

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**PROGRAMA DE DOCTORADO**

**DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**



**TESIS**

**RELLENO ELASTOMÉTRICO PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS EN  
CLIMAS DE ALTURA MEDIANTE EL RECICLADO DE NEUMÁTICOS**

**PRESENTADA POR:**

**JORGE GABRIEL DURANT BRODEN**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA, TECNOLOGIA Y MEDIO AMBIENTE**

**PUNO, PERÚ**

**2017**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**PROGRAMA DE DOCTORADO**

**DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO  
AMBIENTE**

**TESIS**

**RELLENO ELASTOMÉTRICO PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS EN  
CLIMAS DE ALTURA MEDIANTE EL RECICLADO DE NEUMÁTICOS**

**PRESENTADA POR:**

**JORGE GABRIEL DURANT BRODEN**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

**APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:**

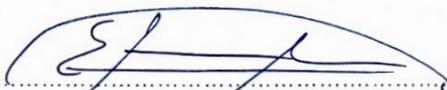
**PRESIDENTE**

  
.....  
Dra. SOFÍA LOURDES BENAVENTE FERNÁNDEZ

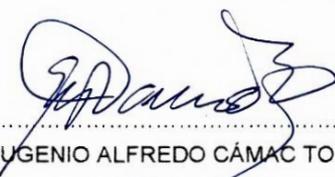
**PRIMER MIEMBRO**

  
.....  
Dr. WALDO ERNESTO VERA BÉJAR

**SEGUNDO MIEMBRO**

  
.....  
Dr. ELEODORO HUTCHI ATAMARI

**ASESOR DE TESIS**

  
.....  
Dr. EUGENIO ALFREDO CÁMAC TORRES

Puno, 1 de febrero de 2017

**ÁREA:** Ciencia, tecnología y medio ambiente

**TEMA:** Reciclaje de neumáticos

**LÍNEA:** Propuesta tecnológica por sectores productivos

## DEDICATORIA

A Dios por su eterno amor y sostén, sin el cual ningún emprendimiento humano sería coronado por el éxito.

## AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional del Altiplano y al Programa de Doctorado en Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, al haberme brindado los conocimientos conducentes a la obtención del Grado Académico de Doctoris Scientiae en Ciencia Tecnología y Medio Ambiente.
- A mis Jurados de Tesis, Dra. Sofía Lourdes Benavente Fernández, Dr. Waldo Ernesto Vera Béjar, Dr. Eleodoro Huichi Atamari, Dr. Eugenio Alfredo Cámac Torres. A los docentes de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Altiplano por sus conocimientos y experiencia, los cuales fueron determinantes en mi desarrollo profesional.
- A mi esposa Patricia y a mis hijos, con quienes me encuentro en deuda, ya que con mucho amor y comprensión me dieron el tiempo necesario, sin el cual, no hubiera podido lograr mi propósito.

## TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	ii
TABLA DE CONTENIDO .....	iii
TABLA DE ILUSTRACIONES.....	vi
TABLA DE ANEXOS.....	vii
LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS .....	viii
RESUMEN .....	ix
ABSTRACT .....	x
INTRODUCCIÓN .....	1

### CAPÍTULO I

#### PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento de la investigación. ....	3
1.1.1 Problema general. ....	3
1.1.2 Problemas específicos.....	3
1.1.3 Justificación. ....	3

### CAPÍTULO II

#### MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción .....	7
2.2 Antecedentes.....	7
2.3 Marco referencial .....	14
2.3.1 Neumáticos.....	14
2.3.2 Asfaltos.....	23
2.3.3 Pruebas de laboratorio. ....	35
2.4 Diseño Taguchi.....	40
2.4.1 Pasos del método Taguchi. ....	41
2.4.2 Relación señal/ruido .....	42

### CAPÍTULO III

#### METODOLOGÍA

3.1 Introducción .....	44
3.2 Muestra y población.....	45
3.2.1 Determinación de la granulometría del caucho. ....	45
3.2.2 Especificaciones del asfalto.....	46
3.2.3 Preparación de la muestra.....	46
3.2.4. Compactación de la muestra. ....	47
3.3 Materiales y métodos.....	49
3.3.1 Materiales.....	49
3.3.2 Prueba de ensayo por penetración.....	49
3.3.3 Prueba de viscosidad rotacional.....	51
3.3.4 Punto de ablandamiento.....	54
3.3.5 Recuperación elástica. ....	58
<h3>CAPÍTULO IV</h3>	
<h4>RESULTADOS Y DISCUSIONES</h4>	
4.1 Razón señal/ruido.....	64
4.1 Penetración.....	67
4.2. Viscosidad .....	67
4.3 Punto de ablandamiento.....	67
4.4 Recuperación elástica.....	68
CONCLUSIONES .....	70
RECOMENDACIONES .....	72
BIBLIOGRAFÍA.....	73
ANEXOS .....	79

## ÍNDICE DE CUADROS

1. Temperaturas de mezclado de las mezclas modificadas .....	10
2. Temperaturas de compactación de las mezclas modificadas .....	10
3. Selección del tipo de cemento asfáltico .....	33
4. Especificaciones del cemento asfáltico .....	34
5. Especificaciones del cemento asfáltico modificado con caucho .....	35
6. Uso de cementos asfálticos .....	36
7. Distribución de tamaño de partículas .....	46
8. Criterio de diseño Marshall.....	48
9. Resultados del ensayo de penetración .....	51
10. Resultados de la prueba de viscosidad.....	53
11. Resultados para el punto de ablandamiento .....	57
12. Resultados del ensayo de recuperación elástica .....	61
13. Arreglos ortogonales Taguchi. ....	62
14. Factores investigados. ....	63
15. Arreglo ortogonal $L_4(2)^3$ .....	64
16. Resultados para las variables de control .....	65
17. S/N Para el cambio en el porcentaje de caucho. ....	66
18. S/N Para el cambio en la temperatura de digestión .....	66

## TABLA DE ILUSTRACIONES

1. Composición típica de una cubierta de neumático .....	15
2. Estructura de los neumáticos .....	18
3. Granuladora de neumáticos .....	21
4. Porcentajes en volumen de tres crudos .....	24
5. Diseño de pavimentos.....	27
6. Condiciones de pavimentos v.s. tiempo .....	28
7. Simbología de los arreglos ortogonales. ....	41
8. Método Taguchi para el diseño de parámetros. ....	42
9. Relaciones señal/ruido .....	43
10. Distribución del tamaño de partículas .....	46
11. Penetrómetro de asfalto .....	50
12. Viscosímetro Brookfield DV II+ .....	53
13. Soporte de anillos y montaje .....	56
14. Molde para muestras .....	59

## TABLA DE ANEXOS

1. Norma MTC E 304-200 .....	80
2. Norma ASTM D 2196-05.....	88
3. Norma MTC E 307-2000 .....	94
4. Norma ASTM D 6084-97.....	102
5. Hojas de datos de Petroperú.....	107

**LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS**

°C = Grados centígrados.

°F = Grados Fahrenheit.

AASHTO = American Association of State Highway and Transportation Officials.

Ao = Arreglo ortogonal.

API = American Petroleum Institute.

ASTM = American Society for Testing Materials.

cm = Centímetros

CRM = Crumb Rubber Modifiers.

DBM = Dense Bitumen Mixture.

dmm = Décimas de milímetro.

E = Elongación.

EAPA = European Asphalt Pavement Association.

ESAL = Equivalent Single Axle Load.

HMA = Hot Mixed Asphalt.

ITS = Indirect Tensile Strength.

kg = Kilogramos.

m.s.n.m = Metros sobre el nivel del mar.

min = Minuto.

mm= Milímetros.

MTC = Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú

PAH = Polycyclic Aromatic Hydrocarbons.

PG = Performance Grade.

RAC = Rubberized Asphalt Concrete.

RAP = Recycled Asphalt Pavements.

RE = Recuperación elástica.

RE-RCD = Recuperación elástica con el reómetro de corte dinámico.

rpm = Revoluciones por minuto.

S/N = Signal to noise.

Senamhi = Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.

## RESUMEN

Es importante hallar un método ambientalmente amigable para reutilizar los neumáticos usados, así como también, existe la necesidad de aumentar la durabilidad de los pavimentos asfálticos en climas de altura. Es por ello que el presente trabajo demuestra la factibilidad técnica del empleo de fragmentos de caucho reciclado de neumáticos como relleno elastomérico en los pavimentos asfálticos. Para lo cual, se necesita determinar la composición y temperatura adecuadas para la mezcla de asfalto-caucho, que debe cumplir con lo especificado en el Manual de Carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014) Se ejecutaron las siguientes pruebas normadas por el MTC, tales como penetración, viscosidad rotacional de Brookfield, punto de ablandamiento y recuperación elástica. La mezcla de los cementos asfálticos con el caucho de neumáticos se hizo mediante el proceso seco. En el presente estudio, se investigaron los efectos de dos variables, siendo estas el volumen de caucho y la temperatura de mezcla, además de sus interacciones con las propiedades del asfalto-caucho. Los resultados de estas mezclas presentan mejores propiedades que el asfalto virgen y soportan la gradiente térmica del altiplano peruano boliviano, incrementando así la durabilidad de los pavimentos. Se corroboran las evidencias existentes en el sentido de que las mezclas de asfalto-caucho pueden ser beneficiosas para los pavimentos, reduciendo principalmente la deformación permanente. Se empleó la metodología Taguchi para determinar las propiedades relevantes de la mezcla asfáltica en función de los parámetros seleccionados. Las pruebas fueron ejecutadas en el último trimestre del 2016 en los laboratorios del Instituto del Asfalto de la ciudad de Arequipa, por estar mejor implementados y capacitados para la preparación de muestras de asfalto en caliente.

**Palabras clave.** Asfalto; caucho,neumáticos; elastómeros, pavimento.

## ABSTRACT

It is important to find an environmentally friendly method in order to reutilize used tires and also increase durability of asphaltic pavements at the high Andes climates. This research demonstrates the technical feasibility of the utilization of tire recycled rubber crumbs as elastometric fillers in asphalt pavements. To accomplish this it is necessary to find the most adequate composition and temperature for the blend. It is also needed to fulfill the technical specifications stated at the Road Handbook of the Ministerio de Transportes y Comunicaciones; for which the following tests were performed: penetration, Brookfield's rotational viscosity, softening point, elastic recovery. The asphalt cement and tire rubber blend was obtained by the dry method. The study searched for the effects of two variables: rubber volume and blending temperature and their interactions with the properties of the rubberized asphalt. The results of these blends showed better properties when compared with virgin asphalt and thus resist the temperature pitch of the Altiplano, thus increasing the pavement durability. Existent evidence that the asphalt/rubber blends can be beneficial for the pavements mainly reducing permanent deformation was corroborated. Taguchi methodology was utilized in order to find the relevant properties of the asphaltic blend as a function of the selected parameters and will be very useful in understanding the concepts underlying the behavior of the asphalt-rubber. This research was performed at the Instituto del Asfalto laboratories at Arequipa city, which are able to prepare hot asphalt samples and it was executed during the last quarter of 2106,

**Keywords:** Asphalt, tire, rubber, elastomer, pavement.

## INTRODUCCIÓN

La extensión de la red vial asfaltada ubicada por encima de los 3,500 m.s.n.m., fácilmente sobrepasa los 4,000 kilómetros de longitud en Perú y Bolivia; la inversión necesaria para la construcción y/o rehabilitación de esta infraestructura asciende aproximadamente a US\$ 3,500 millones. Así mismo, se conoce que las vías asfaltadas mediante tecnología convencional necesitan de un mantenimiento periódico cada 4 años, problema que se agrava en climas de altura debido a la fuerte gradiente térmica y oxidación a que están sujetos dichos pavimentos. El parque automotor del Perú cerró el año 2015 con un total de 2.5 millones de vehículos. Y, solamente en el año de 1997, se generó en el Perú la cantidad de 1.6 millones de neumáticos usados, por lo que, es de esperarse que la generación de neumáticos usados en nuestro país se encuentre alrededor de 5 millones de unidades al año.

El presente trabajo, demuestra la factibilidad técnica del empleo de neumáticos usados como relleno elastomérico para los ligantes de los pavimentos asfálticos de climas de altura, con el propósito de solucionar, los problemas de mantenimiento de los pavimentos asfálticos y el problema de descarte de los neumáticos usados, reduciendo así la huella de carbono de ambas industrias. No obstante, que existen referencias sobre el empleo de esta tecnología en diferentes países del mundo, no se han evidenciado estudios específicos sobre su aplicación en ligantes asfálticos para climas de altura.

Se investigaron dos variables importantes al momento de diseñar ligantes asfálticos adecuados para climas de altura, siendo estos, el porcentaje en volumen del caucho reciclado de neumático y la temperatura de digestión del caucho en la mezcla asfalto-caucho.

Para conseguir los objetivos señalados se empleó la metodología Taguchi, ya que esta permite un diseño de mezcla con una aproximación más práctica que teórica, con mayor interés por la productividad y los costos de producción que por las reglas estadísticas. Los conceptos de estas técnicas, están basados en las relaciones de costos y ahorros. De acuerdo con la metodología de diseño experimental del Dr. Taguchi, se aplicó el diseño factorial

variables del problema.

Se debe resaltar el hecho de que para la ejecución de las pruebas necesarias (penetración; viscosidad rotacional de Brookfield, punto de ablandamiento, recuperación elástica), no se cuenta en nuestra región con laboratorios adecuadamente equipados. El laboratorio de la planta de asfalto del Municipio Provincial de Puno no funciona permanentemente y solamente cuenta con equipos para la ejecución de pruebas básicas. Es por ello que se eligió el laboratorio del Instituto del Asfalto de la Universidad Nacional de San Agustín con la finalidad de ejecutar las pruebas necesarias. Es necesario también mencionar que los costos de ejecución de cada prueba bordean entre los 100 y 300 soles, por lo que se hace bastante onerosa la ejecución de un programa completo de análisis. Es aquí, donde la metodología Taguchi ha demostrado ser más adecuada ya que mediante ella es que se puede reducir al mínimo el número de pruebas y factores para el diseño de la mezcla adecuada.

En los cuatro capítulos del presente trabajo se discuten los siguientes aspectos: (I) En el primer capítulo, se discute la problemática de la investigación, planteando la necesidad de investigar el porcentaje de caucho a añadir en la mezcla asfalto-caucho. (II) En el segundo capítulo, se presentan los diferentes antecedentes de la investigación a nivel de tesis de pre-grado y post grado, así como también la teoría referente a los ligantes asfálticos y caucho de neumáticos. (III) La metodología empleada para la ejecución de las diferentes pruebas a fin de determinar los parámetros importantes tales como: penetración, viscosidad, punto de ablandamiento y recuperación elástica, se muestra en este capítulo. (IV) Finalmente, en el último capítulo se presentan los resultados y se analizan los mismos, empleando para ello la metodología Taguchi.

## CAPÍTULO I

### PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 1.1 PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.

##### 1.1.1 Problema general.

¿Cuál es la factibilidad técnica del empleo de caucho de neumáticos reciclados como relleno elastomérico en los pavimentos asfálticos, con la finalidad de mantener o mejorar la performance de estos últimos, y así mismo que estos soporten los factores climatológicos propios de las zonas de altura?

##### 1.1.2 Problemas específicos

- a) ¿Cuál es la cantidad adecuada de caucho reciclado de neumáticos para ser añadida como relleno elastomérico en el asfalto a fin de que este mantenga o mejore su elasticidad y resistencia?
- b) ¿Cuál será la temperatura de mezcla adecuada para añadir fragmentos de caucho reciclado de neumáticos al asfalto para que este mantenga o mejore su elasticidad y resistencia?

##### 1.1.3 Justificación.

Actualmente se conoce que la infraestructura vial del Perú se está ampliando y que para fines del año 2015 se esperaba tener pavimentado el 90% de las vías a nivel nacional ya que a julio del mismo año se contaba con 17,539 kilómetros de vías pavimentadas; de acuerdo a información publicada por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Así mismo se tiene proyectado que la proporción

63% en julio del 2011 al 80% en julio del 2016 (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2015). Así mismo se tiene que la extensión de la red vial ubicada por encima de los 3,500 m.s.n.m., considerando las carreteras de Perú y Bolivia, fácilmente sobrepasa los 4,000 km de longitud. La inversión necesaria para la construcción y/o rehabilitación de esta infraestructura es aproximadamente 3,000 millones de dólares. Los intentos por dar solución al problema de diseño y construcción de pavimentos para zonas de altura, basados en la tecnología convencional, han terminado la mayoría de ellos en fracasos (Del Águila, 1999).

Todos estos pavimentos de zonas de altura son afectados por una serie de factores climatológicos, como temperaturas bajas, elevado gradiente térmico, radiación solar intensa, y, por los efectos de flujos de agua superficial y subterránea, que determinan su acelerado deterioro prematuro.

Todo este patrimonio vial necesita de un oportuno y adecuado mantenimiento. Ha sido demostrado que en caso de permitir un deterioro mayor al 40%, el costo de mantenimiento puede llegar a quintuplicarse (International Road Federation, 1996). En la mayoría de las labores de mantenimiento de la carpeta asfáltica no se contempla el reciclado de la misma; lo cual constituye un problema ambiental ya que se están desperdiciando valiosos recursos naturales, tales como asfalto y agregados.

Así mismo la sociedad percibe que los neumáticos usados constituyen un serio problema ambiental, ya que anualmente se descartan miles de ellos sin un proceso técnico que evite que estos se conviertan en un problema ambiental. En el año de 1997 Perú tenía 1.3 millones de vehículos, los cuales generaban 1.6 millones de neumáticos usados, 800,000 de ellos concentrados en la ciudad de Lima. Se estima que solamente 5% de los neumáticos son reencauchados y 2% son usados como combustible para generar energía (Zucchetti et al., 2010).

necesidad debido a las grandes pilas de neumáticos que representan un peligro para el medio ambiente. En los países desarrollados existe alrededor de un neumático usado por persona por año (Roy, Labrecque, & de Caumia, 1990).

De persistir, el deterioro del pavimento asfáltico en las zonas de altura se agudizará y como consecuencia de ello se requerirán mayores recursos económicos a fin de recuperar este patrimonio; con el consiguiente perjuicio a la economía nacional y regional. Así mismo, los neumáticos descartados continuaran acumulándose a la vera de los caminos o en lugares totalmente inadecuados. Sirviendo, muy probablemente, como material combustible en alguno de los paros y tomas de caminos tan populares en nuestra región; con la consecuente emisión de furanos y demás materiales tóxicos a la atmosfera, y así eventualmente llegar a constituir un problema ambiental a largo plazo ya que el ciclo de degradación de los neumáticos toma 600 años.

Es por lo tanto necesario hallar la mejor solución técnica a fin de incrementar el periodo de vida útil de estos dos recursos naturales (asfalto y caucho); siendo la alternativa de reciclaje de neumáticos como relleno elastomérico en el pavimento asfáltico para climas de altura una posible solución. Para conseguir este objetivo es necesario, en primer lugar, determinar la viabilidad técnica para el reciclado en conjunto de ambos elementos, a fin de que el producto resultante cumpla con los requisitos de elasticidad y resistencia normados por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, 2014). Para lo cual es necesario investigar cual es la cantidad adecuada de caucho de neumático a ser añadida como relleno elastomérico en los pavimentos asfálticos, así como también la temperatura de mezcla adecuada.

Se espera que, como resultado del presente trabajo de investigación, un mayor porcentaje de asfaltos y de neumáticos sean

la vida útil de estos recursos naturales (caucho y asfalto) y reduciendo la huella de carbono de las industrias de asfaltos y neumáticos.

Así mismo se resalta la relevancia del trabajo de investigación en los siguientes aspectos:

- A. **Relevancia en Ciencia y tecnología:** El trabajo de investigación demuestra que es tecnológicamente factible emplear fragmentos de caucho como relleno elastomérico para los pavimentos de altura. Hecho que no se encontraba demostrado en su cabalidad y que en caso de aplicarlo significaría un adelanto en la industria de la construcción de vías asfaltadas en nuestro país.
- B. **Relevancia económica:** Al aumentar la vida útil del pavimento asfáltico se reduce el monto de la inversión necesaria para el mantenimiento de las vías asfaltadas de altura; la misma que bordea los US\$3'000,000. Conociendo que la extensión de esta infraestructura en Perú y Bolivia fácilmente sobrepasa los 4,000 kilómetros de longitud.
- C. **Relevancia social:** El proyecto es socialmente relevante debido a que los ahorros conseguidos mediante una capa asfáltica de mayor duración fácilmente pueden ser derivados a la construcción de la infraestructura necesaria para el desarrollo nacional.
- D. **Relevancia ambiental:** Al reutilizar el caucho de los neumáticos descartados, ampliando así el ciclo de vida útil de este producto, se conseguirá erradicar los botaderos ilegales de neumáticos, impidiendo así la contaminación ambiental y/o la generación de focos infecciosos al ser los neumáticos hábitat adecuado para la proliferación de diferentes vectores.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Los neumáticos descartados constituyen un grave problema medioambiental en el Perú y en el mundo, la disposición final de estos neumáticos es el principal problema ya que la mayoría de ellos se encuentra en botaderos clandestinos ocupando grandes espacios o a la vera de los caminos. La acumulación de los neumáticos incrementa la posibilidad de incendios con la consecuente emanación de gases tóxicos, además de contribuir a la proliferación de roedores e insectos, así como también la aparición de otros vectores infecciosos.

Con el objeto de solucionar el problema de los neumáticos descartados, propiciando su reciclaje; es que de la revisión bibliográfica efectuada es que en el presente trabajo se ha decidido emplear fragmentos de neumáticos descartados como relleno elastomérico del asfalto, ya que aparentemente el des-polimerizar un neumático representa solamente una mínima fracción del caucho total presente en las mezclas asfálticas.

### 2.2 ANTECEDENTES

**Mujibur Rahman**, en el año 2004 en la Tesis de Doctorado titulada “*Characterization of Dry Process Crumb Rubber Modified Asphalt Mixtures*” se menciona que: A la fecha, solamente dos de los mercados de reciclaje han mostrado potencial para utilizar un significativo número de neumáticos descartados, i) combustible para la combustión y ii) material de fragmentos de caucho (CRM por sus siglas en inglés) como modificantes para los

millones de neumáticos, no es una solución ambiental ideal. El único mercado potencial remanente para la utilización de los fragmentos de caucho es el material de CRM para el asfaltado de las pistas. A fin de caracterizar el material de CRM del proceso seco, este trabajo se ha dividido en dos partes. En la primera parte, se investigaron dos materiales constituyentes, trozos de caucho y el bitumen, en términos de su interacción como función de la fuente de bitumen y grado de penetración. En la segunda parte, basándose en los resultados del estudio de interacción entre el caucho-bitumen, se seleccionó un tipo de bitumen a fin de ser usado en una Mezcla de Bitumen Denso (DBM por sus siglas en inglés) con CRM, en donde se incorporo hasta 20% de caucho en volumen del bitumen. Los resultados obtenidos a partir de pruebas de laboratorio indicaron que la tasa de absorción está relacionada directamente con el grado de penetración (viscosidad) y la composición química del bitumen (fuente de crudo), pero la cantidad total de absorción está controlada por la naturaleza de los fragmentos de caucho en vez del tipo y grado de bitumen (Rahman, 2004).

**Julio César Chávez Alderete**; en su tesis de maestría titulada “*Estudio de Factibilidad Técnico-Económica entre un Pavimento de Asfalto Convencional y uno Modificado con Agregado de Caucho*” (Chávez Alderete, 2005), concluye que “El alto contenido de caucho confiere a la mezcla una resistencia mejorada a las fisuras reflejadas y una mayor vida a fatiga, las que no pueden ser conseguidas con las tecnologías que incorporan en la mezcla bituminosa contenidos intermedios o bajos de caucho”.

**Náyade Ramirez** en su tesis para optar el título de Ingeniero Civil, titulada “*Estudio de la utilización del caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante Proceso Seco*”. Sostiene que: “El grado de aporte de la incorporación del caucho molido en la mejora de las propiedades de las mezclas, depende de varios factores, dentro de los cuales se pueden incluir la tecnología de la incorporación (vía seca o húmeda), naturaleza del caucho, su granulometría y el tamaño de las partículas, porcentaje de adición y el tiempo de reacción para el proceso húmedo y para el caso de la incorporación por vía seca, el tiempo de digestión. Así mismo entre las conclusiones del trabajo se mencionan las siguientes: a) Entre menor sea el

mezclas asfálticas o modificar el ligante, serán mejores los resultados obtenidos. Sin embargo, no deben dejarse de lado los beneficios de usar partículas gruesas de caucho; b) Para las mezclas mejoradas con caucho, el contenido óptimo de caucho con el cual se obtuvieron los mejores valores de tracción indirecta, módulos y fatiga es de alrededor al 0.5%, al igual que para los parámetros Marshall. Para el ensayo de inmersión-compresión, los valores mejores de resistencia conservada se tiene con contenidos de caucho de hasta el 1%; c) Ambos procesos de adición de caucho, exigen mayores cantidades de cemento asfáltico, pero con los consiguientes beneficios y mejoras en las propiedades relacionadas con la durabilidad; d) El parámetro más crítico de la adición de caucho por la vía seca, es el tiempo de digestión. El tiempo de digestión recomendado debe cumplir con un mínimo necesario para que el caucho interactúe con el ligante, modificando la reología del asfalto original y un máximo acotado a los tiempos reales de puesta en obra del material” (N. Ramirez, 2006).

**Feipeng Xiao**, en su tesis de doctorado titulada: “*Development of fatigue predictive models of rubberized asphalt concrete (RAC) containing reclaimed asphalt pavement (RAP) mixtures*”, menciona lo siguiente: Se llegó a las siguientes conclusiones basándose en investigaciones de laboratorio: 1) el empleo de trozos de caucho es efectivo para mejorar la resistencia al envejecimiento del concreto asfáltico con caucho; 2) la adición de RAP disminuye el contenido de asfalto virgen e incrementa los valores ITS<sup>1</sup>; 3) los modelos de regresión obtenidos predicen una respuesta razonable a la fatiga de la mezcla y se encontró que los valores medidos y modelados para la fatiga se encontraban cercanos, independientemente del contenido de trozos de caucho y RAP y aún de las condiciones de la prueba...

La mayoría de los experimentos en laboratorio y en el campo indican que las mezclas de concretos asfálticos con caucho muestran una mejora en durabilidad, absorción de las fracturas, resistencia a la fatiga, resistencia al

---

<sup>1</sup> ITS = Indirect Tensile Strength. Resistencia tensional indirecta. La que es una prueba para determinar la susceptibilidad a la humedad de las mezclas de concreto asfáltico. Nota del Autor.

sino también en la membrana de absorción de tensiones...

Se asume que el porcentaje de caucho ( $R_b$ ) tiene la siguiente relación con la resistencia a la fatiga ( $N_f$ ) y la rigidez inicial del pavimento ( $S_o$ )

$$N_f = e (R_b)^f$$

$$S_o = g(R_b)^h$$

En donde e, f, g, h, son coeficientes determinados experimentalmente...

No hay especificaciones previas disponibles para los componentes de la mezcla Superpave, con referencia a las temperaturas de mezcla y compactación de los ligantes modificados (Ver Cuadros 1 y 2).

En el mismo trabajo se mencionan las siguientes temperaturas de mezcla y compactación para las mezclas asfálticas modificadas. (Xiao, 2006).

Cuadro 1. Temperaturas de mezclado de las mezclas modificadas

Temperatura (°C)		Caucho (%)			
		0	5	10	15
Ligante (PG 52-28)		148	150	152	155
Ligante (PG 64 - 22)		155	160	165	172
Agregado Virgen		173	175	177	177
RAP	15%	175	176	177	177
	25%	176	177	178	179
	30%	176	177	178	179

Fuente: (Xiao, 2006)

Cuadro 2. Temperaturas de compactación de las mezclas modificadas

Temperatura (°C)		RAP (%)				
		0	15	25	30	30 (52-28)
Caucho (%)	0	150	155	160	162	140
	5	153	158	163	165	143
	10	156	161	165	167	146
	15	159	164	165	167	150

Fuente: (Xiao, 2006)

ingeniero “*Asfaltos Modificados con Polímeros*”; sostiene que: Para llevar a cabo la modificación de asfalto, se debe conocer la compatibilidad de este con el modificador para que coexistan como sistema, es decir debe ser miscible, lo que indica una mezcla monofásica. La inmiscibilidad se traduce en la aparición de una segunda fase. Un polímero es compatible con el asfalto cuando la heterogeneidad de la mezcla no se puede apreciar por un examen visual. Los asfaltos más ricos en fracciones aromáticas y resinas serán los más compatibles, ya que estas fracciones son las que permiten que el polímero se disuelva. Los asfaltos menos compatibles son los más ricos en asfaltenos y saturados. El objetivo perseguido con la adición de polímeros al asfalto es el de mejorar su reología, buscando:

- Disminuir la susceptibilidad térmica. Disminuir la fragilidad en climas fríos y aumentar la cohesión en tiempos de calor.
- Disminuir la susceptibilidad a los tiempos de aplicación de carga.
- Aumentar la resistencia a la deformación permanente y a la rotura en un rango más amplio de temperaturas, tensiones y tiempo de carga.
- Mejorar la adherencia a los agregados.

Si se aumenta la concentración del polímero, se llega a un punto en el cual la mayoría de los aceites están asociados con el polímero y se produce un cambio drástico en las propiedades físicas del asfalto. Estas se acercan más a las propiedades del polímero que a las del asfalto. Esto sucede cuando el contenido del polímero va de 8% – 10%, en este punto, el asfalto aumenta el intervalo de plasticidad, aumenta la resistencia a la ruptura, disminuye su sensibilidad térmica sobre todo en el intervalo de temperaturas de aplicación (Avellán Cruz, 2007).

**Vanesa Fernandes**, en el trabajo de tesis de ingeniero titulado “*Caracterización de Asfalto modificado con Caucho molido proveniente de Neumáticos usados*” manifiesta lo siguiente: En este proyecto se estudiaron las variaciones fisicoquímicas y reológicas de mezclas del asfalto proveniente del crudo Boscán, con caucho molido (CRM) de neumáticos de camiones tipo 350. Se analizaron dos de las marcas más comerciales, incorporando diferentes porcentajes de adición (5% y 10% p/p) y con

el cambio en las propiedades al utilizar dos tiempos de mezclado del asfalto con el caucho (45 y 180 min).

Los resultados muestran que las dos marcas modifican las propiedades del asfalto de manera similar. Con un tiempo de mezclado de 45 min se logró aumentar la recuperación elástica hasta 47% y se incrementó la viscosidad rotacional 2.5 veces con 5% y 11.7 veces con 10% de CRM, haciendo esta última muy poco manejable. Usando la mezcla de 5% se encontró que al aumentar el tiempo de mezclado, la capacidad de interacción entre los componentes de la muestra incrementa. Además, se obtuvo una disminución del 30% en la penetración, un aumento del 12% del punto de ablandamiento y una menor pérdida de compuestos por emisión en relación al asfalto original. En términos generales, la incorporación de CRM aumenta el grado de PG 70-22 a PG<sup>2</sup> 76-22 con tan solo 5% p/p de CRM, permitiendo una mayor resistencia a la deformación permanente, creando un asfalto más atractivo para la pavimentación (Fernandes, 2008).

En el año 2010, **Jordan Reed** en su tesis de maestría titulada “*Evaluation of the Effects of Aging on Asphalt Rubber Pavements*” concluye que: El envejecimiento por oxidación es un factor importante en el desempeño a largo plazo de los pavimentos asfálticos. La oxidación y el endurecimiento asociado pueden ocasionar la formación de fracturas, las cuales a su vez originan una falla funcional y estructural del sistema de pavimento... De especial interés son los efectos de envejecimiento en los pavimentos de asfalto-caucho, debido a que se trata de una nueva tecnología y a que pocas secciones de asfalto-caucho han sido evaluadas por su periodo de vida. La primera fase (de los experimentos) se enfocó en el envejecimiento de los ligantes asfalto-caucho y la base virgen. Los ligantes fueron sometidos a varias condiciones de envejecimiento, verificándose luego la viscosidad de estos. Se analizó el cambio en la viscosidad y se encontró que los ligantes asfalto-caucho presentaban un menor envejecimiento a largo plazo (Reed, 2010).

---

<sup>2</sup> PG: Grado de desempeño del asfalto (Performance Grade). En donde el primer número representa la temperatura más alta del pavimento y el segundo la más baja, ambos en grados Celsius. Nota del autor.

titulada “*Ventajas y desventajas del uso de polímeros en los asfaltos*” concluye que: Los asfaltos modificados con polímeros elevan la vida útil de un pavimento de dos a tres veces (según el caso), con un costo adicional de hasta un 25% sobre la mezcla asfáltica. Está plenamente probado que los asfaltos convencionales poseen propiedades satisfactorias tanto mecánicas como de adhesión en una amplia gama de aplicaciones y bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito. Por ejemplo, con los asfaltos convencionales, aun con los grados más duros, no es posible eliminar el problema de las deformaciones producidas por el tránsito canalizado (ahuellamiento), especialmente cuando se deben afrontar condiciones de alta temperatura. Además, con la simple adopción de asfaltos más duros se corren el riesgo de fisuraciones por efectos térmicos cuando las temperaturas son muy bajas (Vásquez Ruiz, 2010).

**Néstor Huamán Guerrero**; en su tesis de maestría titulada “*La Deformación Permanente en las mezclas asfálticas y el consecuente deterioro de los pavimentos asfálticos en el Perú*” señala que: “La durabilidad de los pavimentos asfálticos está relacionada directamente con el clima del lugar de ubicación de estos, además de otros parámetros como carga, suelo, humedad, proceso constructivo, entre otros; los que en su conjunto influyen para un determinado comportamiento del pavimento que traerá como consecuencia fallas prematuras por deformación permanente si se descuidan estas consideraciones de diseño” (Huamán, 2011).

De todo lo expuesto se reconoce que “se pueden mejorar las propiedades de los ligantes asfálticos mediante la adición de pequeñas cantidades de polímeros seleccionados, principalmente del tipo caucho. Así mismo, los neumáticos usados son vistos como una fuente potencial de caucho de bajo costo a ser empleado en la modificación del material ligante” (Zanzotto & Svec, 1996).

Además de las mejores cualidades del asfalto modificado con caucho, el empleo del caucho reciclado como relleno elastomérico puede contribuir a la solución de los problemas ambientales derivados del almacenamiento y descarte de los neumáticos usados.

con el asfalto (los llamados procesos húmedo y seco) han arrojado resultados variados, tal como se desprende de los antecedentes mencionados. El principal problema con estas tecnologías se relaciona con el uso de trozos de caucho de los neumáticos desechados en su estado vulcanizado original. Al comparar la acción del caucho vulcanizado de los neumáticos descartados en el asfalto con aquella de los polímeros vírgenes de caucho, se hace aparente que el caucho vulcanizado no tiene la capacidad de producir una dispersión íntima con el asfalto, la cual es esencial para una modificación exitosa del asfalto. El caucho aparentemente actúa solamente como un relleno elástico (Zanzotto & Svec, 1996).

De todo lo expuesto se puede concluir que no se ha estudiado el comportamiento de este tipo de material en zonas de altura, en donde por efecto de la irradiación solar y el tráfico se presentan elevados gradientes térmicos, los que aceleran la oxidación del pavimento asfáltico. El gradiente térmico genera cambios volumétricos en el interior de la capa asfáltica, produciendo esfuerzos cíclicos de tracción y compresión, los que provocan la falla de la capa asfáltica por fatiga.

## 2.3 MARCO REFERENCIAL

### 2.3.1 Neumáticos.

El neumático usado medio de un automóvil o de un camión ligero, pesa aproximadamente 9.5 kg. Los neumáticos industriales y de camiones pueden llegar a pesar desde 16 kg a más de 100 kg. Los constituyentes principales de los neumáticos son: polímeros, negro de carbón y ablandadores. Principalmente los ablandadores están compuestos por aceites de hidrocarburos aromáticos (Lund, 2011).

Desde el punto de vista de la reutilización como materia prima, se debe tener presente que, en un neumático, alrededor de un 60% de su composición son cauchos naturales o sintéticos, con posibilidades de ser utilizados en otras aplicaciones (N. Ramirez, 2006). Además de caucho, los neumáticos están compuestos de fibras textiles y acero, en donde se puede recuperar como caucho del 50% al 60% del peso del neumático, lo cual corresponde a 4.5 a 5.5 kg por cada 9 kg de peso

típica de una cubierta de neumático para una mejor comprensión de la naturaleza de un neumático usado.

A continuación se presenta un extracto de la página web de Michelin, en donde se describen las funciones de las diferentes estructuras componentes de un neumático ([www.michelin.com.es](http://www.michelin.com.es)).

**1: Revestimiento de goma interior:** Es una capa de caucho sintético estanca al aire. Esta capa se encuentra en el interior del neumático y hace la función de cámara de aire.

**2: Carcasa:** La carcasa es una estructura flexible formada por hilos (textiles o de acero) embutidos en goma, que forman arcos rectos y se enrollan en el aro del talón del neumático. Sobre la carcasa se colocan el resto de lonas y capas de goma que conforman al neumático. Sus funciones son:

- Soportar la carga y la velocidad con ayuda de la presión de aire.
- Participar en la estabilidad y el confort.
- Participar en el rendimiento y eficiencia de la cubierta.

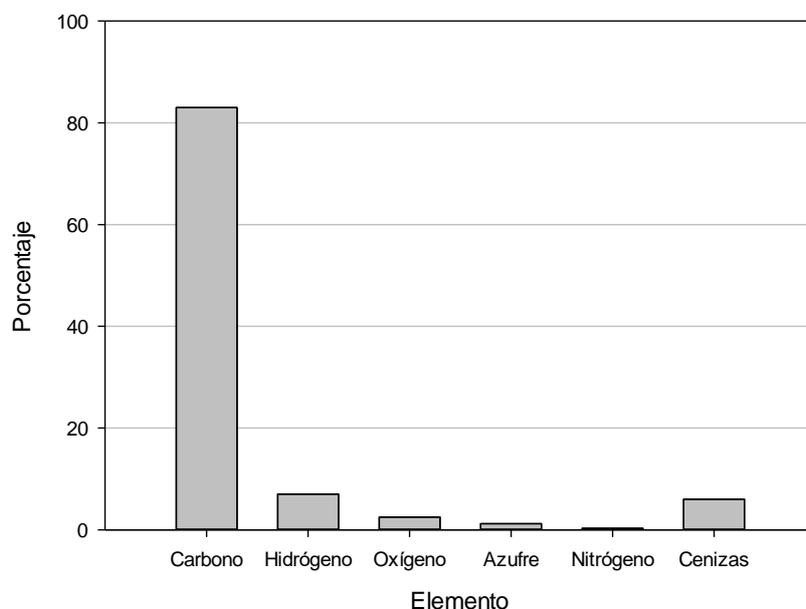


Figura 1. Composición típica de una cubierta de neumático

Fuente: Manual McGraw Hill de Reciclaje, Volumen I, (Lund, 2011)

uno de ellos puede resistir una fuerza de 15 kg.

**3: Zona baja:** Tiene el papel de transmitir el par motor (potencia del vehículo) en la aceleración y en la frenada de la llanta hacia la zona de contacto con el suelo.

**4: Aro del talón:** Es la parte de la cubierta que se fija y ajusta a la llanta. Está formado por un cable de acero inextensible, de forma y proporción variable según la dimensión y tipo de neumático. En él se enrolla la lona de la carcasa.

Sus funciones son:

- Fijar el neumático a la llanta.
- Realizar la estanqueidad del neumático.
- Transmitir el par motor (la potencia del motor del vehículo) en los esfuerzos de aceleración y frenada.

Un aro puede soportar hasta 1,800 kg sin riesgo de rotura.

**5: Flanco:** El flanco es la zona comprendida entre la banda de rodadura y los talones de la cubierta. El flanco representa la altura de la cubierta.

Sus funciones son:

- Soportar la carga.
- Soportar las constantes flexiones mecánicas.
- Resistencia a los roces y a las agresiones.
- Participar en la estabilidad y en el confort.

**6 y 7: Lonas de cima:** Están constituidas por cables metálicos revestidos de goma. Se posicionan sobre la carcasa formando un cinturón que garantiza la resistencia mecánica del neumático a la velocidad y a la fuerza centrífuga. Las lonas que forman el cinturón se cruzan oblicuamente y se pegan una encima de la otra. El cruce de sus hilos con los de la carcasa forma triángulos indeformables que garantizan la rigidez de la cima.

cinturón, desempeñan un papel muy complejo:

- Tienen que ser lo bastante rígidas en el sentido circunferencial del neumático para no extenderse bajo el efecto del centrifugado y para controlar perfectamente el diámetro del neumático, independientemente de las condiciones de uso.
- También tienen que ser rígidas en sentido transversal para resistir a los esfuerzos de deriva. Pero también tienen que ser muy flexibles en sentido vertical para “beberse el obstáculo”.

**8: Banda de rodadura:** La banda de rodadura es la parte del neumático que está en contacto con el suelo y está formada por una capa de goma en la que se realizan una serie de ranuras que dan origen al dibujo o escultura.

Sus funciones son:

- Proporcionar la adherencia (agarre, grip) en el suelo seco y mojado.
- Duración y resistencia al desgaste y a las agresiones.
- Participar en la baja resistencia a la rodadura.
- Participar en el confort acústico (sonoridad en el rodaje).
- Participar en la direccionalidad y manejabilidad del vehículo.
- Estética que es importante para muchos usuarios.

En la zona de contacto con el suelo, la banda de rodamiento sufre y soporta esfuerzos muy importantes. Todas estas estructuras, de las cuales está compuesto el neumático se observa en la Figura 2.

Los neumáticos son fabricados con dos tipos de caucho, el natural y el sintético. El caucho natural se obtiene de cierto tipo de árboles (especies Hevea, Ficus y otras) que exudan una sustancia blanca y lechosa, el “látex”, cuando se hace una incisión profunda en su corteza. Este látex consiste en polímeros del compuesto orgánico del isopreno y menores impurezas de otros compuestos orgánicos, más agua. Diferentes formas de polyisopreno que son empleadas como caucho

Este látex es una dispersión acuosa que contiene entre un 25% a un 40% de caucho (N. Ramirez, 2006).



Figura 2. Estructura de los neumáticos

Fuente: [www.michelin.com.es](http://www.michelin.com.es)

Se denomina caucho sintético a toda sustancia elaborada artificialmente que se parezca al caucho natural. 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. Después de su fabricación el caucho sintético también se vulcaniza (Seymour & Carraher, 1995).

### Neumáticos fuera de uso

La sociedad percibe que los neumáticos fuera de uso constituyen un serio problema ambiental, ya que anualmente se descartan miles de ellos sin un proceso técnico, que evite que estos se conviertan en un problema ambiental. “En el año de 1997 Perú tenía 1.3 millones de vehículos, los cuales generaban 1.6 millones de neumáticos usados, 800,000 de ellos concentrados en la ciudad de Lima. Se estima que solamente 5% de los neumáticos son reencauchados y 2% son usados como combustible para generar energía” (Zucchetti et al., 2010).

no consiste en enterrarlos en rellenos sanitarios, ya que de acuerdo a (Hanson, Epps, & Hicks, 1996), “El relleno sanitario con neumáticos descartados presenta varios obstáculos. Los neumáticos necesitan de un espacio desproporcionadamente grande (no pueden ser compactados). Esto debido a su geometría y demás propiedades físicas”. Así mismo en el texto titulado “Reciclaje y tratamiento de residuos diversos” (Elías, 2015), manifiesta que “La prohibición del vertedero<sup>3</sup> como herramienta de gestión de los neumáticos usados, unido a la dificultad de gestión y elevado impacto ambiental que presenta, lo ha convertido en un residuo muy estudiado y ciertamente polémico en los últimos años”. Así mismo, podemos mencionar que el riesgo de incendios en estos depósitos clandestinos de neumáticos es elevado, en cuyo caso se generaría una emisión de gases con contenido de partículas nocivas para el entorno.

Es por ello que, “el reciclaje de neumáticos se ha convertido en una necesidad debido a las grandes pilas de neumáticos que representan un peligro para el medio ambiente. En los países desarrollados existe alrededor de un neumático usado por persona por año (Roy et al., 1990)”. Ya que de persistir esta situación, los neumáticos descartados continuarán acumulándose a la vera de los caminos o en lugares totalmente inadecuados. Sirviendo, muy probablemente, como material combustible en alguno de los paros y tomas de caminos tan populares en nuestra región, con la consecuente emisión de furanos y demás materiales tóxicos a la atmosfera, o eventualmente llegar a constituir un problema ambiental al ser tenido como refugio de vectores capaces de propagar diversas enfermedades.

### **Reciclaje de neumáticos**

La aplicación en la red de carreteras tiene grandes ventajas para el empleo del caucho reciclado; se están utilizando productos elastoméricos a los que el caucho reciclado podría sustituir o complementar; se pueden utilizar grandes volúmenes en cada obra y

---

<sup>3</sup> En España y en general en la Comunidad Europea está prohibido emplear vertederos para descartar neumáticos (Nota del Autor).

nacional, no se necesita transportarlo a grandes distancias (Juan, 2012).

Sin embargo, antes de reutilizar los neumáticos en diversas industrias (la industria del asfalto incluida), es necesario dismantelar el neumático en sus diversos componentes. Para lo cual, se emplean los siguientes procedimientos a fin de obtener caucho granulado:

*a) Procesos Ambientales*

Estos involucran procesos netamente mecánicos, en donde los neumáticos son comprimidos, cortados o fragmentados en piezas irregulares. Los granos de caucho pueden conseguirse ya sea por granulación o 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.

Otra forma es pasar el material por una serie de molinos, donde los primarios, secundarios y finales son muy similares, y operan básicamente bajo el mismo principio, estos usan dos rodillos grandes que van rotando, con dentaduras que cortan el material, ubicadas en uno o ambos rodillos. La diferencia de los rodillos está en la configuración que se les da; estos 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 como fibras y acero que se encuentran en los neumáticos. Las partículas de caucho producidas en molinos tienen formas típicas alargadas, angostas y con una alta superficie de área. La estructura de uno de estos molinos puede observarse en la Figura 3.

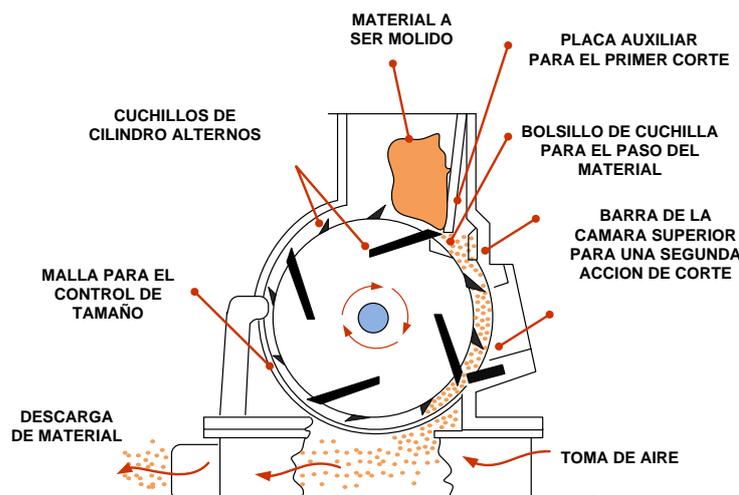


Figura 3. Granuladora de neumáticos

Fuente: <http://www.jordanreductionsolutions.com/rubber-grinder.html>

“El caucho obtenido por el proceso ambiental, se clasifica según el tamaño de las partículas en neumáticos cortados, neumáticos triturados y astillas (Chips), caucho en polvo y caucho en migas. En general, los productos resultantes de este proceso son de alta calidad y limpios de todo tipo de impurezas, facilitando la utilización de este material en nuevos procesos y aplicaciones” (N. Ramirez, 2006).

#### b) Trituración criogénica

“Este proceso es llamado criogénico porque todo el neumático o trozos de este son enfriados hasta una temperatura por debajo de menos 112°F (-80°C). por debajo de esta “temperatura de transición a vidrio” el caucho se vuelve tan quebradizo como el vidrio y se puede conseguir su reducción de tamaño mediante chancado y fracturado” (Reschner, 2008).

“El empleo de temperaturas criogénicas puede ser aplicado en cualquier etapa de la reducción de tamaño de los neumáticos descartados. Típicamente el tamaño nominal de alimentación es de 2 pulgadas (50 mm) o más pequeño. El material es enfriado en una cámara tipo túnel o sumergido en un baño de nitrógeno líquido a fin de

caucho enfriado es molido en una unidad de reducción mediante impacto, usualmente una chancadora de quijada. Este proceso reduce el caucho a partículas que se encuentran en el rango entre  $\frac{1}{4}$  de pulgada (6 mm) a tamaños menores que la malla 30 (0.85 mm). El alambre de los neumáticos descartados normalmente se separa empleando magnetos; la fibra es removida mediante aspiración y tamizado” (Rahman, 2004).

“Al comparar los granos obtenidos por la trituración criogénica y ambiental, se observa que las partículas para el primer método, son relativamente lisas y ovaladas, y para el proceso ambiental, son irregulares en forma y textura superficial. En relación a este aspecto, cabe destacar que la forma final obtenida de los granos de caucho influye en la reacción con el cemento asfáltico, pues para partículas con alta superficie de área, como las obtenidas con el proceso ambiental, la reacción con el ligante es rápida, en cambio, para las partículas obtenidas a través de la trituración criogénica, al tener superficies planas y limpias, se disminuye el nivel de reacción con el cemento asfáltico” (N. Ramirez, 2006).

### *c) Pirolisis*

El método de pirolisis para el reciclado de neumáticos usados es una técnica en donde se calientan los neumáticos, ya sea enteros o en trozos, en una cámara de reacción con una atmosfera libre de oxígeno. En el reactor el caucho es suavizado, luego de lo cual los polímeros de caucho se fragmentan en pequeñas moléculas. Estas pequeñas moléculas eventualmente se vaporizan y salen fuera del reactor. Estos vapores pueden ser quemados directamente o condensados en un líquido aceitoso, el cual es generalmente utilizado como combustible. Los minerales que conforman el neumático, alrededor del 40% en peso, son recuperados como cenizas sólidas. Cuando es ejecutado de manera adecuada, el proceso de pirolisis de los neumáticos es una operación limpia con pocas emisiones o deshechos.

los neumáticos usados 55% de aceites, 25% de negro de carbón, 5% de fibra y 6% de gas. El aceite recuperado tiene un contenido total de azufre de 0.8%, rico en benzol y otros componentes petroquímicos. La fase gaseosa está compuesta principalmente de  $H_2$ ,  $CO$  y  $CO_2$ ” (Roy et al., 1990).

### 2.3.2 Asfaltos.

“Asfalto es un material cementante de color marrón oscuro a negro, en donde los constituyentes predominantes son betunes, los que ocurren en la naturaleza o son obtenidos en el procesamiento del petróleo” (ASTM, 2002).

“Un asfalto es un material aglomerante de color marrón oscuro o negro, cuyos constituyentes predominantes son en un 99% betunes, que se encuentran en la naturaleza o se obtienen procesando el petróleo. Los cementos asfálticos provenientes del petróleo están formados por compuestos de alto peso molecular; son de estructura muy compleja, siendo hidrocarburos y hetero-compuestos formados por carbono e hidrógeno acompañados de pequeñas fracciones de Ni, V, Fe, Mg, Cr, Ti, Co, etc.” (Botasso, Rebollo, Cuattrocchio, & Soengas, 1995).

Actualmente los asfaltos están hechos con bitumen, pero en el pasado se empleaba carbón, alquitrán y otros destilados de este, los cuales han dejado un legado problemático de elevado contenido de PAH (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons)<sup>4</sup>, en algunas mezclas asfálticas consideradas para su reciclaje o re-utilización. En algunos países se emplearon alquitranes de lignito, los cuales tienen un contenido relativamente bajo de PAH, pero un contenido relativamente elevado de fenoles. La EAPA (European Asphalt Pavement Association) “recomienda identificar tales mezclas y rechazarlas para su empleo en el reciclaje en caliente/re-utilización en caliente”

---

<sup>4</sup> Algunos de estos PAH han sido identificados como cancerígenos, mutágenos y tretatógenos. (Nota del Autor).

algunos porcentajes en volumen de las fracciones de tres crudos.

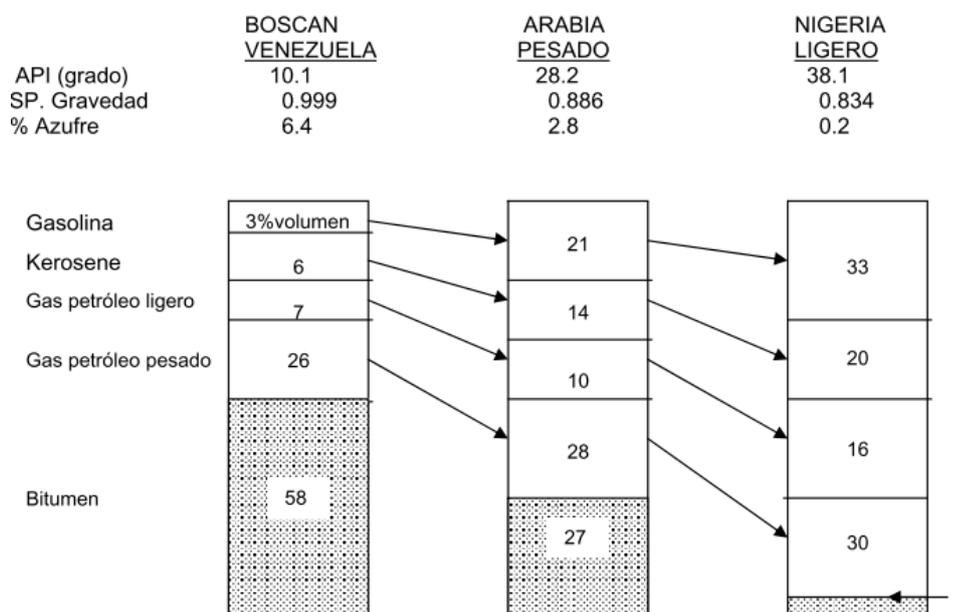


Figura 4. Porcentajes en volumen de tres crudos

Fuente: Manual de Laboratorio, (Gonzalez & Huaman, 2001)

“Casi todo el cemento asfáltico empleado en trabajos de pavimento se obtiene por procesamiento del crudo de petróleo. Una sustancial cantidad de crudo de petróleo usado en los Estados Unidos es importado de países como México, Venezuela y Canadá. El crudo de petróleo varía en composición de fuente a fuente, con diferente rendimiento de cemento asfáltico residual y otras fracciones destilables” (Minaya & Ordoñez, 2001).

“La baja gravedad API del crudo (API menor de 25) representa una producción relativamente baja de productos de evaporación y alto porcentaje de cemento asfáltico. De otra manera, una alta gravedad API del crudo (API más de 25) representa un rendimiento relativamente alto de productos de evaporación y bajo porcentaje de cemento asfáltico” (Minaya & Ordoñez, 2001).

obtención de cemento asfáltico es el de Boscan (Venezuela) por su baja gravedad API.

Las mezclas asfálticas para la construcción de vías, se emplean ya sea en capas de rodadura o en capas interiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir adecuadamente las cargas debidas al tráfico a la base y sub-base para que sean soportadas por esta.

“Los asfaltos empleados como material de pavimento son una mezcla de agregado mineral y finos unidos por un ligante bituminoso, en donde el contenido típico del material ligante se encuentra en el rango de 3 – 7% en peso, dependiendo de la mezcla y de su aplicación” (European Asphalt Pavement Association, 2014). En el concreto asfáltico el bitumen, como ligante desempeña dos funciones importantes en las vías pavimentadas, en primer lugar une firmemente los agregados y en segundo lugar actúa como impermeabilizante contra la penetración de agua.

“Cada tonelada de mezcla asfáltica puede utilizar de 2 a 6 neumáticos” (Zanzotto & Svec, 1996). De lo que se puede colegir que la industria del asfaltado está en la capacidad de consumir todos los neumáticos descartados. Así mismo se puede mencionar que un kilómetro de vía asfaltada de 7 metros de ancho y 20 centímetros de espesor requerirá de 3,220 toneladas de mezcla asfáltica. Para el caso de un material asfáltico 60 - 70 se requerirá de 193.20 toneladas de material asfáltico sin procesar.

### **Problemas de los pavimentos asfálticos**

La mayoría de los problemas en los pavimentos asfálticos pueden ser categorizados como problemas de la superficie, de deformación, de grietas o una combinación de estos tres. Los problemas de la superficie, tales como la separación de las capas, exudación o el pulido del agregado pueden ser tratados ya sea mediante mezclas calientes

arrugas puede ser tratada mediante mezclas en caliente o reciclaje “in-situ” en caliente (Federal Highway Administration, 2015).

- La deformación permanente se presenta en climas cálidos o bajo grandes cargas, especialmente detenidas o circulando a bajas velocidades (comportamiento viscoso del asfalto).
- El agrietamiento por fatiga es inducido por la repetición de cargas y es propio de los pavimentos en servicio. La fatiga a su vez se relaciona con el comportamiento de la mezcla y puede ser acelerada en mezclas rígidas y/o envejecidas.
- El agrietamiento a bajas temperaturas se presenta en pavimentos que trabajan a temperaturas inferiores a cero grados centígrados.

Estos problemas reducen la vida útil del pavimento y elevan los costos de mantenimiento. Los tres tipos de problemas antes mencionados se presentan en las diferentes estructuras que componen los pavimentos en nuestro país (ver Figura 5): clima cálido en la Selva, clima con gradientes térmicas variables llegando a temperaturas menores a cero grados centígrados en la Sierra y el Altiplano, problemas de humedad y del medio ambiente en la Costa; lo cual representa un reto para los encargados del diseño y mantenimiento de las vías asfaltadas.

Debido a los anteriores problemas es que se busca aplicar asfaltos con la suficiente resistencia y asegurar así su durabilidad. “La resistencia/rigidez del asfalto se deriva de la fricción entre las partículas del agregado, la viscosidad del bitumen, la cohesión de la masa resultante del bitumen y la adhesión entre el bitumen y el agregado. El material resultante, cuando es sometido a tensiones exhibe un comportamiento elástico lineal” (Metso, 2001). Sin embargo no es deseable que un asfalto sea demasiado rígido ya que a resultas de ello se origina el fisuramiento de su superficie, además un exceso en la rigidez implica una elevada viscosidad, la cual es perjudicial para la trabajabilidad del material, dificultando su colocación.

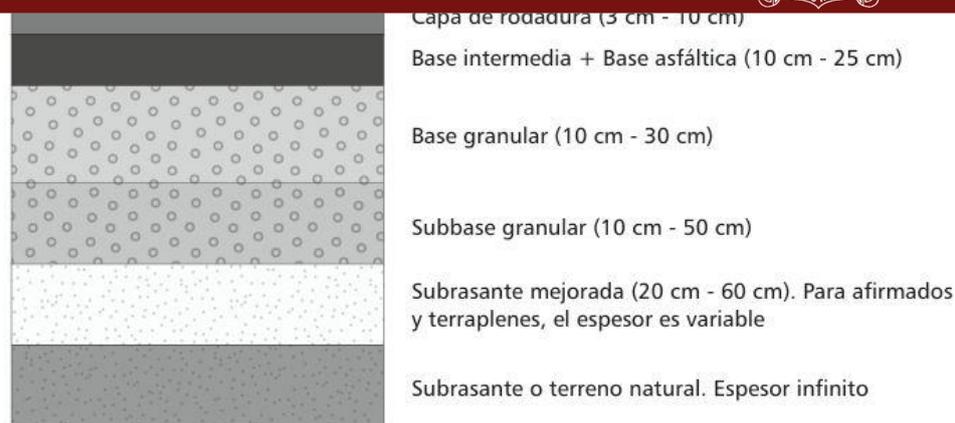


Figura 5. Diseño de pavimentos.

Fuente: MTC, 2014.

Las bajas temperaturas afectan las propiedades reológicas del asfalto y en consecuencia las propiedades físicas de las mezclas, originando el fisuramiento de las capas asfálticas, por contracción térmica y/o por el incremento de la rigidez con la acción combinada del tráfico pesado. El gradiente térmico genera diariamente cambios volumétricos en el interior de la capa asfáltica, los que a su vez producen esfuerzos cíclicos de tracción y compresión, que provocan finalmente su falla por fatiga. La radiación solar severa que se produce en zonas de altura, promueve la evaporación de las fracciones blandas del asfalto y crea un ambiente propicio para la oxidación y el envejecimiento de las estructuras asfálticas. El agua superficial también contribuye a la oxidación del asfalto, al ingresar por los vacíos de la capa de rodadura... el agua alojada en las fisuras del pavimento, genera una presión de poros que gradualmente destruye el pavimento asfáltico (Del Águila, 1999).

### **Rehabilitación de pavimentos asfálticos.**

Continuamente es necesario llevar a cabo labores de rehabilitación de las pistas asfálticas ya que a lo largo del tiempo y debido a la circulación de vehículos, las características de la superficie de rodadura, así como las características estructurales de la misma pista se van deteriorando. Es necesario efectuar a tiempo esta rehabilitación, ya que por cada \$1.00 gastado durante el periodo de pérdida del 40% de calidad del asfalto, se gastaran de \$4.00 a \$5.00 en caso se espere

(International Road Federation, 1996).

El reciclaje es una de las varias alternativas de que se dispone para la rehabilitación de los pavimentos asfálticos. Algunos de los métodos más comunes de rehabilitación son el añadir una sobrecapa de asfalto caliente ya sea esta delgada o gruesa. La selección de la alternativa de rehabilitación dependerá del grado de afectación observado, de la evaluación de laboratorio o de campo del material existente y de los parámetros de diseño (Epps, Little, Holmgreen, & Terrel, 1980)

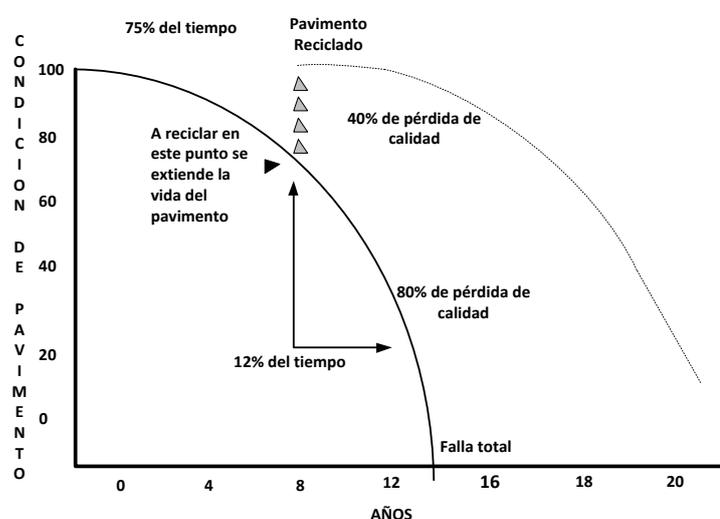


Figura 6. Condiciones de pavimentos v.s. tiempo

Fuente: Introducción al Reciclaje de Pavimentos (Allen, 2007).

Para la rehabilitación de los pavimentos asfálticos se debe buscar un proceso en el cual, en el menor número de pasos, se empleen los trozos más baratos posibles de caucho, así mismo que se empleen asfaltos suaves en vez de los aceites aromáticos más caros, y de que en caso de necesitar un catalizador se emplee el más barato y que no represente un riesgo ocupacional y un peligro ambiental (si es que se puede encontrar tal catalizador).

La "Asphalt Recycling and Reclaiming Association" define cuatro métodos de reciclaje:

reutilizables del pavimento asfáltico son combinados con nuevos materiales, algunas veces junto con un agente de reciclaje, a fin de producir mezclas de asfalto caliente. En las mezclas calientes, típicamente se emplea de 10 a 30% de materiales de pavimentos reciclados (Allen, 2007). Las ventajas del reciclaje en caliente incluyen una performance igual o mejor a las mezclas convencionales de asfalto en caliente y la posibilidad de corregir la mayoría de los defectos de la superficie, el ahuellamiento y el fisuramiento.

2. El reciclaje en caliente “in situ” consiste en un método en el cual el pavimento existente es calentado y suavizado, para luego ser escarificado/molido hasta una profundidad específica. Durante el proceso de reciclaje se puede añadir una nueva mezcla de mezclas asfálticas en caliente (con o sin pavimentos asfálticos reciclados) y/o agente de reciclaje. La profundidad del tratamiento varía entre 20 a 50mm (Allen, 2007). La Asphalt Recycling and Reclaiming Association ha identificado tres procesos para el reciclaje “in situ” en caliente: (1) reciclaje de la superficie; (2) repavimentación; (3) remezclado (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001).
3. El reciclaje “in situ” en frío involucra la reutilización del material del pavimento existente sin la aplicación de calor. Excepto en el caso de cualquier agente de reciclaje, no se necesita acarrear materiales, se puede añadir agregado, por lo tanto los costos de transporte son muy bajos. Normalmente se añade una emulsión asfáltica como agente de reciclaje o ligante. La emulsión es añadida como un porcentaje en peso del material reciclado. Se puede añadir también ceniza, cemento o cal viva. Estos aditivos son efectivos para mezclas sobre asfaltadas y de baja estabilidad. El proceso incluye el pulverizado del pavimento existente, el tamizado del pavimento asfáltico reciclado, la aplicación del agente de reciclaje, la colocación y la compactación. El empleo de un tren de reciclaje, el cual consiste en unidades de pulverizado, tamizado, chancado y mezclado es bastante común. El material procesado es depositado a través de un marco en la unidad de mezclado, de

convencional para asfalto caliente. Típicamente la profundidad del tratamiento se encuentra entre 75 a 100 mm. Las ventajas del reciclaje frío in-situ incluyen un tratamiento adecuado para la mayoría de los problemas del asfalto y la capacidad de ensanchar el pavimento (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001).

4. La restauración a profundidad completa ha sido definida como un método de reciclaje en donde toda la sección del pavimento asfáltico y una cantidad predeterminada de la base es tratada a fin de obtener un campo base estabilizado. Este es básicamente un proceso de reciclado en frío en el cual se añaden diferentes tipos de aditivos a fin de obtener una base mejorada, tales como emulsiones asfálticas, agentes químicos tales como el cloruro de calcio, cemento portland, ceniza y cal. Los cuatro principales pasos de este proceso son pulverización, introducción del aditivo, compactación y la aplicación de la superficie o capa de desgaste. En caso de que el material "in-situ" no sea suficiente para obtener el espesor de base necesario, se pueden incorporar nuevos materiales en el proceso. Se pueden también añadir nuevos agregados al material "in-situ" a fin de obtener una gradación particular de material. Normalmente este método se ejecuta hasta una profundidad de 100 a 300 mm. El equipo consiste en una máquina de reciclaje enganchada a un tanque de agua, un compactador de rodillo tipo pata de cabra. Las ventajas de la restauración a profundidad completa radican en que se tratan todos los problemas del asfalto, se minimizan los costos de acarreo y se pueden conseguir mejoras estructurales significativas, especialmente en la base, se eliminan los problemas de desechos y se mejoran las condiciones de rodadura (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001).

Así mismo se pueden añadir modificantes de caucho en trozos (CRM por sus siglas en inglés), los cuales son incorporados en los

Department of Transportation, 1993).

1. El proceso húmedo en donde se mezcla el caucho des polimerizado en el cemento asfáltico a fin de modificar las propiedades del ligante. El método de mezclado generalmente puede ser dividido en tres categorías: mezclado en lotes, mezclado continuo, mezclado terminal.
2. El proceso en seco, en donde se añade el CRM al agregado caliente o a la mezcla asfáltica caliente (HMA por sus siglas en inglés) durante la producción de esta mezcla. El concepto básico de proceso en seco limita su uso a las mezclas de HMA. La flexibilidad del proceso en seco se refleja en el tipo y grado de modificación que el CRM imparte a la mezcla de pavimento.

Este proceso consiste en el reemplazo de algunos agregados minerales en la mezcla de asfalto por un relativamente elevado porcentaje de caucho en trozos (del 15 al 25%). Al limitar el tiempo en el que el asfalto y los trozos de caucho son mantenidos a temperaturas de mezclado y un trozo de caucho de grano grueso, el trozo de caucho puede conservar su forma específica y rigidez. Para la modificación de los pavimentos asfálticos se emplea comúnmente entre 2 a 7% de polímeros vírgenes; podemos concluir que aún los procesos que dicen emplear fragmentos de caucho des-polimerizados/des-vulcanizados emplean el caucho solamente como un relleno elastomérico y que la cantidad de caucho des-polimerizado representa solamente una fracción mínima del caucho total (Zanzotto & Svec, 1996).

La solución a los problemas de fisuramiento térmico de las estructuras asfálticas, trabajando en climas fríos y zonas de altura, se encuentra en utilizar un ligante asfáltico modificado que permita obtener una mezcla capaz de mantenerse flexible y elástica a la temperatura más baja prevista para su vida en servicio, y con mejor resistencia a la fatiga y al envejecimiento (Del Águila, 1999).

elegido aplicar el proceso en seco, ya que aparentemente el despolimerizar un neumático a fin de aplicarlo en el proceso húmedo representa solamente una mínima fracción del caucho total presente en las mezclas asfálticas.

### **Norma peruana para asfaltos**

De acuerdo con el “Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Sección: Suelos y Pavimentos”, elaborado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones en el año 2014. Se distinguen dos tipos de pavimentos:

1. Pavimentos Asfálticos en frío: el ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente. “Dentro de estas capas asfálticas en frío se encuentran los Tratamientos Superficiales Bicapa, Mortero Asfáltico o Lechada Asfáltica (Slurry Seal), Micro-pavimentos en frío, Macadam asfáltico y las carpetas asfálticas en frío” (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014).
2. Pavimentos asfálticos en caliente: Las que se fabrican con asfaltos a temperaturas de 150°C, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, en su Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción (Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, 2013); se menciona que: El cemento asfáltico a emplear en los riegos de liga y en las mezclas asfálticas elaboradas en caliente será clasificado por viscosidad absoluta y por penetración. Su empleo será según las características climáticas de la región, la correspondiente

Cuadro 3.

Así mismo, en el Manual de Carreteras – Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos; editado por el MTC del Perú (Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, 2014); recomienda lo siguiente para el cemento asfáltico modificado con caucho; en la misma se observa que para temperaturas media anuales de 15 a 5°C el asfalto recomendado deberá tener un PG mínimo de 120 y para temperaturas media anuales menores se deberá emplear asfaltos modificados. Así mismo, en los Cuadros 4 y 5 se muestran las características que deberán reunir cada uno de estos diferentes tipos de asfaltos de acuerdo con la misma fuente del MTC.

Cuadro 3. Selección del tipo de cemento asfáltico

Temperatura Media Anual			
24°C o más	24°C – 15°C	15°C – 5°C	Menos de 5°C
45-50 ó 60-70 ó modificado	60-70	85-100 120-150	Asfalto modificado

Fuente: MTC, 2013

Cuadro 4. Especificaciones del cemento asfáltico

Grado	Ensayo	PEN 40 - 50		PEN 60 - 70		PEN 85 - 100		PEN 120 - 150		PEN 200 - 300	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
<b>Penetración sobre el Material Bituminoso</b>											
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0.1 mm	MTC E-304	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de inflamación, °C	MTC E-312	232		232		232		218		177	
Ductilidad, 25°C, 5cm/min, cm	MTC E-306	100		100		100		100		100	
Solubilidad en Tricloro-etileno, %	MTC E-302	99.0		99.0		99.0		99.0		99.0	
Índice de penetración (Susceptibilidad Térmica) <sup>1</sup>	MTC E-304	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
<b>Ensayo de la mancha (Oliensies)<sup>2</sup></b>											
Solvente Nafta - Estándar		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Nafta - Xileno, %Xileno	AASHTO M 20	Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Heptano - Xileno, %Xileno		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
<b>Pruebas sobre la Película Delgada a 163°C, 3.2 mm, 5h</b>											
Pérdida de masa, %	ASTMD 1754		0.8		0.8		1.0		1.3		1.5
Penetración retenida después del ensayo de película fina, %	MTC E-304	55+		52+		47+		42+		37+	
Ductilidad del residuo a 25°C, 5 cm/min, cm <sup>3</sup>	MTC E-306			50		75		100		100	

(1), (2) Ensayos opcionales para su evaluación complementaria del comportamiento geológico en el material bituminoso indicado.

(3) Si la ductilidad es menor de 100 cm, el material se aceptará si la ductilidad a 15.5 es mínimo 100 cm a la velocidad de 5 cm/min.

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, 2014

Cuadro 5. Especificaciones del cemento asfáltico modificado con caucho

Características	Normas	TIPO 1		TIPO 2		TIPO 3	
		min.	max.	min.	max.	min.	max.
<b>Pruebas sobre el producto original</b>							
Penetración, 25°C, 100g, 5s, dmm	MTC E-304	25	—	25	—	25	—
Penetración, 4°C, 200g, 60s, dmm	MTC E-304	10	—	15	—	25	—
Viscosidad Rotacional Brookfield a 175°C, (*)	ASTM D-2196	1500	—	1500	—	1500	—
Punto de inflamación, COC, °C	MTC E-303	232	—	232	—	232	—
Punto de ablandamiento (anillo y bola); °C	MTC E-307	47	—	47	—	55	—
Recuperación elástica, 25°C; %	ASTM D-6084	40	—	60	—	60	—
Resiliencia, 25°C, %	ASTM D-5329	25	—	20	—	10	—
<b>Pruebas en el residuo de película fina y rotatoria (**)</b>							
Penetración retenida, % de original, 4°C, 200g, 60s; dmm	MTC E-304	75	—	75	—	75	—

(\*) Para modelos de LV, usar velocidades de 3 a 12 rpm

(\*) Para modelos y series de RV y HA, usar velocidades de 2 a 20 rpm

(\*\*) Para casos de controversia usar el residuo de película fina rotativa RTFOT (método ASTM D-2872)

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, 2014

### 2.3.3 Pruebas de laboratorio.

Existen diferentes pruebas de las propiedades físicas a fin de evaluar la calidad y consistencia de los bitúmenes. Existen varios estándares para la ejecución de estas pruebas; p.ej, especificaciones británicas, estándares ASTM y europeos, estándares nacionales, etc. Sin embargo todos estos métodos son prácticamente idénticos con mínimas diferencias. Las pruebas de consistencia son el tipo principal de prueba a fin de describir el grado de fluidez del bitumen a cualquier temperatura.

#### A. Prueba de penetración.

La penetración se define como la distancia vertical atravesada o penetrada por la punta de una aguja estándar dentro del material bituminoso, bajo condiciones específicas de carga, tiempo y temperatura; esta distancia es medida en decimas de milímetro.

La prueba de penetración es empleada como una medida de la consistencia de los materiales bituminosos semi-sólidos y sólidos, en donde mayores valores de penetración constituyen un índice de una consistencia más suave. Así mismo esta prueba es empleada a fin de evaluar la adaptabilidad del bitumen para su uso bajo diferentes condiciones climáticas y tipos constructivos.

El MTC recomienda una penetración mínima de 25 dmm para una carga de 100 gramos, un tiempo de 5 segundos y una temperatura de 25°C para un asfalto sin modificar (ver Cuadro 5), ya que esta temperatura se aproxima a la temperatura de servicio de una mezcla asfáltica en caliente. En el “Manual del Asfalto”, USA se recomiendan los siguientes asfaltos clasificados por penetración para carreteras con diferentes cargas y climas (ver Cuadro 6):

Cuadro 6. Uso de cementos asfálticos

USO DE CEMENTOS ASFLATICOS GRADUADOS POR PENETRACION EN FUNCION AL CLIMA					
Pavimentación	CLIMA				
	Muy Cálido	Cálido	Moderado	Frío	Frígido
<b>AEROPUERTOS</b>					
Pistas de despegue	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Caminos auxiliares	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Aparcamientos	60-70	60-70	60-70	85-100	85-100
<b>CARRETERAS</b>					
Tráfico pesado y muy pesado	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Tráfico medio ligero	40-50	60-70	60-70	85-100	120-150
<b>CALLES</b>					
Tráfico pesado y muy pesado	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Tráfico medio ligero	40-50	60-70	85-100	85-100	120-150
<b>CAMINOS PARTICULARES</b>					
Industriales	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Comerciales estac. Serv.	40-50	60-70	60-70	85-100	85-100
Residenciales	60-70	60-70	85-100	85-100	85-100
<b>APARCAMIENTOS</b>					
Industriales	40-50	40-50	60-70	85-100	120-150
Comerciales	40-50	60-70	60-70	85-100	85-100
<b>ZONA DE RECREO</b>					
Pista de tenis	60-70	60-70	85-100	85-100	85-100
Terrenos de juego	60-70	60-70	85-100	85-100	85-100
<b>BORDILLOS</b>					
Todos	40-50	40-50	60-70	85-100	85-100

Fuente: [www.e-asfalto.com/pavimentos/pavimentos.htm](http://www.e-asfalto.com/pavimentos/pavimentos.htm)

De la anterior Cuadro se puede concluir que para climas fríos o muy fríos es necesario un asfalto con una mayor penetración.

La prueba de penetración en el Perú está normalizada por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones MTC E – 304; la misma que se adjunta en el Anexo 2

## B. Prueba de viscosidad

En esta prueba se mide el torque requerido para rotar un husillo sumergido en la muestra. Se empleara un viscosímetro Brookfield para analizar cada muestra de asfalto/caucho. Las temperaturas fueron medidas en un rango de 60 a 75°C. Estas temperaturas están dentro del rango recomendado por el MTC. En esta prueba se desarrollan Cuadros de temperatura/viscosidad, a fin de estimar las temperaturas de mezclado y compactación de los pavimentos asfálticos; observándose en la Cuadro 5 que el valor recomendado por el MTC para este parámetro es de 1,500°.

Los cementos asfálticos se clasifican bajo tres sistemas diferentes; ellos son: penetración, viscosidad y viscosidad después de envejecimiento. En nuestro país se emplea el sistema de penetración, sin embargo también se emplea la medida de la viscosidad como medida de la trabajabilidad del asfalto. La prueba de viscosidad tiene dos objetivos, el primero es evaluar el cambio de consistencia del material ligante después de mezclarlo con el caucho y el segundo de evaluar la estabilidad de almacenamiento del asfalto/caucho. A fin de normalizar esta prueba se emplea el estándar ASTM D 2196 (Ver Anexo 3).

Así mismo la viscosidad afecta la capacidad de mezclado con el polímero ya que “cuando se tiene una menor viscosidad, la dispersión del polímero en la matriz asfáltica es mucho mejor” (L. Ramirez, 2011).

La viscosidad, resistencia al flujo, es una característica fundamental del bitumen ya que esta determina cómo se comportará el material en un rango de temperaturas. La viscosidad está relacionada con la fatiga y la deformación. Así mismo es importante ya que determina la trabajabilidad del asfalto a una determinada temperatura, asfaltos demasiado viscosos no son fácilmente esparcidos y compactados en la superficie a asfaltar.

La viscosidad es un parámetro importante al momento de tomar medidas del flujo de fluidos, tales como: líquidos; semi-sólidos; gases y aún de los sólidos. Brookfield trata de líquidos y semi-sólidos. Se conoce que la viscosidad es la forma más rápida, precisa y confiable para analizar algunos de los factores más importantes que afectan la performance de un producto (Brookfield Ametex, 2005).

Se debe controlar la viscosidad del asfalto durante la elaboración de las mezclas asfálticas en caliente, debido a que pueden presentar problemas con la temperatura del mezclado. Se ha de garantizar la viscosidad obtenida en el laboratorio. Una baja viscosidad a altas temperaturas de servicio genera ahuellamiento y una muy alta viscosidad, a baja temperatura de servicio lo rigidiza y se presentan fisuras (Vásquez Ruiz, 2010).

Normalmente los asfaltos modificados con caucho de neumáticos descartados presentan altas viscosidades por lo que se requiere el empleo de algún fluidificante, alrededor de 6% de queroseno (Vásquez Ruiz, 2010).

### **C. Punto de ablandamiento**

La prueba del punto de ablandamiento es un método empírico para determinar la consistencia a la penetración de un bitumen oxidado. En esta prueba se colocan dos bolas de acero sobre dos discos de bitumen contenidos dentro de anillos metálicos, luego se calienta la temperatura de estos a una tasa constante (5°C/min) en un baño de agua (para bitúmenes con un punto de ablandamiento de 80°C o más) o de glicerina (para bitúmenes con un punto de ablandamiento mayor a 80°C). El punto de ablandamiento es la temperatura a la cual el bitumen se ablanda lo suficiente como para permitir que las bolas recubiertas de bitumen caigan dentro del plato del fondo ubicado a una distancia de 25 mm. Resumiendo, esta prueba mide la temperatura a la cual la fase del bitumen cambia de semi-sólida a líquida.

El punto de ablandamiento se define como la temperatura a la cual el bitumen ya no puede soportar el peso de una bola de 3.5 gramos (Pavement Interactive, 2007).

Todos los asfaltos son termoplásticos; esto es, se vuelven más duros (mas viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta. Esta característica se conoce como susceptibilidad a la temperatura y es una de las características más importantes de un asfalto. Es por esto que el asfalto no presenta un punto de fusión propiamente dicho, por lo tanto el punto de ablandamiento es la temperatura a la que el asfalto alcanza un determinado estado de fluidez.

Las pruebas de ablandamiento están se ejecutan de acuerdo a la norma MTC E 307 (Ver Anexo 4).

#### **D. Recuperación elástica**

Esta práctica se emplea para evaluar la respuesta elástica de un ligante asfáltico bajo deslizamiento al corte y su recuperación a una temperatura específica. Para la mayoría de los ligantes asfálticos esta temperatura será la mayor temperatura determinada solamente por las condiciones ambientales (sin ajustarla al tráfico, velocidad o carga) (AASHTO, 2014).

El comportamiento elástico puede proporcionar al técnico un indicativo de hasta qué punto es posible que el ligante sea modificado por un polímero elastomérico (AASHTO, 2014). Normalmente la incorporación al ligante de algunos tipos de polímeros proporciona a aquél una elasticidad mayor que la que presenta sin el polímero (Angulo Rodríguez, 2005).

La recuperación elástica (RE) es empleada por muchas agencias de carreteras para especificar el grado de los bitúmenes modificados. Los actuales estándares ASTM/AASHTO para la RE utilizan el ductilómetro estándar de baño como el aparato de medida. Se ha desarrollado un nuevo procedimiento para medir la recuperación

elástica con el Reómetro de Corte Dinámico (RE-RCD), el cual fue usado para probar diferentes ligantes modificados con polímeros. Generalmente los ligantes con mayor RE-RCD mostraron mayor porcentaje de recuperación y resistencia a la fatiga (Clopotel & Bahia, 2012).

La norma empleada por el MTC para determinar la recuperación elástica es la ASTM D 6084 la misma que se muestra en el Anexo 5.

## 2.4 DISEÑO TAGUCHI.

Desde el año de 1960, se ha empleado con gran éxito el método Taguchi a fin de mejorar la calidad de los productos japoneses. Durante los años 80 muchas empresas finalmente reconocieron que los antiguos métodos empleados para garantizar la calidad no eran competitivos con los métodos japoneses. Los antiguos métodos para garantizar la calidad estaban basados principalmente en la inspección de los productos en su cadena de producción y el rechazo de aquellos productos que no cumplían con un adecuado rango de aceptación. Sin embargo Taguchi rápidamente concluyó que ninguna inspección podría mejorar el producto (Simpson, 1989).

Las técnicas Taguchi son técnicas estadísticas para realizar experimentos que pueden determinar las mejores combinaciones de variables de productos y procesos para fabricar o desarrollar un producto. El método del Dr. Taguchi para el diseño de experimentos utiliza técnicas que implican bajos costos y que son aplicables a los problemas y requerimientos de la industria moderna (Pentón & del Castillo, 2012). Esta técnica de diseño se basa en la idea de que el minimizar la variación del comportamiento del producto es la principal forma de mejorar la calidad de este. A fin de conseguir esto último es que se presta especial atención a diseñar sistemas de tal manera que su desempeño sea el más estable y confiable al precio más bajo. Más aún, la técnica Taguchi proporciona la oportunidad de reproducir las muestras en condiciones óptimas para el trabajo experimental y evaluar así la precisión de los resultados

Esta técnica emplea arreglos ortogonales (AO) para la planificación robusta de los experimentos, estos AO son Cuadros que representan el método de realizar los experimentos; los cuales pueden también considerarse como un experimento factorial fraccionado.

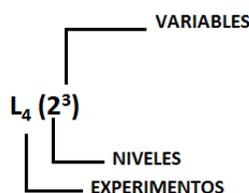


Figura 7. Simbología de los arreglos ortogonales.

L: Indica que es un arreglo ortogonal.

4: Indica el número de experimentos o corridas experimentales.

2: Indica el número de niveles para cada factor.

3: Indica el número de variables o factores del arreglo ortogonal.

El presente trabajo fue desarrollado empleando un AO  $L_4(2^3)$ , el cual se muestra en la Cuadro 7. Este AO puede ser empleado para estudiar la interrelación de dos factores con dos niveles cada uno. Los factores estudiados son el CRM como porcentaje en peso del ligante asfáltico y la temperatura de digestión a fin de conseguir un producto homogéneo.

#### 2.4.1 Pasos del método Taguchi.

Los experimentos se llevarán a cabo de acuerdo con los pasos determinados por la metodología Taguchi, con la finalidad de determinar el porcentaje óptimo de trozos de caucho en la mezcla asfáltica y la temperatura óptima de digestión de dicha mezcla.

El empleo de la metodología Taguchi implica los siguientes pasos (Athreya & Venkatesh, 2012), los cuales se muestran en la Figura 8:

- Identificar la función principal y sus efectos laterales.
- Identificar los factores de ruido, condiciones de prueba y características de calidad.

- Identificar la función objetivo a ser optimizada.
- Identificar los factores de control y sus niveles.
- Seleccionar un arreglo ortogonal adecuado y construir la matriz.
- Ejecutar los experimentos de la matriz.
- Examinar los datos; predecir los niveles óptimos y performance de los factores de control.
- Verificar los experimentos.

### 2.4.2 Relación señal/ruido

En los diseños Taguchi, una medida de la robustez utilizada para identificar los factores de control que reducen la variabilidad en un producto o proceso al minimizar los efectos de los factores incontrolables (factores de ruido). En la Figura 8 se pueden observar los pasos planteados por Taguchi para el diseño de parámetros.

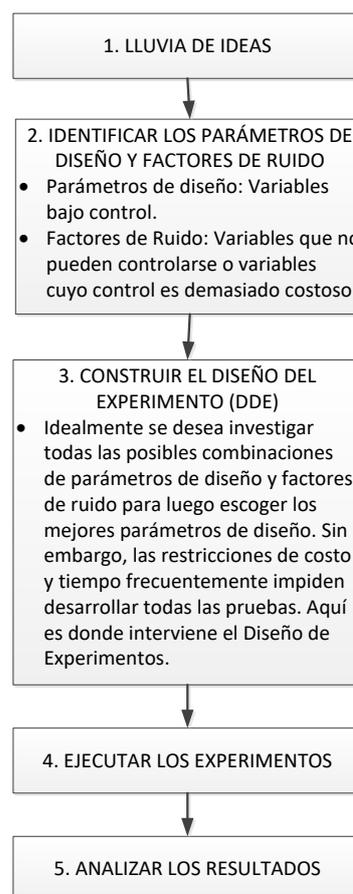


Figura 8. Método Taguchi para el diseño de parámetros.

Fuente: Athreya, S. (2012)

Los factores de control son aquellos diseños y parámetros de procesos que pueden ser controlados. Los factores de ruido no pueden controlarse durante la producción o utilización del producto, pero en algunos casos pueden ser controlados durante el experimento.

La relación señal/ruido mide como varía la respuesta en relación al valor nominal o meta bajo diferentes condiciones de ruido. Es posible elegir diferentes relaciones señal/ruido dependiendo del objetivo del experimento (Figura 9):

S/N	Objetivo del experimento	Característica de los datos	Fórmula
Mayor es mejor	Maximizar la respuesta.	Positivos	$S/N = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right]$
Nominal es mejor	Se desea una meta como respuesta y que la relación S/N esté basada únicamente en la desviación estándar.	Positivos, cero o negativos.	$S/N = -10 \log \left[ \frac{Y^2}{S^2} \right]$
		No negativos, con cero <u>absoluto</u> , en donde la desviación estándar es cero cuando la media es cero.	$S/N = -10 \log [S^2]$
Menor es mejor	Minimizar la respuesta.	No negativo con un valor meta de cero.	$S/N = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right]$

Figura 9. Relaciones señal/ruido

Fuente: <http://support.minitab.com/en-us/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/doe/taguchi-designs/what-is-the-signal-to-noise-ratio/>

Los experimentos Taguchi emplean un proceso de optimización de dos pasos. En el Paso 1 se emplea la relación señal/ruido a fin de identificar los factores de control que reducen la variabilidad. En el Paso 2, se identifican los factores de control que desplazan la media hacia la meta y que tienen un efecto nulo en la relación señal/ruido.

## CAPÍTULO III METODOLOGÍA

### 3.1 INTRODUCCIÓN

El estudio se llevó a cabo en el departamento de Puno, en la zona del Altiplano Peruano-Boliviano y a orillas del Lago Titicaca; con temperaturas anuales promedio que varían entre 21°C y - 22°C (de acuerdo a información proporcionada por el Senamhi). Así mismo el promedio anual de las precipitaciones pluviales registradas en la estación meteorológica de Puno para la serie histórica 1993 – 2010 es de 67.6 mm, de acuerdo con información proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrografía de Puno.

Habiendo precisado el planteamiento del problema y definido el alcance inicial de la investigación, cual es determinar la factibilidad técnica del empleo de caucho de neumáticos reciclados como relleno elastomérico en los pavimentos asfálticos, con la finalidad de mantener o mejorar la performance de estos últimos, y así mismo que estos soporten los factores climatológicos propios de las zonas de altura. Es que se tiene que solucionar primeramente dos problemas específicos: a) ¿Cuál es la cantidad adecuada de caucho reciclado de neumáticos para ser añadida como relleno elastomérico? y; b) ¿Cuál será la temperatura de mezcla más adecuada para añadir los fragmentos de caucho reciclado de neumáticos?

Así mismo, en el presente trabajo se plantean como hipótesis: a) que añadiendo alrededor del 20% (del volumen de bitumen) de caucho reciclado como relleno elastomérico en las mezclas asfálticas, estas mantienen o

mejoran su elasticidad y resistencia; y b) que manteniendo una temperatura de digestión de alrededor de 160°C se pueden añadir fragmentos de caucho reciclado de neumáticos como relleno elastomérico de las mezclas asfálticas y así estas mantendrán o mejoraran su elasticidad y resistencia.

A fin de conseguir demostrar las hipótesis mencionadas, la metodología de la investigación se dividió en las siguientes tareas:

**Primer tarea: Determinar las propiedades mecánicas de las mezclas de caucho-asfalto.**

Se llevaron a cabo pruebas de laboratorio en las muestras de caucho-asfalto a fin de caracterizar propiedades tales como penetración, viscosidad, punto de ablandamiento y recuperación elástica. Se prepararon varias muestras de caucho-asfalto con diferentes cantidades de caucho en trozos; estas mezclas se efectuaron a diferentes temperaturas previamente a su compactación a fin de evaluar los efectos de la interacción entre el caucho y el bitumen en las propiedades mecánicas del asfalto.

### 3.2 MUESTRA Y POBLACIÓN

A fin de constatar la modificación de la variable dependiente, es que en el diseño se han establecido como variables de control, los parámetros normados para un cemento asfáltico 120-150, el cual es el recomendado para climas de altura, con una temperatura media anual de 15 a 5°C (Ver Cuadro 3).

#### 3.2.1 Determinación de la granulometría del caucho.

A fin de analizar la granulometría del caucho empleado en las pruebas este se tamizó; determinándose luego su distribución de tamaños, la misma que se muestra a continuación.

A partir de los resultados se determina que el tamaño medio de la partícula de caucho es de 0.841 mm, correspondiente al tamiz #20, por lo cual se alcanzó una mayor acumulación de material en el tamiz #30. De manera general se aprecia una tendencia en los tamaños de la partícula del material empleado, la que indica la presencia de un

mayor porcentaje de gruesos en comparación con los finos, tal como se observa en la Figura 10.

Cuadro 7. Distribución de tamaño de partículas

Malla	Abertura mm	% Retenido	% Pasa	% Acumulado Retenido	% Acumulado Pasa
4	2.362	9.4889	90.5111	9.4889	90.5111
10	1.651	3.5684	96.4316	13.0573	86.9427
16	1.190	21.0803	78.9197	34.1376	65.8624
20	0.841	16.4872	83.5128	50.6248	49.3752
30	0.595	9.8004	90.1996	60.4252	39.5748
50	0.297	29.5219	70.4781	89.9471	10.0529
200	0.074	9.5115	90.4885	99.4586	0.5414
Fondo	0.000	0.5414	99.4586	100	0.0000

Fuente: Elaboración propia

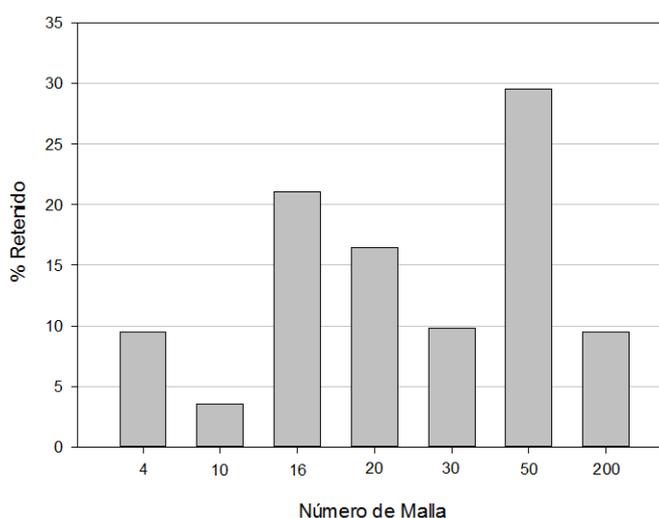


Figura 10. Distribución del tamaño de partículas

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2 Especificaciones del asfalto.

El asfalto recomendado por el MTC para los climas del Altiplano, con temperaturas media anuales de 15 a -5°C es el de PG 120 – 150, cuyas características se presentan en la Hoja de Especificaciones Técnicas de Petroperú y la Hoja de Datos de Seguridad de Materiales publicada por Petroperú, las que se muestran en el Anexo 7.

### 3.2.3 Preparación de la muestra.

Se prepararon dos lotes de agregado y bitumen con un peso de 1,500 gramos cada uno, con contenidos de caucho en trozos de 20 y

25% en volumen. Con la finalidad de que este método funcione, las mezclas de prueba deben contener un rango de caucho que sea igual o esté por encima del contenido estimado como óptimo. De acuerdo con la bibliografía citada se estima que 20% es el valor óptimo de caucho.

Las cuatro muestras modificadas se prepararon mediante el proceso seco en donde se añadieron al agregado las partículas de caucho granulado, con tamaños de entre 0.4 a 10 mm, en el lote y se mezclaron por quince minutos a diferentes temperaturas de mezcla (160 y 165°C para cada lote).

Se prepararon cinco muestras, cada una con las siguientes especificaciones:

M00-00: Muestra patrón, asfalto no modificado.

M01-01: 20% de caucho, 160°C temperatura de digestión.

M01-02: 20% de caucho, 165°C temperatura de digestión.

M02-03: 25% de caucho, 160°C temperatura de digestión.

M02-04: 25% de caucho, 165°C temperatura de digestión.

Las variables independientes (porcentaje en volumen del caucho y temperatura de digestión) fueron manipuladas en dos grados de variación, ya que de la bibliografía se han podido establecer valores referenciales para cumplir con los parámetros establecidos para un pavimento asfáltico para climas de altura. Por lo tanto, se tuvieron dos grupos experimentales. De esta manera se consiguió determinar si distintos niveles de las variables independientes producen diferentes efectos y si estos efectos mejoran o no la performance de los asfaltos en zonas de altura.

#### **3.2.4. Compactación de la muestra.**

Previamente a la compactación de las muestras, se permitió un tiempo de digestión de dos horas a fin de posibilitar una adecuada digestión entre el ligante y los fragmentos de caucho.

Cuadro 8. Criterio de diseño Marshall

Criterio de mezcla	Tráfico ligero ( $<10^4$ ESAL)		Tráfico medio ( $10^4 - 10^6$ ESAL)		Tráfico pesado ( $>10^6$ ESAL)	
	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
Compactación (número de golpes en cada lado de la muestra)	35		50		75	
Estabilidad (mínimo)	2224 N		3336 N		6672 N	
Flujo (0.25 mm)	8	20	8	18	8	16
Vacíos de aire (%)	3	5	3	5	3	5

Fuente: (Christopher et al., 2011)

Posteriormente cada una de las muestras fue calentada a la temperatura de compactación anticipada ( $150^{\circ}\text{C}$ ) y luego compactada con un martillo Marshall; el cual es un aparato que aplica presión a una muestra a través de una pata compactadora. Los parámetros importantes de la compactación son los siguientes:

- Tamaño de la muestra: el tamaño debe ser de 102 mm de diámetro y 64 mm de altura.
- Pata compactadora: debe ser plana y circular; con un diámetro de 98.4 mm, correspondiente a un área de  $76\text{ cm}^2$ .
- Presión de compactación: especificada como la caída de un martillo desde una altura de 457.2 mm con un peso de 4,536 g.
- Número de golpes: típicamente puede encontrarse entre 35, 50 o 70 en cada lado, dependiendo del tráfico anticipado, de acuerdo al Cuadro 8.

Método de compactación: la pata compactadora golpea la muestra en la parte superior, cubriendo casi la totalidad del área de la muestra. Después de 75 golpes, se volteó la muestra y se repitió el procedimiento. Se determinó este número de golpes a fin de conseguir que el diseño del pavimento asfáltico pueda soportar las peores condiciones posibles de tráfico y temperatura.

### 3.3 MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.3.1 Materiales

En el presente trabajo de investigación se emplearon los siguientes equipos especializados para la caracterización y tratamiento de los materiales asfálticos y poliméricos:

- Horno de calentamiento (Cole Palmer).
- Balanza electrónica analítica de 0.001 g de precisión (Cohaus).
- Penetrómetro (Cole Palmer).
- Equipo de punto de ablandamiento (anillo y bola).
- Ductilómetro.
- Equipo de punto de chispa (copa abierta de Cleveland).
- Viscosímetro (Brookfield DV II+)
- Tamices (Taylor).
- Agitador.
- Equipo de estabilidad al almacenamiento.
- Equipo de recuperación elástica por torsión.
- Balanza.
- Plancha de calentamiento con control de temperatura.

#### 3.3.2 Prueba de ensayo por penetración

De acuerdo a la norma MTC E 304-200 (Ver Anexo I) la penetración se define como “la distancia expresada en decimas de milímetro hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura”.

Para la ejecución de esta prueba se contó con el penetrómetro Cole Palmer (Ver Figura 11).

Se prepararon cinco muestras de 85 gramos, cada una con dos moldes de prueba; para la preparación de las muestras se tomaron 850 gramos de material de la muestra de laboratorio. Se procedió a calentar las muestras por treinta minutos hasta que alcancen la fluidez necesaria para su vertido en los moldes cilíndricos de aluminio y con fondo plano. Dichos moldes tienen las siguientes dimensiones (de

acuerdo a la norma MTC E 304 - 200): diámetro 55 mm, profundidad 35 mm. Después de llenar los moldes se cubrieron estos con vasos de vidrio invertidos a fin de evitar la formación de burbujas y protegerlos del polvo.

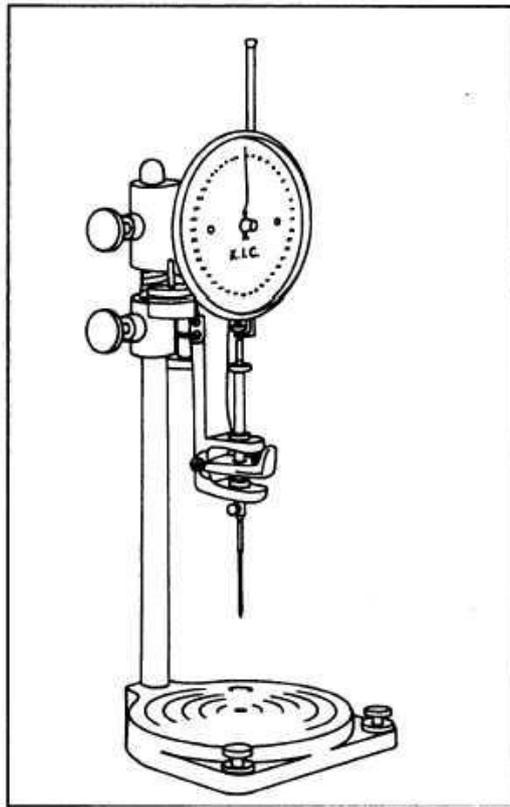


Figura 11. Penetrómetro de asfalto

Fuente: <http://engineeringtraining.tpub.com>

Se dejó enfriar las muestras por un tiempo de una hora y una vez solidificadas se procede a extraerlas de los moldes, sumergiéndolas en un baño de agua a temperatura de 25°C, por el lapso de una hora para su respectivo acondicionamiento.

Transcurrida la hora de acondicionamiento de las muestras se extraen una por una y se las somete a la prueba con el penetrómetro Cole Palmer, para lo que se ejecutaron tres penetraciones por muestra, de acuerdo a lo recomendado en la norma MTC e 304 - 200. Así mismo se tuvo el cuidado de ejecutar cada prueba de penetración

por el lado de la muestra que estuvo en el fondo del molde ya que la superficie superior tiende a formar una película de mayor dureza.

A continuación se muestran los resultados de los ensayos de penetración efectuados con el asfalto modificado con diferentes porcentajes de caucho de neumático y para diferentes temperaturas de digestión (Cuadro 9).

Cuadro 9. Resultados del ensayo de penetración

Ensayos de penetración				
Muestra	Décimas de mm			
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
M01-01	148	155	147	150
M01-02	146	149	149	148
M01-03	140	140	140	140
M01-04	135	135	135	135

Fuente: Preparado por el autor, Instituto del Asfalto

Así mismo se ejecutó un ensayo de penetración para la muestra patrón, los resultados del cual arrojaron un valor de 150 décimas de mm; por lo cual se concluye que esta se encontraba dentro de los parámetros establecidos para este tipo de asfalto.

### 3.3.3 Prueba de viscosidad rotacional

Durante la reacción entre el asfalto y el caucho reciclado hay una reducción temporal de la fracción aceitosa del asfalto y un incremento del tamaño de la partícula de caucho con una consecuente reducción del espacio entre partículas. Esto implica la formación de estructuras tipo gel que incrementan la viscosidad hasta en un factor de 10.

Esta mayor viscosidad permite una mayor flexibilidad a bajas temperaturas, lo que a su vez limita la formación de grietas y la deformación permanente; sin embargo una elevada viscosidad también ocasiona problemas de trabajabilidad del asfalto dificultando su colocación y compactación.

La prueba consiste en determinar la viscosidad aparente de la mezcla de asfalto-caucho midiendo el torque de la rotación de un eje en el material a una determinada velocidad.

A fin de preparar la muestra para la determinación de la viscosidad rotacional Brookfield se observaron las siguientes recomendaciones:

- Ante todo es necesario evitar el sobrecalentamiento de la muestra ya que puede ocasionar su inflamación. La temperatura seleccionada es de 175°C, de acuerdo a lo normado por el MTC, siendo el punto de inflamación del asfalto de 232°C.
- Se eligió un volumen de muestra de 10 ml, el husillo seleccionado fue el número 27 con un radio de 9.525 mm, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.
- Se evita exceder el llenado del contenedor ya que el resultado de la prueba es sensible a la cantidad de muestra que se utilice, es recomendable llenar este a un 25% de su capacidad. El nivel superior de la muestra debe interceptar al brazo del husillo en la muesca que este tiene para tales efectos.
- Se debe agitar suficientemente la muestra a fin de homogeneizarla.

El equipo empleado para la prueba es el siguiente (ver Figura 12):

- Viscosímetro digital Brookfield DV II +
- Termómetro ASTM
- Contenedor térmico Thermosel DV3TRV, el cual permite controlar la temperatura de la muestra hasta 300°C.
- Agitador de muestras.

A continuación se sigue el procedimiento descrito para la ejecución de la prueba:

- Una vez preparada la muestra se coloca está en el contenedor térmico a la temperatura de prueba.
- Se ajusta el husillo, introduciéndolo despacio y con cuidado hasta la profundidad indicada por la muesca en el brazo del mismo.

Luego se mueve el recipiente de la muestra hasta que el husillo se encuentre debidamente centrado.

- Se deja reposar la muestra por espacio de 15 minutos a fin de que se equilibre su temperatura.
- Ya que el modelo de viscosímetro es DV II +, la velocidad de rotación recomendada por el fabricante es de 12 rpm.

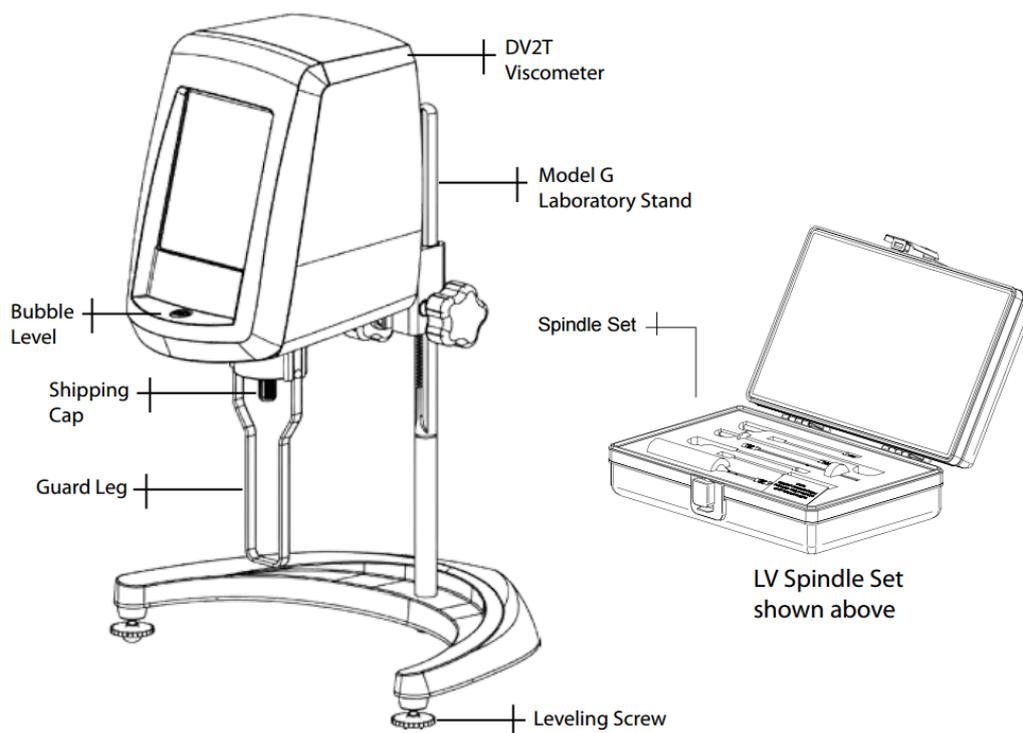


Figura 12. Viscosímetro Brookfield DV II+

Fuente: Brookfieldengineering.com

Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Resultados de la prueba de viscosidad

Ensayos de viscosidad				
Muestra	Viscosidad Cp	Temperatura °C	Velocidad rpm	Torque %
M00-00	1500	175	12	3
M01-01	2400	175	12	4.8
M01-02	2400	175	12	4.8
M01-03	3600	175	12	7.2
M01-04	3600	175	12	7.2

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.4 Punto de ablandamiento

El punto de ablandamiento se define como la media de las temperaturas a la cual dos discos de bitumen se hacen lo suficientemente suaves que no puede soportar el peso de una bola de 3.5 gramos caiga a una distancia de 25 mm. Se consigue medir el punto de ablandamiento mediante el método de anillo y bola, presentándose los resultados en °C. Este es un indicador de la rigidez del asfalto, muestra la tendencia del material a fluir a elevadas temperaturas.

Una mayor rigidez del asfalto implica una mayor resistencia a la deformación permanente; sin embargo a bajas temperaturas el asfalto no debe ser demasiado rígido ya que es bien conocido que si el asfalto tiene un bajo punto de ablandamiento será fácil que se presenten fracturas dentro de este.

Para la ejecución de la prueba de punto de ablandamiento se siguió la norma MTC e 307 – 2000, la que además requiere contar con el siguiente equipo:

- *Anillos de bronce*, de bordes cuadrados con las dimensiones mostradas en la Figura 13.
- *Platos de base*, hechos de material no absorbente, son espesor suficiente para prevenir la deformación y de tamaño adecuado para mantener dos o más anillos. Los platos serán planos.
- *Bolas de acero*, de 9.5 mm de diámetro, pesando cada una 3.5,  $\pm 0.05$  g.
- *Guías de contacto de las bolas*, confeccionadas de bronce, con la forma, apariencia y dimensiones de la Figura 12.
- *Baño*, recipiente de vidrio que se puede calentar, con un diámetro interno no menor a 85 mm y altura entre la base y el borde de 120 mm como mínimo, con una capacidad de 800 ml.

- *Soporte de anillos y montaje completo*, un soporte de broce diseñado para sostener los anillos en posición horizontal, con la forma y dimensiones mostradas en la Figura 13.
- *Termómetro*, el que se colocará en el montaje, cuidando que el extremo del bulbo esté a nivel con el fondo de los anillos y dentro de los 13 mm alrededor de ellos, pero sin tocar los anillos ni el soporte.
- *Líquido para el baño*, el cual deberá ser agua destilada recién hervida para evitar la formación de burbujas.
- *Agentes aislantes*, consistentes en aceites siliconados para evitar la adherencia del bitumen sobre el plato base al momento de preparar los discos.

Preparación de las muestras: antes de proceder con la preparación de las muestras se verifica que se cuenta con los materiales y equipos necesarios para la prueba. Luego se procede de la siguiente manera:

- Se calienta la muestra de material bituminoso en forma cuidadosa, agitándola frecuentemente para evitar los sobrecalentamientos localizados, hasta asegurar que este lo suficientemente fluida para poderla verter. Al agitarla se debe evitar la formación de burbujas.  
El calentamiento de la muestra no debe tomar más de 60 minutos y en ningún caso la temperatura excederá los 110°C por encima del punto de ablandamiento esperado.
- Se calientan los dos anillos de bronce sin el plato base, aproximadamente a la misma temperatura del producto asfáltico y luego se colocan estos sobre el plato base, tratado con el aceite siliconado como aislante.
- Se vierte el producto dentro de los anillos con un ligero exceso y se deja enfriar a temperatura ambiente por espacio de 30 minutos.
- Cuando las muestras están frías se corta el exceso del material de la parte superior con un cuchillo precalentado,

para que la superficie del disco coincida con la parte superior del anillo.

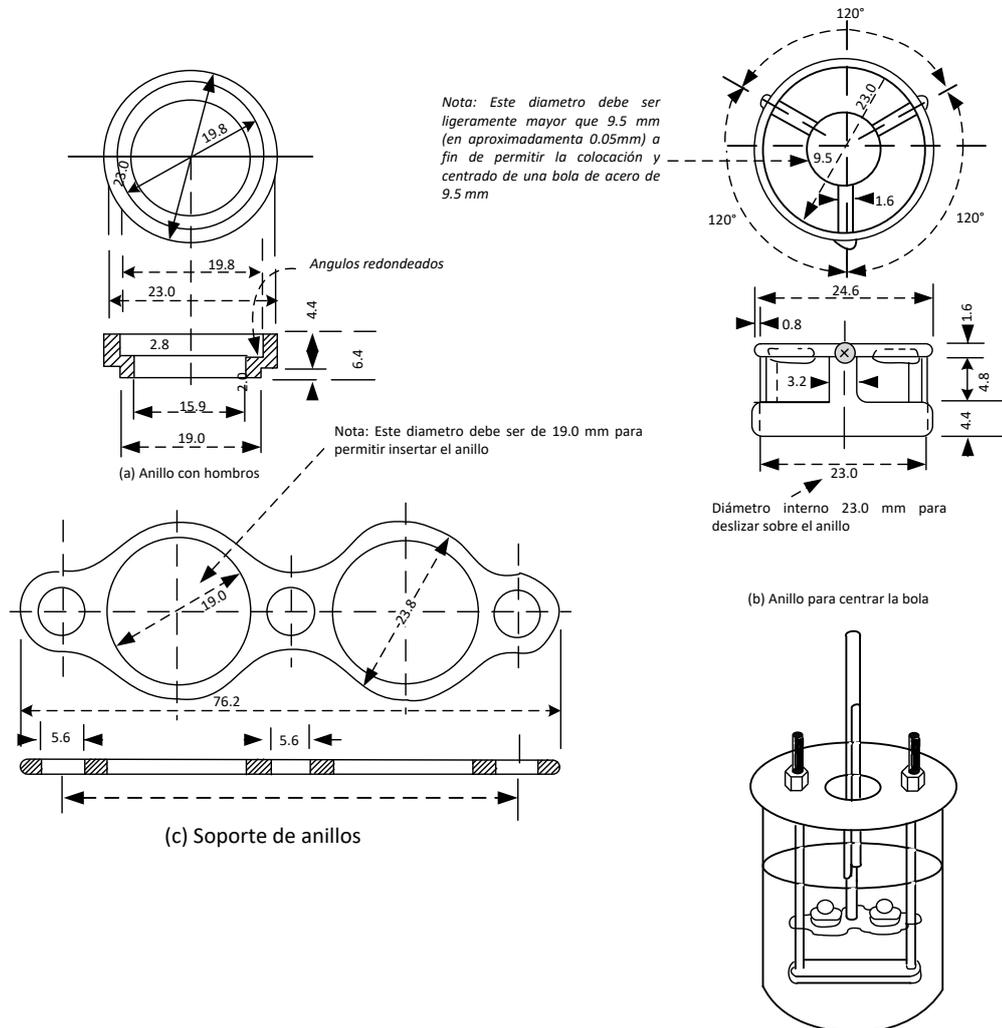


Figura 13. Soporte de anillos y montaje

Fuente: MTC E 307 - 200

Una vez preparadas las muestras se continúa con el siguiente procedimiento:

- Se seleccionó agua destilada como baño líquido ya que se espera un punto de ablandamiento menor a 80°C, se empleó un termómetro de 15 centímetros. La temperatura al iniciar la prueba fue de 5°C.

- Se ensamblaron los aparatos colocando los anillos con las muestras, las guías para las bolas y los termómetros en posición. A continuación se llenó el baño líquido hasta una altura de 105 mm. Empleando las tenazas se colocaron las bolas en el baño a fin de que adquirieran la misma temperatura de iniciación que el resto del montaje.
- Se colocó todo el conjunto del baño en agua con hielo y se calentó suavemente hasta alcanzar una temperatura de iniciación de 5°C y mantenerla durante 15 minutos.
- Empleando las tenazas se colocaron las bolas en las guías para su centrado.
- Se calentó el baño de manera pausada a fin de asegurar que la velocidad de elevación de la temperatura fuese constante a 5°C.
- En el momento en que el producto bituminoso rodeando la bola toca el fondo del baño se anotó la temperatura indicada para cada anillo y bola. En caso de que la diferencia entre las dos temperaturas observen una diferencia que exceda en 1°C la prueba deberá repetirse.

Resultados. En el Cuadro 11 se muestran los resultados para los ensayos del punto de ablandamiento.

Cuadro 11. Resultados para el punto de ablandamiento

Ensayos de Punto de Ablandamiento			
Muestra	Punto de ablandamiento °C		
	Bola 1	Bola 2	Promedio
M00-00	50.0	51.9	51.0
M01-01	58.4	60.0	59.2
M01-02	61.0	59.0	60.0
M01-03	59.8	59.8	59.8
M01-04	61.6	61.9	61.8

Fuente: Elaboración propia.

Tal como se observa, el resultado se obtiene del promedio de temperatura en el que las bolas tocan el fondo de la base.

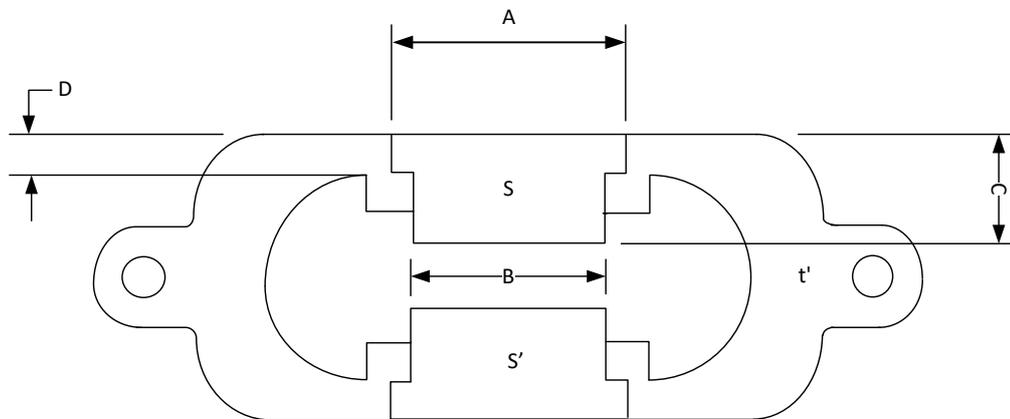
### 3.3.5 Recuperación elástica.

Esta prueba mide la recuperación elástica de un material bituminoso mediante la deformación recuperable determinada después de separar mediante elongación una briqueta espécimen del material, tal como se muestra en la Figura 14. Las muestras son elongadas hasta una distancia específica a una velocidad y temperatura específica. De acuerdo a lo determinado en la norma ASTM D 6084 – 97 esta prueba debe efectuarse a una temperatura de  $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  y a una velocidad de  $5 \text{ cm/min} \pm 5.0\%$ .

Para la ejecución de esta prueba se emplearon los siguientes materiales:

- *Molde.* El molde es de diseño similar al mostrado en la Figura 14, el material del mismo es de bronce y sus dimensiones son las mostradas.
- *Baño de agua fin de acondicionar la muestra.* El baño de agua se mantuvo a una temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ , con una variación no mayor a  $0.1^{\circ}\text{C}$ ; de acuerdo a lo especificado por la norma empleada. La muestra fue sumergida a una profundidad de 12 cm. Colocada sobre una bandeja perforada ubicada a 5 centímetros del fondo del baño.
- *Máquina de prueba.* Para la elongación de la muestra de material bituminoso, esta permite una elongación continua de una muestra sumergida en el baño de agua. Los dos ganchos son separados a una velocidad uniforme de 50 mm por minuto. Esta máquina de prueba incorpora centímetros en sus deslizaderas a fin de medir la elongación de las muestras asfálticas.
- *Termómetro.* Un termómetro ASTM 63C con un rango de  $-8$  a  $32^{\circ}\text{C}$ .
- *Tijeras.* Capaces de cortar el material bituminoso.

- *Horno.* Con capacidad de mantener una temperatura de  $135 \pm 5.5^{\circ}\text{C}$



- A  $36.5 \pm 0.1$  mm
- B  $30 \pm 0.1$  mm
- C  $17 \pm 0.1$  mm
- D  $10 \pm 0.1$  mm

**Figura 14.** Molde para muestras

Fuente: ASTM D 6084-97

La preparación de la muestra se efectuó de la siguiente manera:

- En primer lugar se calienta la muestra a una temperatura entre  $75$  y  $100^{\circ}\text{C}$ , la cual está por encima del punto de ablandamiento.
- Se unta las superficies en donde descansarán los moldes y a los moldes con una mezcla en partes iguales de glicerina y talco; esto a fin de evitar que el bitumen se adhiriera a estas superficies. Se debe tener cuidado de no mover las diferentes piezas del molde a fin de no distorsionar la forma de la muestra.
- Una vez calentado el bitumen se rellenan los moldes con este, teniendo cuidado de llenarlos completamente. Posteriormente se dejan enfriar al medio ambiente por espacio de  $30 - 45$  minutos.

Una vez preparadas las muestras se procede de la siguiente manera:

- Se sumergen los moldes con las muestras en un baño de agua a la temperatura de prueba de 25°C por un periodo de ½ hora.
- Removiendo los moldes de sus bases se aseguran estos a la máquina de pruebas, retirándose cualquier material en exceso con un cuchillo o espátula. Se debe evitar deformar los moldes.
- Los moldes permanecen en el baño de agua a la temperatura de prueba por un tiempo de 90 minutos antes de iniciar la prueba.
- Antes de comenzar a elongar los moldes se deberá verificar que la escala de la máquina de pruebas este en cero.
- Se detiene la elongación a una distancia de  $10 \pm 0.25\text{cm}$  y se cortan las muestras por la mitad empleando para ello una tijera. Se permite que las muestras se mantengan en el baño de agua a la temperatura especificada por un tiempo de 60 minutos. Luego de los 60 minutos se retrocede el equipo hasta una posición en donde los extremos de las muestras nuevamente se toquen.

En el Cuadro 12 se muestran los resultados de los ensayos de recuperación elástica efectuados a la muestra patrón y a cada una de las muestras con diferentes contenidos de caucho y diferentes temperaturas de digestión. Se debe indicar que, de acuerdo a lo especificado en la norma ASTM D 6084 – 97, la prueba se efectuó con tres especímenes repetidos de la misma muestra. Finalmente el resultado de la recuperación elástica viene dado por el promedio de los resultados para las tres diferentes muestras.

Así mismo, para el cálculo de la recuperación elástica se empleó la siguiente formula:

$$RE = \frac{E - X}{E} \times 100$$

En donde:

E = Elongación original de la muestra, en centímetros.

X = Elongación de la muestra con los extremos cortados en contacto

Cuadro 12. Resultados del ensayo de recuperación elástica

Ensayos de recuperacion elástica			
	Muestra 1		
	E	X	RE
M00-00	10.0	6.0	40%
M01-01	10.0	4.1	59%
M01-02	10.0	3.3	67%
M01-03	10.0	3.2	68%
M01-04	10.0	2.0	80%
	Muestra 2		
	E	X	RE
M00-00	10.0	5.8	42%
M01-01	10.0	4.0	60%
M01-02	10.0	3.3	67%
M01-03	10.0	3.1	69%
M01-04	10.0	2.0	80%
	Muestra 3		
	E	X	RE
M00-00	10.0	6.3	37%
M01-01	10.0	3.8	62%
M01-02	10.0	3.2	68%
M01-03	10.0	3.1	69%
M01-04	10.0	1.8	82%

Promedios	
M00-00	40%
M01-01	60%
M01-02	67%
M01-03	69%
M01-04	81%

Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

En esta sección se muestran los resultados del diseño de la mezcla asfáltica modificada con caucho reciclado de neumáticos. Además se analizan los efectos de la concentración de caucho y la temperatura de digestión en las características de performance seleccionadas como deseables para los asfaltos de altura.

#### **Segunda tarea: Modelo analítico.**

El modelo analítico emplea el método de diseño Taguchi, mediante el cual se analizó la influencia relativa del porcentaje de fragmentos de caucho reciclado de neumáticos a ser mezclados con el pavimento asfáltico así como la temperatura de digestión de esta mezcla. Para ello Taguchi ha desarrollado una serie de arreglos ortogonales, los más utilizados y difundidos según el número de factores a analizar se muestran en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Arreglos ortogonales Taguchi.

Nro. de Factores	Arreglo a utilizar	Nro. De condiciones a probar
Entre 1 y 3	L4	4
Entre 4 y 7	L8	8
Entre 8 y 11	L12	12
Entre 12 y 15	L16	16
Entre 16 y 31	L32	32
Entre 32 y 63	L64	64

Fuente: Pentón & Del Castillo 2012.

Con el diseño Taguchi se pretende que el pavimento asfáltico sea insensible a los climas de altura, mejorando su elasticidad y resistencia. Se tiene como hipótesis que son dos los factores que afectan las características deseables para un asfalto adecuado para climas de altura (penetración, viscosidad, ablandamiento y recuperación elástica), siendo estos el porcentaje de caucho en la mezcla y la temperatura de digestión de esta.

En nuestro caso estamos interesados en analizar el efecto de dos variables (factores) a dos niveles cada uno, por lo que se eligió el arreglo ortogonal  $L_4(2)^3$ . Esto implica que se ejecutaron 4 pruebas o condiciones experimentales. Explicando la simbología del arreglo ortogonal empleado podemos mencionar que: 4 es el número de experimentos a realizar; 2 representa al número de niveles de las variables (factores); 3 es el número de variables independientes que se pueden analizar, recordamos que en nuestro caso son dos las variables independientes a analizar (Ver Cuadro 14).

En general, para un arreglo a dos niveles, el número de columnas (efectos o factores) que se pueden analizar, es igual al número de filas menos uno (Pentón & del Castillo, 2012).

Cuadro 14. Factores investigados.

Factor	Descripción	Nivel 1	Nivel 2
A	% de caucho en la mezcla	20%	25%
B	Temperatura de digestión	160°C	165°C

Fuente: Elaboración propia.

A fin de analizar el efecto de estos factores, es necesario variarlos, es decir probarlos bajo diferentes niveles cada uno; para lo cual se han seleccionado dos niveles para cada factor, llamándolos arbitrariamente nivel bajo (1) y nivel alto (2). En el Cuadro 15 se muestra una descripción de ambos factores y sus niveles.

En donde:

- El factor A representa al volumen de caucho en la mezcla del agregado asfáltico.

- El factor B representa la temperatura de digestión de la mezcla asfáltica con el agregado.
- Como en nuestro caso se analizaron solamente dos factores, de acuerdo a las técnicas de diseño de arreglos ortogonales se emplearan solamente las combinaciones de las columnas 1 y 2 del Cuadro 14.

Cuadro 15. Arreglo ortogonal  $L_4(2)^3$ 

Corrida	No. de columna		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1
2 Factores: Columnas 1 y 2.			
3 Factores: Las tres columnas.			

Fuente: Elaboración propia.

Explicando la Cuadro 14 podemos mencionar que para la corrida (experimento) 1, tanto el volumen de caucho como la temperatura de digestión se fijan en su valor mínimo (20% de caucho y 160° C para la temperatura). En la segunda corrida el volumen de caucho permanece en su valor mínimo y se incrementa la temperatura a su valor máximo (165°C). En la tercera corrida se aumenta el volumen de caucho a su valor máximo y se mantiene la temperatura en su valor mínimo. En la cuarta y última corrida ambos factores se fijan en su valor máximo. De esta manera se cumple con investigar todas las combinaciones posibles para los factores.

En el Cuadro 16, se muestra el arreglo ortogonal empleado y los resultados obtenidos de las diferentes pruebas para cada una de las variables de control.

#### 4.1 RAZÓN SEÑAL/RUIDO

El método robusto de Taguchi es útil para determinar la mejor combinación de factores controlables, en nuestro caso el porcentaje de caucho añadido al asfalto y la temperatura de digestión, ofrece mayor insensibilidad a los factores incontrolables, para lo cual se debe calcular la razón señal/ruido.

Cuadro 16. Resultados para las variables de control

Corrida	Factores			Variables de control			
	No. de columna			Penetración dmm	Viscosidad cP	Ablandamiento °C	Rec. Elástica %
	1	2	3				
1	1	1	1	150	2400	59	60
2	1	2	2	148	2400	60	67
3	2	1	2	140	3600	60	69
4	2	2	1	135	3600	62	81

Fuente: Elaboración propia.

La combinación que maximice el valor para la viscosidad, punto de ablandamiento y recuperación elástica es el arreglo más adecuado para rechazar los efectos que producen las variables no controladas, como lo que se busca es maximizar los valores de las variables de control se aplicó la siguiente fórmula:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right)$$

En donde  $Y$  es el valor de la característica de la calidad medida a partir de las pruebas y  $n$  es el número de ensayos de la prueba.

Así mismo se desea minimizar el valor de la variable penetración, ya que asfaltos con una menor penetración son asfaltos más resistentes. Es por ello que para minimizar este valor se aplicó la siguiente fórmula:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right)$$

En las siguientes Cuadros se muestran los resultados del cálculo de la razón señal/ruido para los factores de control propuestos y los diferentes factores controlables.

A partir de los resultados de la Cuadro 17, dado un incremento en el porcentaje de caucho, para la razón S/N para los diferentes factores de control. Se puede concluir que en proporción al incremento del porcentaje de caucho en la mezcla asfáltica hay un incremento en tres de las características de performance de este: viscosidad, ablandamiento y recuperación elástica. Y una disminución en la penetración del asfalto,

debida principalmente al incremento de la viscosidad. Lo cual es deseable para asfaltos empleados en condiciones de altura. Así mismo, se observa que los valores de la viscosidad son los de mayor variación, siguiéndole en orden de importancia la recuperación elástica y el punto de ablandamiento.

**Cuadro 17.** S/N Para el cambio en el porcentaje de caucho.

Factor	A	B	C	D
Nivel 1	298	4800	119.2	128
Nivel 2	275	7200	121.55	149
TOTAL	573	12000	240.75	277
Razon S/N, Nivel 1	-46.47	73.87	39.88	41.22
Razon S/N, Nivel 2	-45.78	80.16	44.71	46.49
Cambio S/N	0.70	6.28	4.83	5.27

Fuente: Elaboración propia.

**Cuadro 18.** S/N Para el cambio en la temperatura de digestión

Factor	A	B	C	D
Nivel 1	290	6000	119	129
Nivel 2	283	6000	121.75	148
TOTAL	573	12000	240.75	277
Razon S/N, Nivel 1	-46.24	78.57	44.52	45.22
Razon S/N, Nivel 2	-46.03	78.57	44.72	46.42
Cambio S/N	0.21	0.00	0.20	1.19

Fuente: Elaboración propia.

Del Cuadro 18 podemos observar que la razón S/N de los diferentes factores de control para el cambio en la temperatura de digestión aumenta con el incremento de temperatura; sin embargo la variación ocurre en menor grado que aquella ocasionada por mayores porcentajes de caucho presentes en la mezcla asfáltica.

Por lo anterior es que podemos concluir que es más importante incrementar el porcentaje de caucho presente en la mezcla que la temperatura de digestión. Lo cual es un resultado favorable para evitar incurrir en los mayores costos de tener que calentar la mezcla a mayores temperaturas.

El arreglo ortogonal empleado para llevar a cabo el diseño del experimento mediante el método Taguchi ha simplificado el uso de este tipo de diseño, en contraste con los enfoques tradicionales.

#### 4.1 PENETRACIÓN

La penetración disminuye en tanto se incrementa la cantidad de caucho y a una cantidad de 25% esta se mantiene constante. Este comportamiento se justifica debido a que el caucho hace que el asfalto sea más viscoso. Se conoce que el tiempo de reacción influencia el valor de la penetración, sin embargo esta variable no ha sido estudiada en el presente trabajo, habiéndose fijado un tiempo de reacción de 90 minutos.

#### 4.2. VISCOSIDAD

Las pruebas de laboratorio confirman que la viscosidad aumenta cuando el caucho reciclado de neumático se añade al ligante asfáltico, lo cual ocurre debido a la absorción de los aceites aromáticos del asfalto y al esponjamiento de las partículas de caucho. Los ligantes con 20 y 25% de caucho exhiben un incremento de viscosidad de aproximadamente 69% y 79% de la viscosidad de un asfalto no modificado. A partir de estos datos se hace aparente que el efecto del caucho sobre la viscosidad, es más pronunciado a mayores concentraciones de este.

Un bitumen con una mayor viscosidad generalmente tendrá una mayor temperatura de falla y por lo tanto una mayor vida útil debido a una mayor estabilidad ante la temperatura.

Además de un incremento de la viscosidad a mayores temperaturas, las partículas de caucho también contribuyen a mejorar la resistencia a la formación de fracturas en pavimentos asfálticos a bajas temperaturas, disminuyendo el índice de envejecimiento

#### 4.3 PUNTO DE ABLANDAMIENTO

El punto de ablandamiento aumenta en tanto aumenta el porcentaje de caucho, lo cual es un indicativo de una mejor performance ante la deformación permanente. Es mediante la adición de fragmentos de caucho que se consigue disminuir la rigidez del asfalto y hacerlo menos proclive a desarrollar fracturas internas que luego se reflejen en la superficie de este. Se ha observado que mientras mayor sea la cantidad de fragmentos de caucho, mayor será la viscosidad del asfalto y el punto de ablandamiento será también mayor.

El incremento del contenido de caucho en la mezcla puede ser correlacionado con el incremento en la relación asfaltenos/resinas lo cual probablemente mejora las propiedades de rigidez, haciendo que la mezcla asfalto-caucho sea menos susceptible a los cambios de temperatura. El incremento en el valor del punto de ablandamiento origina un ligante asfáltico más rígido, el cual tiene la capacidad de mejorar su recuperación después de la deformación elástica.

La variación del punto de ablandamiento debido a las diferentes temperaturas de digestión y contenido de caucho en la mezcla asfáltica mostró resultados significativos en todas las mezclas modificadas. El incremento en la temperatura de digestión ocasionó un incremento en la masa de caucho mediante la interacción y el esponjamiento del caucho en el bitumen durante el proceso de digestión. Esto, a su vez, originó el incremento de los valores del punto de ablandamiento de las muestras de asfalto-caucho. El incremento del contenido del caucho en la mezcla puede correlacionarse con el incremento de la relación asfaltenos/resinas, la cual probablemente mejoro las características de rigidez del asfalto, haciendo que esta mezcla modificada sea menos susceptible a los cambios de temperatura.

#### **4.4 RECUPERACIÓN ELÁSTICA**

Al mejorar las características de la recuperación elástica se consigue disminuir la susceptibilidad al gradiente térmico del asfalto, disminuyendo la fragilidad de este en los climas fríos.

Así mismo un asfalto con mejores valores de recuperación elástica tiene una menor susceptibilidad a los tiempos de aplicación de la carga, lo cual implica una mejor resistencia a un tráfico más intenso. Ya que la resistencia a la deformación permanente y a la rotura incrementa en un rango más amplio de temperaturas, tensiones y tiempos de carga.

De acuerdo a todo lo anteriormente expuesto podemos concluir que: “La solución a los problemas de fisuramiento térmico de las estructuras asfálticas trabajando en climas de altura, se encuentra en utilizar un ligante asfáltico modificado que permita obtener una mezcla capaz de mantenerse flexible y

elástica a la temperatura más baja prevista para su vida en servicio y con mejor resistencia a la fatiga y al envejecimiento” (Del Águila, 1999).

### CONCLUSIONES

- El presente estudio permite concluir que la influencia que ejerce la cantidad de caucho reciclado de neumático sobre el comportamiento del asfalto-caucho (Promedio S/N = 4.27), es mayor que aquella de la temperatura de digestión (Promedio S/N = 0.4). Al usar caucho reciclado como modificador del ligante asfáltico la viscosidad aumentó en 140%, lo que le confiere al asfalto una mayor flexibilidad a bajas temperaturas y mejor estabilidad a altas temperaturas.
- Al haber incrementado la recuperación elástica del 40% para el asfalto virgen hasta un 81% para el asfalto modificado con caucho se concluye que todos los ligantes asfálticos mezclados con caucho presentan una mejor performance en climas fríos, mejorando la resistencia a la deformación permanente y por ende a la formación de fracturas. La razón de esto definitivamente se encuentra conectada a las partículas elásticas de caucho.

- Así mismo se concluye que con un incremento de la temperatura de digestión a 165°C se mejoran las propiedades del asfalto, sin embargo la importancia relativa de la temperatura de digestión es menor a aquella del porcentaje de caucho reciclado.
- A fin de conseguir mejores características en los rangos de bajas temperaturas, se deben tener presente factores tales como una temperatura de digestión de 165°C y un volumen de caucho en la mezcla de 25%. Ya que estos son factores que gobiernan la performance de las mezclas asfálticas.
- El método Taguchi nos posibilitó emplear técnicas de diseño de experimentos de bajo costo y la vez aplicables a nuestro problema; encontrando la combinación óptima de factores (cantidad de caucho reciclado y temperatura de digestión) y consiguiendo el desempeño más estable del asfalto-caucho.
- La modificación del asfalto mediante caucho es una nueva área que tiene posibilidades prometedoras a futuro para mejorar aún más las propiedades del asfalto-caucho y al mismo tiempo eliminar el problema de la disposición de los neumáticos usados.

### RECOMENDACIONES

- En el presente trabajo no se estudió el efecto del tiempo de reacción sobre los parámetros de penetración, viscosidad, punto de ablandamiento y recuperación elástica. Asumiéndose el valor de 90 minutos para este caso, en base a referencias bibliográficas. Sin embargo se recomienda realizar estudios a fin de verificar la veracidad de este parámetro.
- Se recomienda así mismo, realizar estudios a fin de determinar el tamaño adecuado de las partículas de caucho, ya que se conoce que este parámetro podría afectar las propiedades del asfalto-caucho.
- Se recomienda aplicar el presente estudio a fin de diseñar el ligante asfáltico para una de las vías de nuestra región y, verificar que las necesidades de mantenimiento se prolongan a una periodicidad de siete años, en vez de los cuatro, que normalmente se necesitaban en estos casos.

## BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (2014). Standard Practice for Evaluating the Elastic Behavior of Asphalt Binders Using the Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. 6.
- Allen, S. (2007). Introduction to Pavement Recycling. *Optics Letters*, 32, 1411-1413.
- Angulo Rodríguez, R. A. (2005). Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos (pp. 94).
- Asphalt Recycling and Reclaiming Association. (2001). Basic Asphalt Recycling Manual. doi: 10.1016/0300-483X(94)90248-8
- ASTM. (2002). Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements 1. *Transportation*, 04, 1-6. doi: 10.1520/D0008
- Athreya, S., & Venkatesh, Y. D. (2012). Application Of Taguchi Method For Optimization Of Process Parameters In Improving The Surface Roughness Of Lathe Facing Operation. *International Refereed Journal of Engineering and Science*, 1, 13-19. doi: 2319-1821

- Avellán Cruz, M. D. (2007). *Asfaltos Modificados Con Polímeros* (pp. 162).
- Botasso, G., Rebollo, O., Cuattrocchio, A., & Soengas, C. (1995). *Ejecución de Pavimento con mezcla asfáltica densa con utilización de caucho reciclado*. 1-12.
- Brookfield Ametex. (2005). *What is Viscosity?* Retrieved 02/03/2016, from <http://www.brookfieldengineering.com/education/what-is-viscosity.asp>
- Clopotel, C. S., & Bahia, H. U. (2012). Importance of elastic recovery in the DSR for binders and mastics. *Engineering Journal*, 16, 99-106. doi: 10.4186/ej.2012.16.4.99
- Chávez Alderete, J. C. (2005). *Estudio de Factibilidad Técnico-Económica entre un Pavimento de Asfalto Convencional y uno Modificado con Agregado de Caucho*.
- Christopher, W. J., Crawford, F. J., Edward, T. H., Adock, M., Delaney, E. P., & Freer, H. (2011). *A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary*. NCHRP Report No. 673. *Transportation Research Board*, 285.
- Del Águila, P. (1999). *Experiencias sobre el diseño y criterios para la construcción de pavimentos en zonas de altura*. Sevilla.
- Elías, X. (2015). *Reciclaje y Tratamiento de Residuos Diversos*.
- Epps, J. A., Little, D., Holmgreen, R., & Terrel, R. (1980). *Guidelines for recycling pavement materials*. *NCHRP Report*(224).

- European Asphalt Pavement Association. (2005). *Industry Statement on the recycling of asphalt mixes and use of waste of asphalt pavements* . Brussels: European Asphalt Pavement Association.
- European Asphalt Pavement Association. (2014). Asphalt the 100 % recyclable construction product. 1-21.
- Federal Highway Administration. (2015). Introduction to Pavement Recycling. Retrieved Feb, 06, 2016, from [www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/01.cfm](http://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/01.cfm)
- Fernandes, V. (2008). *Caracterización de asfalto modificado con caucho molido proveniente de neumáticos usados*.
- Gonzalez, S. M., & Huaman, M. I. A. O. (2001). Laboratorio No . 2 de Mecánica de Suelos y Pavimentos MANUAL DE LABORATORIO. 1.
- Greve, H.-H. (2000). Rubber, 2. Natural *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Hanson, D. I., Epps, J. A., & Hicks, R. G. (1996). *Interim Report Construction Guidelines for Crumb Rubber Moodified Hot Mix Asphalt*.
- Huamán, N. W. (2011). *La Deformación Permanente e las Mezclas Asfálticas y el consecuente deterioro de los Pavimentos Asfálticos en el Peru*. (Master), Universidad Nacional de Ingenieria.
- International Road Federation. (1996). *World Highways*: Route One Publishing.
- Juan, R. S. (2012). Segunda vida de los neumáticos usados. 25-40.

Lund, H. F. (2011). *Manual McGraw-Hill de reciclaje. Volumen I*. México: McGraw-Hill Interamericana.

Nordberg Barmac breaks into the asphalt 1-2 (2001).

Minaya, S., & Ordoñez, A. (2001). Laboratorio No . 2 de Mecánica de Suelos y Pavimentos MANUAL DE LABORATORIO. 1.

Manual de Carreteras (2014).

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2015). Puno: Camino al Desarrollo.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú. (2013). Manual de Carreteras - Especificaciones Técnicas Generales. 1274.

Manual de Carreteras - Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (2014).

Pavement Interactive. (2007). Softening Point. Retrieved 3 Marzo 2016, 2016, from <http://www.pavementinteractive.org/article/softening-point/>

Pentón, A., & del Castillo, A. (2012). Aplicación de la Tabla Ortogonal en el diseño de los Casos de prueba de Software . *Avanzada Científica*, 15, 1-12.

Rahman, M. (2004). *Characterisation of dry process crumb rubber modified asphalt mixtures*. University of Nottingham.

Ramirez, L. (2011). Pavimentos con Polímeros Reciclados.

- Ramirez, N. (2006). *Estudio de la utilización del caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante Proceso Seco*. (Ingeniero Civil), Universidad de Chile, Chile.
- Reed, J. (2010). *Evaluation of the Effects of Aging on Asphalt Rubber Pavements*.
- Reschner, K. (2008). A Summary of Prevalent Disposal and Recycling Methods. Retrieved October, 2015, from [http://www.entireengineering.de/Scrap\\_Tire\\_Recycling.pdf](http://www.entireengineering.de/Scrap_Tire_Recycling.pdf)
- Roy, C., Labrecque, B., & de Caumia, B. (1990). Recycling of scrap tires to oil and carbon black by vacuum pyrolysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 4(3), 203-213.
- Seymour, R. B., & Carraher, C. E. (1995). *Introducción a la química de los polímeros*: Reverté.
- Simpson, T. W. (1989). Robust Design Method's Quality Loss Function. 1-9.
- U.S. Department of Transportation. (1993). *A Study of the Use of Recycled paving Material*.
- Vásquez Ruiz, I. (2010). *Ventajas y desventajas del uso de polímeros en los asfaltos*. (Ingeniero Civil Monografía), Universidad Veracruzana.
- Xiao, F. (2006). *Development of fatigue predictive models of rubberized asphalt concrete (RAC) containing reclaimed asphalt pavement (RAP) mixtures*. (Doctor of Philosophy), Clemson University.

Zanzotto, L., & Svec, O. (1996). Utilization of Recycled Tire Rubber in Asphalt Pavements (pp. 216). Ottawa: Transportation Association of Canada.

Zucchetti, A., Antonio, J., Barrantes, G., Cecilia, A., Ocampos, L., Besich, F., . . .

Quinteros, K. U. (2010). Reporte Ambiental de Lima y Callao 2010. 171.



**ANEXOS**

**ANEXO 1. NORMA MTC E 304-2000**



## PENETRACION DE LOS MATERIALES ASFALTICOS

### MTC E 304 - 2000

Este Modo Operativo está basado en las Normas ASTM D 5 y AASHTO T 49, las mismas que se han adaptado al nivel de implementación y a las condiciones propias de nuestra realidad. Cabe indicar que este Modo Operativo está sujeto a revisión y actualización continua.

Este Modo Operativo no propone los requisitos concernientes a seguridad. Es responsabilidad del Usuario establecer las cláusulas de seguridad y salubridad correspondientes, y determinar además las obligaciones de su uso e interpretación

#### 1. OBJETIVO

**1.1** Describe el procedimiento que debe seguirse para determinar la consistencia de los materiales asfálticos sólidos o semisólidos en los cuales el único o el principal componente es un asfalto.

**1.2** La penetración se define como la distancia, expresada en décimas de milímetro hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. Normalmente, el ensayo se realiza a 25 °C (77 °F) durante un tiempo de 5 s y con una carga móvil total, incluida la aguja, de 100 g, aunque pueden emplearse otras condiciones previamente definidas.

**1.3** Los aparatos y el procedimiento descrito en esta norma son de aplicación general en productos asfálticos con una penetración máxima de 350; en el numeral 3.3.6 se indican el material y procedimiento para penetración hasta 500.

#### 2. APARATOS Y MATERIAL NECESARIOS

**2.1** Penetrómetro. Está constituido por un mecanismo que permita el movimiento vertical sin rozamiento apreciable de un vástago o soporte móvil al cual pueda fijarse firmemente por su parte inferior, la aguja de penetración; y que permita, además, la colocación sobre el mismo, de diferentes cargas suplementarias; el aparato deberá estar calibrado para dar directamente la lectura en unidades de penetración, según el numeral 1.2. El peso del vástago será de  $47.5 \pm 0.05$  g, y el peso total del conjunto móvil formado por el vástago juntamente con la aguja, de  $50.0 \pm 0.05$  g.

Se deberá disponer, igualmente, de pesas individuales suplementarias de  $50.0 \pm 0.05$  g y  $100.0 \pm 0.05$  g para obtener otras cargas totales móviles de acuerdo con las condiciones del ensayo.

El penetrómetro deberá estar provisto, además, de una base de apoyo para la colocación del recipiente con la muestra, de forma plana y que forme un ángulo de 90 grados con el sistema móvil, así como de un nivel de burbuja y tornillos de nivelación.

- Este vástago deberá poderse separar fácilmente del conjunto del penetrómetro para verificar y ajustar correctamente su peso.



**2.2 Aguja de penetración:** La aguja será de acero inoxidable endurecido y templado (ASTM grado 440 C o similar), con una dureza Rockwell C54 a C60 (0.039 a 0.040), tendrá unos 50 mm (2") de longitud y entre 1.00 y 1.02 mm de diámetro, con uno de sus extremos simétricamente afilado hasta formar un cono de ángulo comprendido entre 8°40' y 9°40' en toda su longitud y cuyo eje sea coaxial con el de la aguja; la variación total axial entre las intersecciones de las superficies del cono y del cilindro, medida como proyección sobre el eje de simetría de la aguja, no deberá exceder de 0.0127 mm (0.0005"). Después de dada la conicidad, se corta su punta para formar un cono truncado, cuya base tenga un diámetro comprendido entre 0.14 y 0.16 mm (0.055 y 0.063") y esté situado en un plano perpendicular al eje de la aguja, con una tolerancia máxima de 2 grados y con sus bordes filosos y libres de rebabas.

La textura de la superficie cónica, medida según la norma (American National Standard B-46.1), deberá tener una rugosidad media superficial comprendida entre 0.2 y 0.3  $\mu\text{m}$  (8 a 12 $\mu$ ").

La aguja irá montada rígida y coaxialmente en un casquillo cilíndrico, de latón o acero inoxidable, de  $3.2 \pm 0.05$  mm (0.126  $\pm$  0.002") de diámetro y  $38 \pm 1$  mm (1.5  $\pm$  0.002") de largo, debiendo quedar una longitud libre de aguja entre 40 y 45 mm (1.57 a 1.77"). La excentricidad, o distancia máxima al eje del casquillo, desde cualquier punto de la superficie de la aguja, incluida su punta, no excederá de 1 mm. El peso total del conjunto casquillo-aguja será de  $2.5 \pm 0.05$  g, permitiéndose para su ajuste un pequeño agujero o rebaje sobre el casquillo; igualmente, irá grabada sobre este la identificación individual de la aguja, no autorizándose la repetición de una misma identificación hasta pasados 3 años.

- Las agujas que cumplan los requisitos de control exigidos en este numeral deberán hacerlo constar así en su correspondiente certificado.

**2.3 Recipiente o molde para la muestra.** Los recipientes para las muestras serán de metal o vidrio, de forma cilíndrica y fondo plano y con las siguientes dimensiones interiores:

Penetración hasta 200	Diámetro mm (")	Profundidad mm (")
	55 (2.17)	35 (1.38)
Penetración entre 200 y 350	55 (2.17)	70 (2.76)

**2.4 Baño de agua.** Para la inmersión de los recipientes con las muestras, se dispondrá de un baño de agua con una capacidad mínima de 10 litros y provisto de un dispositivo capaz de mantener la temperatura especificada para el ensayo con una variación de  $\pm 0.1$  °C (0.2 °F). El baño irá equipado con una placa soporte perforada, colocada a una distancia no menor de 50 mm del fondo, ni mayor de 100 mm del nivel superior del líquido en el baño. Si la penetración se va a realizar en el mismo baño de agua, éste deberá disponer, además, de una plataforma resistente para soportar el



penetrómetro. Para ensayos de penetración a bajas temperaturas, pueden utilizarse salmueras como líquido del baño.

**2.5 Recipiente de Transferencia.** El ensayo de penetración puede realizarse igualmente en un Recipiente de transferencia, metálico, de vidrio o plástico, y que proporcione una base firme y estable a los recipientes para las muestras impidiendo, además, cualquier oscilación o basculamiento de los mismos durante el ensayo. Su capacidad deberá ser aproximadamente de 350 ml .

**2.6 Dispositivo medidor de tiempo,** Control de precisión. La precisión de los instrumentos empleados para medir la duración de los tiempos de carga, deberá comprobarse inmediatamente antes de cada ensayo.

- **Penetrómetros manuales.** El tiempo del ensayo deberá medirse mediante un reloj eléctrico, un cronómetro u otro instrumento cualquiera graduado en 0.1 s o menos y que tenga una exactitud de  $\pm 0.1$  s en un intervalo de 60 s. Puede utilizarse igualmente un contador sonoro que emita una señal cada 0.5 s y en el que la cuenta de 11 señales equivaiga a un tiempo total de  $5 \pm 0.1$  s.
- **Penetrómetros automáticos.** En estos aparatos, el dispositivo medidor de tiempo estará calibrado para proporcionar el tiempo del ensayo con exactitud de  $\pm 0.1$ s.

**2.7 Termómetros.** Para controlar las temperaturas del ensayo en el baño de agua se dispondrá de termómetros de mercurio con varilla de vidrio de inmersión total y con las siguientes características principales:

Temperatura del ensayo		Referencia	Escala		Graduación		Longitud total mm	Error máximo	
°C	(°F)		°C	(°F)	°C	(°F)		°C	(°F)
25	(77)	17C	19 a 27	(66 a 80°)	0.1	(0.2)	275	0.1	(0.2)
0 y 4	(32 y 39.2)	63C	-8 a 32	(18 a 89°)	0.1	(0.2)	379	0.1	(0.2)
46	(115 °F)	64C	25 a 55	(77 a 131°)	0.1	(0.2)	379	0.1	(0.2)

**Nota 3.** Para las restantes características de estos termómetros, puede consultarse la especificación ASTM E 1. Los termómetros utilizados en el baño de agua deberán ser calibrados como máximo cada seis meses, pudiéndose emplear el método ASTM E 11.



### 3. PROCEDIMIENTO

**3.1 Preparación de la muestra.** Se tomarán las precauciones necesarias para que la muestra del ensayo sea verdaderamente representativa, de aspecto homogéneo y sin contaminación.

De la muestra de laboratorio, se separarán con una espátula caliente unos 400 a 500 g de material que se colocarán en un recipiente, que se calienta cuidadosamente agitándolo para evitar sobrecalentamientos locales y para homogeneizar el material, hasta que alcance la fluidez que permita su vertido en los moldes para las probetas. Las temperaturas de calentamiento no excederán a las del punto de ablandamiento (MTC 307) de cada material en mas de 100 °C (180 °F) El tiempo total de calentamiento no excederá 30 minutos, evitándose la formación de burbujas de aire.

A continuación, verter la muestra en el recipiente hasta una altura que, cuando se enfría a la temperatura del ensayo, sea superior por lo menos en 10 mm, mayor que la profundidad a la cual se espera que penetre la aguja. Se preparará un total de dos moldes por cada muestra de material y ensayo de iguales características. Después de llenar los moldes, se cubren con un vaso de vidrio invertido, de dimensiones apropiadas, para protegerlos del polvo y permitir la eliminación de posibles burbujas de aire y se dejan enfriar al aire a una temperatura entre 15 y 30 °C (59 y 86 °F), por un período entre 1 y 1.5 horas, si se emplean recipientes pequeños (3 onzas) y entre 1.5 y 2 horas y si se utilizan recipientes de mayor tamaño (6 onzas). Finalmente, se sumergen los recipientes en el baño de agua a la temperatura especificada, manteniéndolos así durante los mismos períodos de enfriamiento.

**3.2 Condiciones del ensayo.** Las condiciones normalizadas del ensayo son, respectivamente, de 25 °C (77 °F), 100 g y 5 s para la temperatura, la carga y el tiempo de duración de la misma. Sin embargo, se admite emplear otras condiciones de ensayo, como por ejemplo:

Temperatura		Carga	Tiempo
°C	(°F)	Gr	s
0	(32)	200	60
4	(39.2)	200	60
25	(77)	100	5
45	(113)	50	5
46.1	(115)	50	5

Cuando las condiciones del ensayo no se mencionan expresamente, se entenderá las normalizadas, debiéndose especificar claramente en los demás casos las que serán condiciones especiales que podrán emplearse.



### 3.3 Ejecución de ensayo.

Primero se comprueba que el vástago soporte de la aguja está perfectamente limpio y seco, y que se deslice en forma suave y sin rozamiento sobre su guía. La aguja de penetración se limpia con tolueno u otro disolvente apropiado y se seca con un paño limpio, fijándola firmemente en su soporte. Salvo que se especifique otra carga, se coloca el peso suplementario de 50 g sobre el vástago, para obtener el peso móvil total de  $100 \pm 0.1$  g.

- Ensamblado el penetrómetro y limpia la aguja con el solvente adecuado (Tolueno u otro solvente adecuado) se coloca el indicador en cero y se procede al ensayo
- Colocar el tarro con la muestra en el recipiente de transferencia, el cual contiene agua del baño en cantidad tal que cubra el tarro que contiene la muestra.
- El conjunto formado por la muestra y el recipiente con el agua a 25°C, se coloca en la base del penetrómetro y se pone la aguja en contacto con la superficie de la muestra. Esto se logra haciendo contacto el punto real de la aguja con su imagen reflejada sobre la superficie de la muestra mediante una fuente de luz debidamente ubicada.
- Soltar la aguja rápidamente por el período de tiempo especificado, registrar la lectura indicada sobre la escala del penetrómetro a fin de medir la distancia penetrada.
- Se deben llevar a cabo al menos tres penetraciones sobre la superficie de la muestra en puntos distantes, por lo menos 10 mm de las paredes del recipiente y entre sí.
- Colocar el recipiente de transferencia y el tarro con la muestra en el baño de agua después de cada penetración, así mismo, limpiar cuidadosamente la aguja del penetrómetro primero con paño limpio y humedecido con Tetracloruro de Carbono para eliminar todo el betún adherido y posteriormente con un paño limpio y seco.

## 4. RESULTADOS

4.1 El resultado del ensayo será el promedio de tres penetraciones cuyos valores no difieran en más de las siguientes cantidades:

Penetración (décimas de mm)	0 a 49	50 a 149	150 a 249	250 a 500
Diferencia máxima entre valores extremos	2	4	12	20



4.2 Si se excede la tolerancia anterior, se repite el ensayo utilizando el segundo molde con muestra previamente preparada. Si se excediera de nuevo la correspondiente tolerancia, se anulan los resultados obtenidos y se procederá a la realización de un nuevo ensayo.

## 5. PRECISION

5.1 Para juzgar la aceptabilidad de los resultados, se seguirán los siguientes criterios (95% de probabilidad):

5.2 Repetibilidad. Los ensayos por duplicado por un mismo operador y equipo en tiempos diferentes y sobre una misma muestra, se considerarán dudosos si difieren en más de las siguientes cantidades (ensayos a 25°C (77 °F)):

Material asfáltico Ensayo a 25°C	Diferencia
Asfalto con penetración menor de 50	1 unidad
Asfalto con penetración igual o mayor de 50	3% del valor medio

5.3 Reproducibilidad. Los ensayos realizados por distintos operadores en diferentes laboratorios y sobre una misma muestra, se considerarán dudosos si difieren en más de las siguientes cantidades (ensayos a 25°C (77°)).

Asfalto con penetración menor de 50	4 unidades
Asfalto con penetración igual o mayor de 50	8% del valor medio

Los valores de precisión indicados anteriormente, se han obtenido multiplicando los estimativos de las desviaciones típicas de las poblaciones que se indican a continuación, por  $2\sqrt{2}$ .

Material asfáltico Ensayos a 25°C (77 °F)	Estimación de la desviación típica	
	En un laboratorio	Entre laboratorios
Asfalto con penetración menor de 50	0.35 unidades	1.4 unidades
Asfalto con penetración igual o mayor de 50	1.1 % del valor medio	2.8 % del valor medio



Los estimativos de precisión anteriores están basados en los siguientes datos:

	Asfaltos de Penet. < 50	Asfaltos de Penet. $\geq$ 50
Muestras	2	7
Laboratorios	16	27
Repeticiones por muestra	3	3
Grados de libertad dentro del laboratorio	32	185
Entre laboratorios	14	89

## 6. REFERENCIAS NORMATIVAS

ASTM	D5
AASHTO	T49



**ANEXO 2. NORMA ASTM D 2196-05**



Designation: D 2196 – 05

## Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) Viscometer<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D 2196; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

*This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.*

### 1. Scope

1.1 These test methods cover the determination of the apparent viscosity and the shear thinning and thixotropic properties of non-Newtonian materials in the shear rate range from 0.1 to 50  $\text{s}^{-1}$ .

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

1.3 *This standard does not purport to address the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

### 2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*<sup>2</sup>

E 1 Specification for ASTM Liquid-in-Glass Thermometers

### 3. Summary of Test Method

3.1 Test Method A consists of determining the apparent viscosity of coatings and related materials by measuring the torque on a spindle rotating at a constant speed in the material.

3.2 Test Methods B and C consist of determining the shear thinning and thixotropic (time-dependent) rheological properties of the materials.<sup>3</sup> The viscosities of these materials are determined at a series of prescribed speeds of a rotational-type viscometer. The agitation of the material immediately preceding the viscosity measurements is carefully controlled.

<sup>1</sup> These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee D01 on Paint and Related Coatings, Materials, and Applications and are the direct responsibility of Subcommittee D01.24 on Physical Properties of Liquid Paints and Paint Materials.

Current edition approved July 1, 2005. Published August 2005. Originally approved in 1963. Last previous edition approved in 1999 as D 2196 – 99.

<sup>2</sup> For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, [www.astm.org](http://www.astm.org), or contact ASTM Customer Service at [service@astm.org](mailto:service@astm.org). For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

<sup>3</sup> Pierce, P. E., "Measurement of Rheology of Thixotropic Organic Coatings and Resins with the Brookfield Viscometer," *Journal of Paint Technology*, Vol 43, No. 557, 1971, pp. 35–43.

### 4. Significance and Use

4.1 Test Method A is used for determining the apparent viscosity at a given rotational speed, although viscosities at two or more speeds give better characterization of a non-Newtonian material than does a single viscosity measurement.

4.2 With Test Methods B and C, the extent of shear thinning is indicated by the drop in viscosity with increasing viscometer speed. The degree of thixotropy is indicated by comparison of viscosities at increasing and decreasing viscometer speeds (Test Method B), viscosity recovery (Test Method B), or viscosities before and after high shear (combination of Test Methods B and C). The high-shear treatment in Test Method C approximates shearing during paint application. The viscosity behavior measured after high shear is indicative of the characteristics of the paint soon after application.

### 5. Apparatus

5.1 Rotational-type viscometers having at least four speeds, such as:

5.1.1 *Brookfield Dial-Reading (Analog) Viscometer*, or equivalent having multiple rotational speeds with set of spindles; or

5.1.2 *Brookfield Digital Viscometer*, or equivalent having multiple rotational speeds, with set of spindles.

5.2 *Thermometer*—ASTM thermometer having a range from 20 to 70°C and conforming to the requirements for Thermometer 49C as prescribed in Specification E 1.

5.3 *Containers*, round 0.5-L (1-pt) can, 85 mm (3 $\frac{3}{8}$  in.) in diameter, or 1-L (1-qt) can, 100 mm (4 in.) in diameter.

5.4 *Shaker*, or equivalent machine capable of vigorously shaking the test specimen.

### 6. Materials

6.1 *Standard Oils*, calibrated in absolute viscosity, millipascal seconds.

### 7. Calibration of Apparatus

7.1 Select at least two standard oils of viscosities differing by at least 0.5 Pa·s (5P) within the viscosity range of the material being measured and in the range of the viscometer. Condition the oils as closely as possible to 25.0°C (or other

D 2196 – 05

agreed-upon temperature) for 1 h in a 0.5-L (1-pt) can, 85 mm (3 3/8 in.) in diameter. Measure the viscosities of each oil as described in Test Method B (Section 13) taking readings only at increasing speeds (13.4). Make certain that the spindle is centered in the container prior to taking measurements.

NOTE 1—The Brookfield LV and RV series viscometers are equipped with a spindle guard leg. The spindle/speed multiplying factors (Table 1) are designed for use with the guard leg in place except for the following conditions: RV series when the factors are the same with or without the guard leg for spindles No. 3 through 7; or LV series when the factors are the same with or without the guard leg for spindles No. 3 and 4.

7.1.1 Calibration in a 0.5-L (1-pt) can is always possible with the LV series viscometer with the guard leg attached. Calibration of the RV series viscometer in the 1-pt can must be done with spindles No. 3 through 7 without the guard leg. If the No. 1 or No. 2 spindles are to be used, calibration is carried out in the 1-L (1-qt) can with the guard leg attached.

7.2 Combining the tolerance of the viscometer ( $\pm 1\%$ , equal to the spindle/speed factor) and the tolerance of the temperature control (typically  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  at  $25^\circ\text{C}$ ) it is reasonable to assume that a viscometer is calibrated if the calculated viscosities are within  $\pm 5\%$  of the stated values (see Table 2 for examples of the considerable change in viscosity with temperature exhibited by standard oils). If measurements are not made at  $25^\circ\text{C}$ , then the stated viscosities should be corrected to the temperature at which they are measured. If the viscosities determined in 7.1 differ from the stated values of the viscosity standard by more than  $5\%$ , calculate new factors for each spindle/speed combination as follows:

$$f = Vs \tag{1}$$

TABLE 1 Factors for Converting Brookfield Dial Readings to Millipascal Seconds (Centipoises)

NOTE 1—M = 1000.

Speed, rpm	RV Series Factors Spindles						
	1	2	3	4	5	6	7
0.5	200	800	2000	4000	8000	20M	80M
1	100	400	1000	2000	4000	10M	40M
2	50	200	500	1000	2000	5M	20M
2.5	40	160	400	800	1600	4M	16M
4	25	100	250	500	1000	2.5M	10M
5	20	80	200	400	800	2M	8M
10	10	40	100	200	400	1M	4M
20	5	20	50	100	200	500	2M
50	2	8	20	40	80	200	800
100	1	4	10	20	40	100	400
Speed, rpm	LV Series Factors Spindles						
	1	2	3	4			
0.3	200	1000	4000	20M			
0.6	100	500	2000	10M			
1.5	40	200	800	4M			
3.0	20	100	400	2M			
6	10	50	200	1M			
12	5	25	100	500			
30	2	10	40	200			
60	1	5	20	100			

TABLE 2 Viscosity Variation of Cannon Viscosity Standards About the  $25^\circ\text{C}$  Temperature Point

Cannon Viscosity Standard	Viscosity at $25^\circ\text{C}$ , mPa·s (cP)	Viscosity Change With $+1^\circ\text{C}$ at $25^\circ\text{C}$ , mPa·s (cP)
S-600	1 400	87.7 (6.26 %)
S-2000	4 900	332 (6.77 %)
S-8000	20 000	1462.3 (7.31 %)

where:

$f$  = new factor for converting scale reading to viscosity, mPa·s (cP),

$V$  = viscosity of standard oil, mPa·s, and

$s$  = scale reading of the viscometer.

7.3 Prepare a table of new factors similar to that furnished with the viscometer (Table 1) for the spindle/speed combinations worked out in 7.2. Spindle/speed factors vary inversely with speed.

8. Preparation of Specimen

8.1 Fill a 1-pt or 1-qt can with sample to within 25 mm (1 in.) of the top with the sample and bring it as close as possible to a temperature of  $25^\circ\text{C}$  or other agreed-upon temperature prior to test.

8.2 Vigorously shake the specimen on the shaker or equivalent for 10 min, remove it from the shaker, and allow it to stand undisturbed for 60 min at  $25^\circ\text{C}$  prior to testing (Note 2). Start the test no later than 65 min after removing the can from the shaker. Do not transfer the specimen from the container in which it was shaken.

NOTE 2—Shake time may be reduced if necessary, or as agreed upon between the purchaser and manufacturer, but, in any case, should not be less than 3 min.

TEST METHOD A—APPARENT VISCOSITY

9. Procedure

9.1 Make all measurements as close as possible to  $25^\circ\text{C}$ , or other agreed-upon temperature.

9.2 Place the instrument on the adjustable stand. Lower the viscometer to a level that will immerse the spindle to the proper depth. Level the instrument using the attached spirit level.

9.3 Tilt the selected spindle (Note 3), insert it into one side of the center of the surface of the material, and attach the spindle to the instrument as follows: Firmly hold the upper shaft coupling with thumb and forefinger; screw left-hand thread spindle coupling securely to the upper shaft coupling being very careful when connecting to avoid undue side pressure which might affect alignment. Avoid rotating the dial so that pointer touches the stops at either extreme of the scale.

NOTE 3—Select the spindle/speed combination that will give a minimum scale reading of 10 but preferably in the middle or upper portion of the scale. The speed and spindle to be used may differ from this by agreement between user and producer.

9.4 Lower the viscometer until the groove (immersion mark) on the shaft just touches the material. Adjust the

D 2196 – 05

viscometer level if necessary. Move the container slowly in a horizontal plane until the spindle is located in approximately the center of the container so that the test will be run in a region undisturbed by the lowering of the spindle.

9.5 *Dial-Reading Viscometer*—Turn on the viscometer. Adjust the viscometer to the rpm selected (Note 3) for the material under test. Allow the viscometer to run until the pointer has stabilized (Note 4). After the pointer has stabilized, depress the clutch and switch off the motor so that when it stops, the pointer will be in view (Note 5).

9.6 *Digital Viscometer*—Turn on the viscometer. Adjust the viscometer to the rpm selected for the material under test. Allow the viscometer to run until the digital reading has stabilized. The digital viscometer gives a direct reading in centipoises, mPa.

NOTE 4—In thixotropic paints, the pointer or digital reading does not always stabilize. On occasion it reaches a peak and then gradually declines as the structure is broken down. In these cases, the time of rotation or number of revolutions prior to reading the viscometer should be agreed to between user and manufacturer.

NOTE 5—Always release the clutch while the spindle is still immersed so that the pointer will float, rather than snap back to zero.

**10. Calculation (Dial Reading Viscometer)**

10.1 Calculate the apparent viscosity at each speed, as follows:

$$V = fs \tag{2}$$

where:

- V = viscosity of sample in centipoises, mPa·s,
- f = scale factor furnished with instrument (see Table 1), and
- s = scale reading of viscometer.

**11. Report**

- 11.1 Report the following information:
  - 11.1.1 The viscometer manufacturer, model and spindle,
  - 11.1.2 The viscosity at the spindle/speed utilized,
  - 11.1.3 The specimen temperature in degrees Celsius, and
  - 11.1.4 The shake time and rest period, if other than specified.

**12. Precision and Bias**

- 12.1 *Precision*—See Section 23 for precision, including that for measurement at a single speed.
- 12.2 *Bias*—No statement of bias is possible with this test method.

**TEST METHOD B—VISCOSITY UNDER CHANGING SPEED CONDITIONS, DEGREE OF SHEAR THINNING AND THIXOTROPY**

**13. Procedure**

- 13.1 Make all measurements with the viscometer as close as possible to 25°C, or other agreed upon temperature.
- 13.2 Adjust the instrument and attach the spindle as in 9.2-9.4.

13.3 Set the viscometer at the slowest rotational speed (Note 5 and Note 6). Start the viscometer and record the scale reading after ten revolutions (or other agreed-upon number of revolutions).

NOTE 6—A higher initial rotational speed may be used upon agreement between producer and user.

13.4 Increase the viscometer speed step-wise and record the scale reading after ten revolutions (or equivalent time for each spindle/speed combination) at each speed. After an observation has been made at the top speed, decrease the speed in steps to the slowest speed, recording the scale reading after ten revolutions (or equivalent time) at each speed.

NOTE 7—It is preferable to change speed when the motor is running.

13.5 After the last reading has been taken at the slowest speed, shut off the viscometer and allow it and the specimen to stand undisturbed for an agreed-upon rest period. At the end of the rest period, start the viscometer at the slowest speed and record the scale reading after ten revolutions (or other agreed-upon number of revolutions).

**14. Calculations and Interpretation of Results**

14.1 Calculate the apparent viscosity at each speed as shown in Section 9.

14.2 If desired, determine the degree of shear thinning by the following method:

14.2.1 *Shear Thinning Index (sometimes erroneously called the thixotropic index)*—Divide the apparent viscosity at a low rotational speed by the viscosity at a speed ten times higher. Typical speed combinations are 2 and 20 rpm, 5 and 50 rpm, 6 and 60 rpm but selection is subject to agreement between producer and user. The resultant viscosity ratio is an index of the degree of shear thinning over that range of rotational speed with higher ratios indicating greater shear thinning.

14.2.2 A regular or log-log plot of viscosity versus viscometer speed in rpm may also be useful in characterizing the shear-thinning behavior of the material. Such plots may be used for making comparisons between paints or other materials.

14.3 If desired, estimate the degree of thixotropy (under conditions of limited shearing-out of structure) by one of the following methods:

14.3.1 Calculate the ratio of the slowest speed viscosity taken with increasing speed to that with decreasing speed. The higher the ratio, the greater the thixotropy.

14.3.2 Calculate the ratio of the slowest speed viscosity taken after the rest period to that before the rest period. The higher the ratio, the greater the thixotropy.

**15. Report**

- 15.1 Report the following information:
  - 15.1.1 The viscometer manufacturer, model and spindle,
  - 15.1.2 The viscosities at increasing and decreasing spindle speeds,
  - 15.1.3 The rest period time and the viscosity at the end of that time,
  - 15.1.4 The specimen temperature in degrees Celsius, and
  - 15.1.5 The shake time if other than that specified.



### 15.2 *Optional Reporting:*

15.2.1 *Degree of Shear Thinning*—Shear thinning index and speeds over which it was measured (14.2).

15.2.2 *Estimated Degree of Thixotropy (under conditions of shearing-out of structure)*—Ratio of the lowest speed viscosities, for both increasing and decreasing speeds; or ratio of the lowest speed viscosities before and after the rest period, and speed at which they were measured (14.3).

## 16. Precision and Bias

16.1 *Precision*—See Section 23 for precision, including that for measurement of the shear thinning index (ratio of viscosity at 5 r/min to that at 50 r/min). It has not been possible to devise a method for determining precision for viscosities at increasing and decreasing speeds other than as individual measurements. No attempt was made to determine the precision of the measurement of the degree of thixotropy because this parameter is dependent on the material, the time of the test, and other variables.

16.2 *Bias*—No statement of bias is possible with this test method.

### TEST METHOD C—VISCOSITY AND SHEAR THINNING OF A SHEARED MATERIAL

## 17. Apparatus

17.1 High-speed laboratory stirrer with speeds of at least 2000 rpm and equipped with a 50-mm (2-in.) diameter circular dispersion blade.<sup>4</sup>

## 18. Preparation of Specimen

18.1 Insert the 50-mm (2-in.) blade into the center of the can (8.1) so that the blade is about 25 mm (1 in.) from the bottom. Run the mixer at 2000 rpm (Note 8) for 1 min.

NOTE 8—Materials may be sheared at other speeds using other size blades upon agreement between producer and user.

## 19. Procedure

19.1 Immediately insert the same spindle used in Test Method B into the sheared material in the same manner as in Section 9.

19.2 Start the viscometer and adjust to the highest speed used in Test Method B (13.5). Record the scale reading after ten revolutions (or other agreed-upon number of revolutions).

19.3 Decrease the viscometer speed (Note 7) step-wise and record the scale readings at each speed down to the lowest speed used in Test Method B, recording the scale reading after ten revolutions at each speed (or other agreed-upon number of revolutions).

## 20. Calculations and Interpretation of Results

20.1 As in Test Method B, calculate the viscosities at each decreasing speed.

20.2 If desired, calculate the degree of shear thinning by the method given in Test Method B, 14.2. The measured viscosity

behavior after shearing is essentially that of the paint immediately after application (disregarding changes in solids).

20.3 If desired, estimate the degree of thixotropy (under conditions of *complete* shearing-out of structure) by calculating the ratio of the lowest speed viscosities before and after shear. The lowest speed before-shear viscosity is taken from Test Method B, 14.1, at the lowest increasing speed. The lowest speed after-shear viscosity is taken from 20.1. The higher the ratio, the greater the thixotropy.

## 21. Report

21.1 Report the following information:

21.1.1 The viscometer manufacturer, model and spindle,

21.1.2 The viscosities at decreasing spindle speeds,

21.1.3 The specimen temperature in degrees Celsius, and

21.1.4 The speed of the high-speed mixer, size of blade, and time of mixing if different from method.

21.2 *Optional Reporting:*

21.2.1 *Degree of Shear Thinning*—*Shear thinning index and speed over which it was measured* (14.2).

21.2.2 *Estimated Thixotropy*—Ratio of lowest speed viscosities before and after shear and the speed at which they were measured.

## 22. Precision and Bias

22.1 *Precision*—The precision for individual viscosity measurements is the same as for Test Method A in Section 23. No attempt has been made to determine the precision of the shear thinning index or degree of thixotropy for Test Method C for the reasons given in 16.1.

22.2 *Bias*—No statement of bias is possible with this test method.

## 23. Summary of Precision

23.1 In an interlaboratory study of Test Methods A and B, eight operators in six laboratories measured on two days the viscosities of four architectural paints comprising a latex flat, a latex semi-gloss, a water-reducible gloss enamel, and an alkyd semi-gloss, that covered a reasonable range in viscosities and were shear thinning. Measurements at increasing speeds of 5, 10, 20, and 50 r/min (equivalent to eight operators testing 16 samples) were used to obtain the precision of Test Method A. The within-laboratory coefficient of variation for Test Method A (single speed) was found to be 2.49 % with 121 df and for Test Method B (Shear Thinning Index) 3.3 % with 31 df. The corresponding between-laboratories coefficients are 7.68 % with 105 df and 7.63 % with 27 df. Based on these coefficients the following criteria should be used for judging the acceptability of results at the 95 % confidence level:

23.1.1 *Repeatability*—Two results obtained by the same operator at different times should be considered suspect if they differ by more than 7 % relative for single speed viscosity and 9.5 % relative for shear thinning index.

23.1.2 *Reproducibility*—Two results obtained by operators in different laboratories should be considered suspect if they differ by more than 21.6 and 22.1 % relative, respectively, for the same two test methods.

<sup>4</sup> Cowles or Shar type mixer/disperser.

**24. Keywords**

thixotropy; viscometer; viscosity

24.1 Brookfield viscometer; non-Newtonian; rheological properties; rheology; rotational; shear thinning; thixotropic;

*ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).*



**ANEXO 3. NORMA MTC E 307-2000**



## PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE MATERIALES BITUMINOSOS (ANILLO Y BOLA)

### MTC E 307 - 2000

Este Modo Operativo está basado en las Normas ASTM D 36 y AASHTO T 53, las mismas que se han adaptado al nivel de implementación y a las condiciones propias de nuestra realidad. Cabe indicar que este Modo Operativo está sujeto a revisión y actualización continua.

Este Modo Operativo no propone los requisitos concernientes a seguridad. Es responsabilidad del Usuario establecer las cláusulas de seguridad y salubridad correspondientes, y determinar además las obligaciones de su uso e interpretación

#### 1. OBJETIVO

La determinación del punto de ablandamiento de productos bituminosos en el intervalo de 30 a 157 °C (86 a 315 °F), utilizando el aparato de anillo y bola, sumergido en agua destilada (30 a 80 °C), glicerina USP (encima de 80 a 157 °C), o glicol etileno (30 a 110 °C).

#### 2. RESUMEN DEL METODO

Dos discos horizontales de material bituminoso, fundidos entre anillos de bronce, se calientan a una velocidad controlada en un baño líquido, mientras cada uno de ellos soporta una bola de acero. El punto de ablandamiento se considera como el valor promedio de las temperaturas, a la cuales los dos discos se ablandan lo suficiente, para permitir que cada bola envuelta en material bituminoso, caiga desde una distancia de 25 mm (1").

#### 3. USO Y SIGNIFICADO

**3.1** Los productos bituminosos son materiales viscoelásticos y no cambian del estado sólido al estado líquido a una temperatura definida, sino que gradualmente se tornan más blandos y menos viscosos cuando la temperatura va en aumento. Por esta razón, el punto de ablandamiento debe determinarse por medio de un método arbitrario fijo pero definido, que produzca resultados reproducibles y comparables.

**3.2** El punto de ablandamiento es útil para clasificar productos bituminosos y es un valor índice de la tendencia del material a fluir cuando está sometido a temperaturas elevadas, durante su vida de servicio. También puede servir para establecer la uniformidad de los embarques o fuentes de abastecimiento.

#### 4. APARATOS Y MATERIALES

**4.1** *Anillos de bronce*, de bordes cuadrados, conforme con las dimensiones mostradas en la Figura 1a.

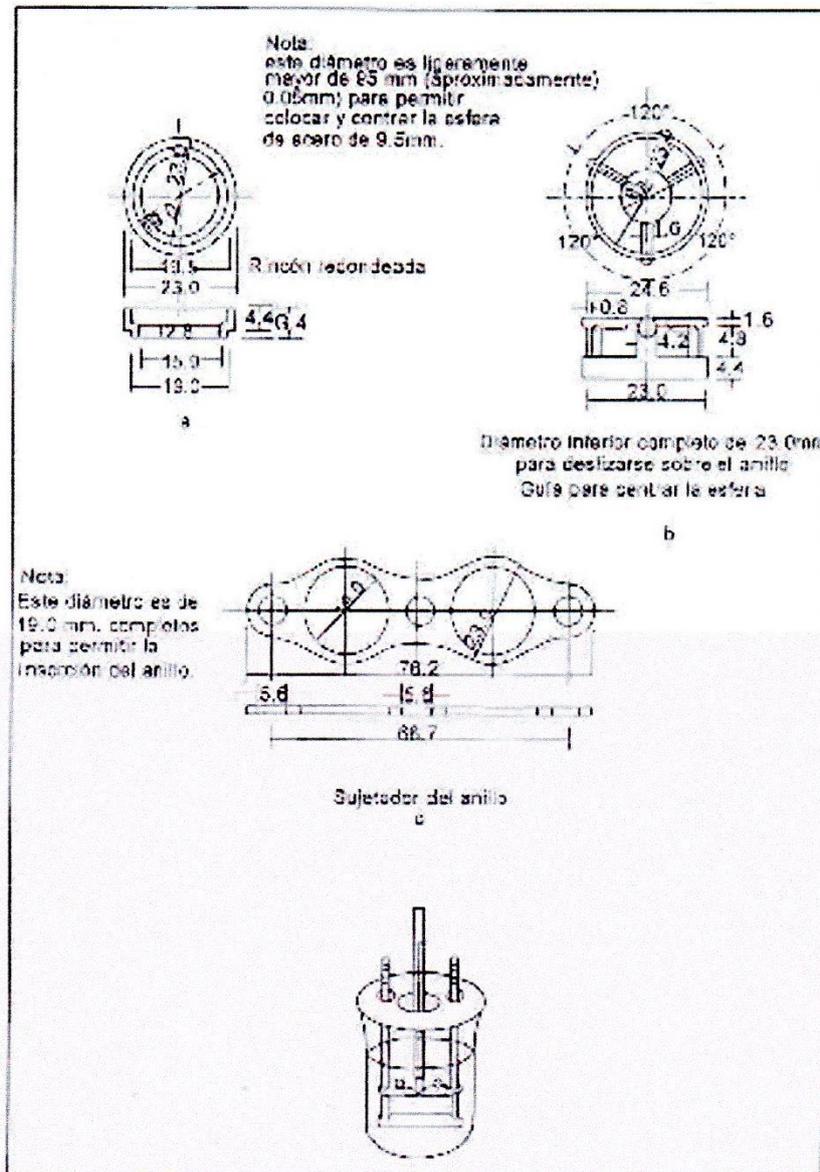


Figura 1. Anillo soportador sujetador de anillo guía para centrar esfera y montaje que muestra dos anillos del aparato.

4.2 Platos de base, hechos de material no absorbente, con espesor suficiente para prevenir la deformación y de tamaño adecuado para mantener dos o más anillos. Los platos serán planos.

4.3 Bolas de acero, de 9.5 mm de diámetro (3/8"), pesando cada una  $3.5 \pm 0.05$  g.

4.4 Guías de contacto de las bolas, de bronce, con la forma, apariencia y dimensiones de la Figura 1b.



**4.5 Baño**, recipiente de vidrio que se pueda calentar, con un diámetro interno no menor de 85 mm, y altura entre la base y el borde de 120 mm como mínimo, con capacidad de 800 ml

**4.6 Soporte de anillos y montaje completo**: un soporte de bronce diseñado, para sostener los anillos en posición horizontal con la forma y dimensiones mostradas en la Figura 1 c.

El montaje completo está indicado en la Figura 1d, con la base de los anillos colocada  $25 \pm 0.8$  mm ( $1 \pm 0.03$ "") por encima de la superficie superior del plato de base. La superficie inferior de este último deberá estar  $16 \pm 3$  mm ( $5/8 \pm 1/8$ "") por encima del fondo del baño.

**4.7 Termómetros**: serán de tres tipos, con las características definidas en la Especificación ASTM E1:

Termómetro	Intervalo de temperaturas
15 C o 15 F	-2 a + 80 °C (30 a 180 °F)
16 C o 16 F	30 a 200 °C (85 a 392 °F)
113 C o 113 F	-1 a + 175 °C (31 a 350 °F)

El termómetro adecuado se colocará en el montaje como se indica en la Figura 1d, cuidando que el extremo del bulbo esté a nivel con el fondo de los anillos y dentro de los 13 mm (0.5") alrededor de ellos, pero sin tocar los anillos ni el soporte.

**4.8 Líquido para el baño**:

- Agua destilada recién hervida, para evitar la formación de burbujas sobre la superficie del espécimen.
- Glicerina USP; se debe tener mucho cuidado porque su punto de ignición es de 160 °C (320 °F)
- Glicol etileno, con punto de ebullición entre 195 y 197 °C (383 y 387 °F).

Deben tomarse precauciones porque esta sustancia es tóxica cuando se ingiere o sus vapores son inhalados. Su contacto prolongado con la piel es dañino. Su punto de inflamación es de 115°C (239 °F). Cuando se usa este líquido en el baño, el ensayo deberá efectuarse en un laboratorio ventilado y con campana extractora de vapores, con capacidad para asegurar la remoción de los gases tóxicos.

**4.9 Agentes aislantes**: consisten en aceites o grasas con siliconas que se usan para evitar la adherencia del producto bituminoso sobre el plato de base, cuando se hacen los discos. Se coloca en una ligera capa sobre la superficie que se quiere proteger. También se pueden usar mezclas de



glicerina con talco, dextrin o arcilla china. Cuando se usen siliconas, se debe evitar la contaminación de otros elementos del equipo de ensayo, pues puede producir errores en las determinaciones de penetración o punto de ignición. En estos casos, se deben emplear guantes desechables de caucho.

## 5. PREPARACION DE ESPECIMENES

**5.1** Antes de iniciar labores debe verificarse que todo haya sido planeado (equipos, materiales, etc.) para terminar el ensayo dentro de 6 horas. Caliéntese la muestra de material bituminoso en forma cuidadosa, agitándola frecuentemente para evitar sobrecalentamientos localizados, hasta asegurar que esté suficientemente fluida para poderla verter. Al agitarse, deberá evitarse la formación de burbujas.

El calentamiento de la muestra no debe tomar más de 2 horas; y, en ningún caso, la temperatura será mayor que 110 °C (230 °F) por encima del punto de ablandamiento esperado. Si el ensayo debe repetirse, no se recalentará la muestra sino que deberá utilizarse una muestra fresca.

**5.2** Caliéntense los dos anillos de bronce sin el plato de base, aproximadamente a la misma temperatura del producto asfáltico, y colóquense sobre el plato de base, tratado con un agente aislante.

**5.3** Viértase, con un ligero exceso, el producto bituminoso dentro de los anillos y déjese enfriar a temperatura ambiente durante 30 minutos.

Para materiales que estén blandos a la temperatura ambiente, enfríense los especímenes, al menos durante 30 minutos a una temperatura inferior 10 °C (18 °F) por debajo del punto de ablandamiento esperado. Desde el momento en que se forman los discos, no deberán transcurrir más de 240 minutos hasta la terminación del ensayo.

**5.4** Cuando los especímenes estén fríos, córtese el exceso de material de la parte superior, con un cuchillo o espátula precalentada, para que la superficie del disco coincida con el nivel superior del anillo.

## 6. PROCEDIMIENTO

**6.1** Seleccione, dependiendo del punto de ablandamiento esperado, el baño líquido y el termómetro adecuado, entre los siguientes casos:

- Baño con agua destilada recién hervida, para ablandamiento esperado entre 30 y 80 °C (86 y 176 °F); úsese un termómetro 15 C (o 15F) o 113 C (o 113 F). La temperatura al comenzar el baño deberá ser de  $5 \pm 1$  °C ( $41 \pm 2$  °F).



- Baño con glicerina USP, para obtener ablandamientos por encima de 80 °C (176 °F) y hasta 157 °C (315 °F); úsese un termómetro 16 C (o 16 F) o 113 C (o 113 F). La temperatura de iniciación del baño deberá ser de  $30 \pm 1$  °C ( $86 \pm 2$  °F).
- Baño con glicol etileno para ablandamiento entre 30 °C (86 °F) y 110 °C (230 °F); úsese un termómetro 113 C (o 113 F). La temperatura de iniciación del baño deberá ser de  $5 \pm 1$  °C ( $41 \pm 2$  °F).

**6.2** Ensamblar los aparatos en un laboratorio ventilado; colocando los anillos, con los especímenes, las guías para las bolas y los termómetros en posición, y llénese el baño con el líquido apropiado hasta una altura de  $105 \pm 3$  mm. Si se usa glicol etileno, asegúrese que el ventilador de la campana extractora esté funcionando antes de depositar el líquido.

Usando unas tenazas apropiadas, colóquense las dos bolas en el fondo del baño para que adquieran la misma temperatura de iniciación que el resto del montaje.

**6.3** Colóquese todo el conjunto del baño en agua con hielo o caliéntese muy suavemente, para alcanzar y mantener durante 15 minutos la temperatura de iniciación apropiada. Cuidese de no contaminar el líquido del baño.

**6.4** Usando otra vez las tenazas, colóquese cada una de las bolas en la guía para su centrado.

**6.5** Caliéntese el baño en forma pausada para asegurar que la velocidad de elevación de la temperatura sea constante a 5°C (9°F)/minuto. Protéjase el baño de corrientes de aire usando pantallas, si es necesario. No promedie la velocidad de elevación de temperatura durante el periodo del ensayo.

La máxima variación permitida para un período de 1 minuto, después de transcurridos los 3 primeros minutos, será de  $\pm 0.5$  °C ( $\pm 1$  °F). Repítase cualquier ensayo en el cual la velocidad de elevación de la temperatura no caiga dentro de estos límites.

**6.6** Anótese para cada anillo y bola, la temperatura indicada por el termómetro en el momento en que el producto bituminoso rodeando la bola, toca el fondo del baño. No se debe hacer corrección por la parte emergente del termómetro. Si la diferencia entre las dos temperaturas excede de 1 °C (2 °F), repítase el ensayo.

## 7. CALCULOS

**7.1** Para un espécimen de un producto bituminoso dado, el punto de ablandamiento determinado en un baño con agua, será inferior que el determinado con glicerina. Ya que la determinación del punto



de ablandamiento es necesariamente arbitraria, esta diferencia es importante solamente para puntos de ablandamiento ligeramente por encima de los 80 °C (176 °F).

**7.2** El cambio de agua por glicerina para puntos de ablandamiento por encima de 80 °C, crea una discontinuidad. Los más bajos puntos de ablandamiento que es posible obtener con baños de glicerina, son del orden de 84.5 °C (184 °F). En estos casos, la corrección será de -4.2 °C (-7.6 °F). Si se necesita resolver una discrepancia, se repetirá el ensayo.

Bajo cualquier circunstancia, si el valor medio de las dos temperaturas determinadas en glicerina es de 80.0 °C (176 °F), o más bajo, repítase el ensayo utilizando baño de agua.

**7.3** Para convertir puntos de ablandamiento ligeramente por encima de 80 °C (176° F) determinados en agua, en aquellos determinados en glicerina, la corrección es de ± 4.2 °C (± 6 °F). Para dilucidar discrepancias, repítase el ensayo en glicerina.

Bajo cualquier circunstancia, si el valor medio de las dos temperaturas determinadas en agua es de 85 °C (185.0 °F) o más alto, repítase el ensayo en glicerina.

**7.4** Los resultados obtenidos usando glicol etileno, variarán de los obtenidos usando agua y glicerina, en cantidades calculadas con las siguientes fórmulas:

Por asfalto:

$$PAg = 1.026583 \times PAge - 1.334968 \text{ °C}$$

$$PAa = 0.974118 \times PAe - 1.444590 \text{ °C.}$$

Donde:

PAg = Punto de ablandamiento en glicerina

PA.1 = Punto de ablandamiento en agua

PAge = Punto de ablandamiento en glicol etileno.

## 8. INFORME

**8.1** Cuando se utilicen termómetros 15 C (o 15 F), repórtense las temperaturas con aproximación de 0.2 °C (0.5 °F).

Cuando se utilicen los termómetros 16C (o 16 F) o 113 C (o 113 F), repórtense las temperaturas con aproximación de 0.5 °C (1.0 °F).

**8.2** Infórmese la clase de líquido que fue utilizado para el baño durante el ensayo.

## 9. PRECISION



**9.1** Cuando se utiliza agua destilada o glicerina USP, los siguientes criterios se emplearán para juzgar la aceptabilidad de los resultados (95% de probabilidad):

- Precisión de un operador se ha encontrado que la desviación estándar para un operador de este ensayo, es de 0.41 °C (0.73 °F). Por consiguiente, los resultados de dos ensayos efectuados correctamente por el mismo operador, sobre la misma muestra de asfalto, no deberán diferenciarse en más de 1.2 °C (2.0 °F),
- Precisión entre distintos laboratorios: La desviación estándar para este caso es de 0.70 °C (1.26 °F). Por consiguiente, los resultados de dos ensayos efectuados correctamente por dos laboratorios sobre la misma muestra de asfalto, no se deberían diferenciar en más de 2.0 °C (3.5 °F).

**9.2** Para el caso de glicol etileno las discrepancias admisibles serán:

- Precisión del mismo operador, no mayor que 2.0 °C (3.5 °F).
- Precisión entre distintos laboratorios, no mayor que 3 °C (5.5 °F)..

## 10. REFERENCIAS NORMATIVAS

ASTM	D 36
AASHTO	T 53



**ANEXO 4. NORMA ASTM D 6084-97**



Designation: D 6084 – 97

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS  
100 Barr Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428  
Reprinted from the Annual Book of ASTM Standards. Copyright ASTM

## Standard Test Method for Elastic Recovery of Bituminous Materials by Ductilometer<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D 6084; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

### 1. Scope

1.1 This test method covers the elastic recovery of a bituminous material measured by the recoverable strain determined after severing an elongated briquet specimen of the material of the form described in 4.1. The specimens are pulled to a specified distance at a specified speed and at a specified temperature. Unless otherwise specified, the test shall be made at a temperature of  $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$  ( $77 \pm 0.9^\circ\text{F}$ ) and with a speed of  $5 \text{ cm/min} \pm 5.0\%$ .

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:

- C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials<sup>2</sup>
- D 5 Test Method for Penetration of Bituminous Materials<sup>3</sup>
- D 113 Test Method for Ductility of Bituminous Materials<sup>3</sup>
- D 140 Practice for Sampling Bituminous Materials<sup>3</sup>
- E 1 Specification for ASTM Thermometers<sup>4</sup>
- E 11 Specification for Wire-Cloth Sieve for Testing Purposes<sup>5</sup>
- E 77 Methods of Verification and Calibration of Thermometers<sup>4</sup>

### 3. Significance and Use

3.1 This test method is useful in confirming that a material has been added to the asphalt to provide a significant elastomeric characteristic. It does not necessarily identify the type or amount of material added.

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-4 on Road and Paving Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D04.44 on Rheological Tests.

Current edition approved Feb. 10, 1997. Published April 1998.

<sup>2</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.02.

<sup>3</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.03.

<sup>4</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.03.

<sup>5</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

### 4. Apparatus

4.1 *Mold*<sup>6</sup>—The mold shall be similar in design to that shown in Fig. 1. The mold shall be made of brass, the ends  $b$  and  $b'$  being known as clips, and the parts  $a$  and  $a'$  as sides of the mold. The dimensions of the assembled mold shall be as shown in Fig. 1 with the permissible variations indicated. (See Note 1.)

4.2 *Water Bath for Conditioning Specimen*—Maintain the water bath at the specified test temperature, varying not more than  $0.1^\circ\text{C}$  ( $0.18^\circ\text{F}$ ) from this temperature. The volume of water shall be not less than 10 L, and the specimen immersed to a depth of not less than 10 cm and supported on a perforated shelf not less than 5 cm from the bottom of the bath.

4.3 *Testing Machine*—For elongating the briquet of bituminous material, any apparatus may be used that is so constructed that the specimen will be continuously immersed in water as specified in 6.3, while the two clips are pulled apart at a uniform speed, as specified, without undue vibration. The testing machine shall incorporate a means in which the elongation can be measured in centimetres. (See Note 2.)

4.4 *Thermometer*—A thermometer having a range as shown as follows and conforming to the requirements prescribed in Specification E 1. (See Note 3.)

Temperature Range	ASTM Thermometer No.
-8 to $32^\circ\text{C}$	63C
18 to $89^\circ\text{F}$	63F

4.5 *Scissors*—Any type of conventional scissors capable of cutting the bituminous material at the test temperature.

4.6 *Oven*—An oven capable of maintaining  $135 \pm 5.5^\circ\text{C}$  ( $275 \pm 10^\circ\text{F}$ ).

NOTE 1—Clips for the mold are the same as specified in Fig. 1 of Test Method D 113.

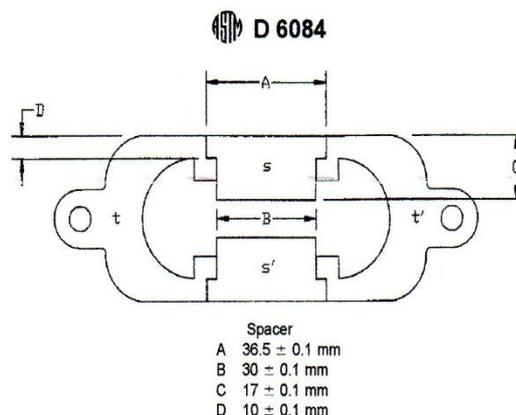
NOTE 2—The testing machine may be the same as specified in Test Method D 113.

NOTE 3—In those cases where the elastic recovery specimens are conditioned in the standard penetration bath at  $25^\circ\text{C}$  ( $77^\circ\text{F}$ ), the thermometer as prescribed for Test Method D 5 may be substituted in place of those shown.

### 5. Sample Preparation

5.1 *Asphalt Emulsion Residue*—If the sample is a residual

<sup>6</sup> The sole source of supply of the apparatus known to the committee at this time is Humboldt Manufacturing Company, 7300 W. Agatite Ave., Chicago, IL 60656. If you are aware of alternative suppliers, please provide this information to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend.



NOTE 1—Dimensions for t and t' can be found in Test Method D 113.

FIG. 1 Mold for Ductility Test Specimen

product from the emulsion distillation test at 260°C (500°F) or a polymer modified asphalt emulsion residual product from a distillation at lower temperatures, stir the contents in the still and immediately pour portions of the residue into suitable molds for making the required tests. If it is suspected there is foreign matter in the residue, pour the material through a 300- $\mu$ m (No. 50) sieve prior to pouring into the test molds. (See Note 4.)

5.2 *Ambient Sample*— If the sample is an asphalt cement or a polymer modified asphalt cement, carefully heat the sample in a covered container to prevent local overheating until it has become sufficiently fluid to pour. Use an oven set at 135 ± 5.5°C (275 ± 10°F) for sample heating. Strain the melted sample through a 300- $\mu$ m (No. 50) sieve conforming to Specification E 11. (See Note 5.)

NOTE 4—In the case of higher viscosity emulsion residues or residues from lower temperature distillations that will not pass a 300- $\mu$ m (No. 50) sieve, an 850- $\mu$ m (No. 20) sieve may be used.

NOTE 5—In those cases where the samples are not sufficiently fluid to pour at 135°C (275°F), higher temperatures may be used. In the case of higher viscosity materials that will not pass a 300  $\mu$ m (No. 50) sieve, an 850  $\mu$ m (No. 20) sieve may be used.

6. Procedure

6.1 Assemble the mold on the brass plate. Thoroughly coat the surface of the plate and the interior surfaces of the sides a and a', of the mold with a thin layer of a mixture of glycerin and dextrin, talc, or kaolin (china clay) to prevent the test material from sticking. The plate upon which the mold shall be placed shall be perfectly flat and level so that the bottom surface of the mold will be in contact throughout. After sample preparation as described in Section 5, thoroughly stir the sample and pour in the mold. In filling the mold, take care not to disarrange the pieces of the mold thus distorting the shape. In filling, take care to pour and place material in a stream back and forth from end to end until the mold is more than level full. Allow the filled mold to cool to room temperature for 35 ± 5 min then place in the water bath at the test temperature for 30 min. Remove the test specimens from the water bath and immediately trim the excess material with a hot putty knife or spatula to make the molds just level full. (See Note 6.)

6.2 *Keeping Specimens at Standard Temperature*—Place the trimmed specimen and mold in the water bath at the specified

test temperature for 90 ± 5 min prior to testing. Remove the specimen from the plate by a shearing action between specimen and plate, avoiding any bending of the test specimen. Remove the side pieces a and a' being careful not to distort or fracture the specimen. Attach the specimen to the testing machine and immediately test the specimen.

6.3 *Testing*—Attach the rings at each end of the clips to the pins or hooks in the testing machine and pull the two clips apart at a uniform speed to an elongation of 10 ± 0.25 cm unless otherwise specified. A variation of ±5 % from the speed specified will be permissible. Stop the elongation and immediately cut the test specimen into two halves at the midpoint using the scissors. Allow the specimen to remain in the testing machine in an undisturbed condition at the specified temperature for a period of 60 min. After the 60-min time period, carefully move the traveling carriage back to a position where the ends of the specimens just touch. If the specimen ends have sagged, carefully lift them to their original level prior to adjusting the ends to touch. Record the total length of the specimen with the severed ends just touching each other. While the test is being made, the water in the tank of the testing machine shall cover the specimen both above and below it by at least 2.5 cm and shall be kept continuously at the temperature specified within 0.5°C (±0.9°F).

6.4 If the bituminous material comes in contact with the surface of the water or the bottom of the bath, the test shall not be considered normal. Adjust the specific gravity of the bath by the addition of either methyl alcohol or sodium chloride so that the bituminous material neither comes to the surface of the water, nor touches the bottom of the bath at any time during the test.

NOTE 6—Mixing of clips and sides from different manufacturers may result in sample dimensions other than specified. Measure the width at the cross section of the assembled mold and compare to Fig. 1.

7. Calculation and Report

7.1 Calculate the percent recovery as follows:

$$Recovery, \% = \frac{E - X}{E} \times 100 \tag{1}$$

where:

E = original elongation of the specimen, cm, and

**D 6084**

$X$  = elongation of the specimen with severed ends just touching, cm.

7.1.1 Report to the nearest whole percent the average of three normal tests as the elastic recovery of the sample.

7.2 If the sample fractures before reaching the specified elongation, the test shall not be considered normal.

7.3 If a normal test is not obtainable on three tests, report the elastic recovery as being unobtainable under the conditions of the test.

7.4 It is suggested that a form sheet as shown in Fig. 2 be used to record the specific test conditions and results.

7.5 Report the sample thermal history handling information as shown in Fig. 2.

**8. Precision and Bias <sup>7</sup>**

8.1 *Precision*—Criteria for judging the acceptability of two single measurements (see Note 7) obtained by this test method are given as follows:

<sup>7</sup> This is based on the analysis of data resulting from tests by nine laboratories, each testing three replicate specimens. The conditions for this research report were as follows:

Test Temperature — 25°C  
 Speed — 5 cm/min  
 Elongation — 10 cm

NOTE 7—Although this test method describes a (C5) result as the average of three single measurements, the precision estimates shown as follows are based on the analysis of single measurements. For comparing two test results, the single-operator (1s) and (d2s) estimates would be reduced by a factor of  $1/\sqrt{3}$ . The multilaboratory (1s) and (d2s) estimates would not change.

NOTE 8—The figures given in Column 3 are the standard deviations that have been found to be appropriate for the materials and mean values described in Columns 1 and 2. The figures given in Column 4 are the limits that should not be exceeded by the difference between the results on two test specimens.

Materials Index	Standard Deviation <sup>A</sup>	Acceptable Range of Two Results <sup>A</sup>
Single-operator precision:		
1 (unmodified)	0.91	2.6
2 (modified)	0.56	1.6
Multilaboratory precision:		
1 (unmodified)	2.32	6.5
2 (modified)	1.71	4.8

<sup>A</sup> These numbers represent, respectively, the (1s) and (d2s) limits as described in Practice C 670.

8.2 *Bias*—Since there is no accepted reference material for determining the bias in this test method, no statement on bias is made.

**9. Keywords**

9.1 bituminous material; ductility; elastic; recovery

ASTM D 6084

Lab No. \_\_\_\_\_

Sample No.	1A	1B	1C	2A	2B	2C	Notes
Date:							
Test Temp.	25 °C				25 °C		
Speed (cm/min)	5				5		
Elongation (cm)	10				10		
Orig. Elongation (E)							
Elongation after (X)							
% Elastic Recovery							
Avg. % Elastic Recovery							
Additional Info. Project: Type Mat:  Handling Conditions A.C. - Sieve Size: Pour Temp: ? Reheat:  Emul. - Dist. Temp: Sieve Size ? Reheat Pour Temp.							

FIG. 2 Sample Report Form

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

**Anexo 5.** Hojas de datos de PETROPERÚ



PETRÓLEOS DEL PERÚ - PETROPERÚ S.A.

**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PETROPERÚ**

<b>CLASE DE PRODUCTO</b>				
<b>ASFALTO SÓLIDO</b>				
<b>TIPO DE PRODUCTO</b>				
<b>CEMENTO ASFÁLTICO</b>				
<b>NOMBRE DE PRODUCTO</b>				
<b>ASFALTO SÓLIDO 120/150 PEN</b>				
ENSAYOS	ESPECIFICACIONES (a)		MÉTODO	
	MÍN.	MÁX.	ASTM	AASHTO
<b>PENETRACIÓN</b>	120	150	D-5	T-49
a 25°C, 100 g, 5 s, 0.1mm				
<b>VOLATILIDAD</b>				
Punto de inflamación Cleveland, copa abierta, °C	218		D-92	T-48
Gravedad específica a 15.6/15.6°C		Reportar	D-70	T-228
<b>DUCTILIDAD</b> a 25°C, 5 cm/min, cm	100		D-113	T-51
<b>SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO,</b> % masa	99,0		D-2042	T-44
<b>SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA</b>				
Prueba de calentamiento sobre película fina, 3.2 mm, 163°C, 5 horas:			D-1754	T-179
Pérdida por calentamiento, % masa		1,3		
Penetración retenida, % del original	42+		D-5	T-49
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm	100		D-113	T-51
Índice de susceptibilidad térmica	-1.0	+1.0		Francés RLB
<b>FLUIDEZ</b>				
Viscosidad cinemática a 100°C, cSt		Reportar	D-2170	T-201
Viscosidad cinemática a 135°C, cSt	140		D-2170	T-201
<b>REQUERIMIENTO GENERAL:</b>	El cemento asfáltico deberá ser homogéneo, libre de agua, y no deberá formar espuma al ser calentado a 175°C.			
<b>OBSERVACIONES:</b>				
(a) En concordancia con a Norma Técnica Peruana NTP 321.051 y con los estándares ASTM D 946 y AASHTO M-20.				

PETROPERÚ ... LA ENERGÍA QUE MUEVE TU MUNDO

PETRÓLEOS DEL PERÚ - PETROPERÚ S.A.

**Hoja de Datos de Seguridad de Materiales**Pág. 1 de 5  
Edición: Diciembre 2013**1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO E INFORMACIÓN DE LA EMPRESA**

Nombre comercial	: PETROPERÚ ASFALTO SÓLIDO 120/150 PEN
Nombre alternativo	: C.A. 120/150 PEN
Empresa	: Petróleos del Perú - PETROPERÚ S.A.
Dirección	: Av. Enrique Canaval Moreyra 150, Lima 27 - Perú
Teléfonos	: (01) 614-5000; (01) 630-4000
Portal Empresarial	: <a href="http://www.petroperu.com.pe">http://www.petroperu.com.pe</a>
Atención al cliente	: (01) 630-4079 / 0800 77 155 (línea gratuita) : <a href="mailto:servcliente@petroperu.com.pe">servcliente@petroperu.com.pe</a>

**2. COMPOSICIÓN**

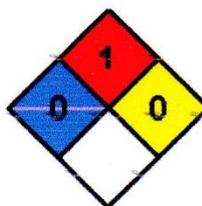
El Asfalto Sólido 120/150 PEN es una mezcla multicomponente de hidrocarburos derivados del petróleo, no volátiles, de elevado peso molecular.

**3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS**

El producto es una sustancia inflamable (el grado depende de la temperatura de manipulación).

La clasificación de riesgos según la NFPA (National Fire Protection Association) es la siguiente:

- Salud : 0
- Inflamabilidad : 1
- Reactividad : 0



Los peligros también se pueden asociar a los efectos potenciales a la salud:

**- CONTACTO**

**OJOS:** El contacto con el producto en estado líquido (alta temperatura) provoca quemaduras graves y los vapores causan irritación.

**PIEL:** El producto en estado líquido (alta temperatura) ocasiona quemaduras. A temperatura ambiente no hay efectos serios a corto plazo.

**- INHALACIÓN**

La inhalación de los vapores del producto caliente provoca dolor de cabeza, irritación nasal y respiratoria, tos, mareos y vértigo.

**- INGESTIÓN**

La ingestión del producto a la temperatura de manipulación es improbable; sin embargo si se realiza a temperatura ambiente provoca irritación al estómago y vómitos.

## Hoja de Datos de Seguridad de Materiales

Pág. 2 de 5  
Edición: Diciembre 2013

### 4. PRIMEROS AUXILIOS

#### - CONTACTO

OJOS: Lavar con abundante agua por 15 minutos. Obtener atención médica de inmediato para la remoción del producto y el tratamiento de las quemaduras si el contacto ocurrió con el producto a alta temperatura.

PIEL: En caso de contacto con el producto caliente aplicar solamente agua con la finalidad de refrescar el área, no remover el producto si está adherido a la piel, esto debe ser realizado por personal médico. El lavado con jabón y abundante agua es suficiente si el producto está a temperatura ambiente, en todo caso, obtener atención médica si el contacto causa una irritación.

#### - INHALACIÓN

Trasladar inmediatamente a la persona afectada hacia un ambiente con aire fresco. Administrar respiración artificial o resucitación cardiopulmonar de ser necesario y obtener atención médica de inmediato.

#### - INGESTIÓN

Para el producto frío, no inducir al vómito y obtener atención médica de inmediato.

### 5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIO

Evacuar al personal del área hacia una zona más segura y a una distancia conveniente si hay tanque o camión cisterna involucrado. Detener el sistema de calentamiento del producto y controlar la fuga en caso de que exista. Utilizar medios adecuados para extinguir el fuego y agua en forma de rocío para enfriar los tanques o los recipientes que contienen al producto.

AGENTES DE EXTINCIÓN: Polvo químico seco, CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) y espuma.

PRECAUCIONES ESPECIALES: Durante el incendio, evitar que el agua entre en contacto directamente con el producto, debido a los riesgos de salpicaduras y erupciones violentas. La extinción de fuego de grandes proporciones sólo debe ser realizada por personal especializado.

### 6. MEDIDAS EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL

DERRAMES PEQUEÑOS Y MEDIANOS: Detener la fuga y ventilar la zona afectada. Contener el líquido caliente con arena, tierra u otro material apropiado. Dejar enfriar el producto para que se solidifique y trasladarlo hacia un depósito identificado. Si es posible, recuperar el producto o realizar la disposición final de acuerdo a un procedimiento implementado.

DERRAMES DE GRAN PROPORCIÓN: Evacuar al personal no necesario. Apagar el sistema de calentamiento del tanque o camión tanque. Detener la fuga o interrumpir el suministro del producto y ventilar el área. Contener el derrame y dejar enfriar, recoger el producto y si es posible, proceder a su recuperación. Colocar el material contaminado en recipientes identificados para su disposición final.

NOTA: Todo el personal que esté involucrado en la contención del derrame debe utilizar un equipo de protección personal, además debe seguir las instrucciones de un plan de contingencia implementado.

## Hoja de Datos de Seguridad de Materiales

Pág. 3 de 5  
Edición: Diciembre 2013

### 7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

Usar un equipo completo de protección durante la manipulación del producto en estado líquido; posteriormente proceder a la higiene personal.

Antes de realizar el procedimiento de carga y/o descarga del producto, conectar a tierra los tanques o camiones tanque.

Usar sistemas a prueba de chispas y explosión. Evitar las salpicaduras.

Almacenar en tanques especialmente diseñados para tal fin; debido a las facilidades para su manipulación, los tanques poseen un sistema de calentamiento, por lo tanto, es necesario realizar un monitoreo permanente de la temperatura para evitar el sobrecalentamiento del producto. Se recomienda mantener la temperatura a 30 °C por debajo del punto de inflamación del producto.

El producto no debe ser almacenado en instalaciones ocupadas permanentemente por personas.

La manipulación y almacenamiento del producto en estado líquido se debe realizar de tal manera que no sea posible el contacto con el agua.

NOTA: El envasado del producto en cilindros y la transferencia a camiones cisterna debe ser realizado siguiendo estrictamente un procedimiento implementado.

N° CAS: 8052-42-4

### 8. CONTROL A LA EXPOSICIÓN Y PROTECCIÓN PERSONAL

- CONTROL DE INGENIERÍA: Instalar sistemas de control de temperatura en los tanques de almacenamiento, para evitar el sobrecalentamiento del producto. Contar con duchas y lavajos e identificar las salidas de emergencia en el lugar de trabajo.
- PROTECCIÓN RESPIRATORIA: No es necesaria cuando existan condiciones de ventilación adecuadas. Si se realiza alguna actividad donde exista la exposición a altas concentraciones de vapores del producto en el aire, se requiere de un equipo de respiración autocontenido.
- OJOS: Gafas de seguridad contra salpicaduras químicas.
- PIEL: Guantes de neopreno, nitrilo o PVC, zapatos de seguridad, protectores faciales y ropa completa de protección.

### 9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

APARIENCIA, COLOR, OLOR	: Sólido a temperatura ambiente, líquido durante su manipulación a más de 100° C, homogéneo y libre de agua. Color de marrón oscuro a negro y olor característico.
GRAVEDAD ESPECÍFICA a 15.6/15.6°C	: 1.01 – 1.03 aprox.
PUNTO DE INFLAMACIÓN, °C	: 218 mín.
PUNTO DE AUTOIGNICIÓN, °C	: 485 aprox.
LÍMITES DE INFLAMABILIDAD, % Vol. en aire	: De 1 a 6 aprox.
SOLUBILIDAD EN AGUA	: Insignificante.

PETRÓLEOS DEL PERÚ - PETROPERÚ S.A.

**Hoja de Datos de Seguridad de Materiales**Pág. 4 de 5  
Edición: Diciembre 2013**10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD**

ESTABILIDAD: Estable a temperatura ambiente.

COMPATIBILIDAD DEL MATERIAL: Es incompatible con agentes oxidantes fuertes como cloro, hipoclorito de sodio, peróxidos, etc. Durante su manipulación a altas temperaturas es incompatible con el agua, debido a la posibilidad de formar erupciones y salpicaduras violentas.

**11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA**

La toxicidad del producto está asociada al contacto y a los niveles de exposición.

**EFFECTOS**

Se pueden considerar los efectos agudos y crónicos indicados en el ítem 3 (CONTACTO/INHALACIÓN/INGESTIÓN).

**CARCINOGENICIDAD**

Clasificación IARC: No aplicable

**12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA**

El producto al entrar en contacto accidental con el agua puede hundirse, asentándose en el fondo al ser insoluble.

No presenta toxicidad para la vida acuática.

Al contacto con el suelo se superpone en el terreno manteniendo su estado físico.

**13. CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA DISPOSICIÓN FINAL**

La disposición final del producto se realiza de acuerdo a la reglamentación vigente.

**14. INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE**

El producto debidamente etiquetado es transportado a granel en camiones tanque, que poseen sistemas de calentamiento para mantener el producto en estado líquido; el personal que realiza el traslado del producto debe estar previamente capacitado para acciones de emergencia durante el trayecto. Si el producto está envasado en cilindros y es transportado a temperatura ambiente no representa un peligro. El transporte se realiza de acuerdo a las normas de seguridad vigentes.

- Código Naciones Unidas : UN 3257 - Líquido a temperatura elevada (Transportado a granel).  
UN 1999 - A temperatura ambiente (Transportado en cilindros).
- Señalización pictórica según :  
NTP 399.015.2001 (Estado líquido).



**Hoja de Datos de Seguridad de Materiales**Pág. 5 de 5  
Edición: Diciembre 2013**15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA**

Clasificación: No aplicable  
Etiquetado: No aplicable  
Frases R: No aplicable  
Frases S: No aplicable

**16. INFORMACIÓN ADICIONAL**

En el Perú, el producto ASFALTO SÓLIDO 120/150 PEN está reglamentado por normas dictadas por el Ministerio de Energía y Minas:

- Reglamento de Seguridad para el Transporte de Hidrocarburos aprobado por Decreto Supremo N° 026-94-EM (10/05/94), y modificaciones.
- Reglamento de Seguridad para el Almacenamiento de Hidrocarburos aprobado por Decreto Supremo N° 052-1993-EM (18/11/1993), y modificaciones.
- Reglamento de medio ambiente para las actividades de hidrocarburos aprobado por Decreto Supremo N° 015-2006-EM (02/03/2006), y modificaciones.
- Reglamentos para la Comercialización de Combustibles Líquidos y Otros Productos Derivados de los Hidrocarburos aprobados por los Decretos Supremos N° 030-1998-EM (03/08/1998) y N° 045-2001-EM (26/07/2001), y modificaciones.
- Reglamento de Seguridad para las Actividades de Hidrocarburos aprobado por Decreto Supremo N° 043-2007-EM (22/08/2007), y modificaciones.

El uso del producto fuera del territorio peruano está sujeto a la reglamentación vigente de cada país.

EMERGENCIAS a nivel nacional : 116  
Dirección General de Capitanías y Guardacostas : (511) 209-9300

Nota: El presente documento constituye información básica para que el usuario tome los cuidados necesarios a fin de prevenir accidentes. PETROPERÚ no se responsabiliza por actividades fuera de su control.

\*\*\*\*\*