3,1824	
0,5% vs 1,0%		
Prueba t para medias de dos muestras emparejadas		
	Variable 1	Variable 2
Media	15565,0495	14720,4042
Varianza	154171,226	35706,6939
Observaciones	4,0000	4,0000
Coefficiente de correlación de Pearson	-0,8437	
Diferencia hipotética de las medias	0,0000	
Grados de libertad	3,0000	
Estadístico t	3,0095	
P(T<=t) una cola	0,0286175	
Valor crítico de t (una cola)	2,3534	
P(T<=t) dos colas	0,0572349	
Valor crítico de t (dos colas)	3,1824	
	No cumple	

0% antes y después		
Prueba t para medias de dos muestras emparejadas		
	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	13132,5656	10726,9978
Varianza	58218,6696	10686,017
Observaciones	4,0000	4,0000
Coefficiente de correlación de Pearson	-0,1042	
Diferencia hipotética de las medias	0,0000	
Grados de libertad	3,0000	
Estadístico t	17,6736	
P(T<=t) una cola	0,0001975	
Valor crítico de t (una cola)	2,3534	
P(T<=t) dos colas	0,0003949	
Valor crítico de t (dos colas)	3,1824	
0,5% antes y después		
Prueba t para medias de dos muestras emparejadas		
	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	16146,7323	15565,0495
Varianza	186769,227	154171,226
Observaciones	4,0000	4,0000
Coefficiente de correlación de Pearson	0,1641	
Diferencia hipotética de las medias	0,0000	
Grados de libertad	3,0000	
Estadístico t	2,1782	
P(T<=t) una cola	0,058773	
Valor crítico de t (una cola)	2,3534	
P(T<=t) dos colas	0,1175469	
Valor crítico de t (dos colas)	3,1824	
No cumple		
1,0% antes y después		
Prueba t para medias de dos muestras emparejadas		
	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	15482,8537	14720,4042
Varianza	98942,055	35706,6939
Observaciones	4,0000	4,0000
Coefficiente de correlación de Pearson	0,0884	
Diferencia hipotética de las medias	0,0000	
Grados de libertad	3,0000	
Estadístico t	4,3279	
P(T<=t) una cola	0,01137236	
Valor crítico de t (una cola)	2,3534	
P(T<=t) dos colas	0,0227447	
Valor crítico de t (dos colas)	3,1824	