

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL CON MENCIÓN EN
CARRETERAS, PUENTES Y TÚNELES



Tesis para optar el Grado Académico de Maestro en Ingeniería Vial con
Mención en Carreteras, Puentes y Túneles

Ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple para
determinar su caracterización física y reológica.

Autor: Bach. Aduino Barzola, María Cristina

Asesor: Dr. Valencia Gutiérrez, Andrés Avelino

LIMA-PERÚ

2022

PÁGINA DEL JURADO

Presidente :

Miembro 1 :

Miembro 2 :

Asesor : Dr. Valencia Gutiérrez, Andrés Avelino

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

LABORATORIO TDM

DEDICATORIA

A Sonia y Carlos que me brindan su apoyo incondicional, todos mis logros son para ellos y por ellos.

A Carlitos quien me guía con sus consejos para dar lo mejor de mi día a día.

A Alex por la motivación de seguir adelante y el amor incondicional.

A Ice y Puchi por la compañía en todo momento.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitir que pueda realizar mis metas y me de fortaleza para poder seguir adelante.

A mi familia por el apoyo incondicional en todos mis proyectos.

Al Dr. Valencia por sus recomendaciones y estímulo constante.

Al equipo TDM Asfaltos por el apoyo en la realización de los ensayos.

Y a todas las personas que formaron parte de la formulación de esta investigación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
ÍNDICE DE TABLAS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
RESUMEN	XVI
ABSTRACT.....	XVII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. Descripción del problema	3
1.2. Formulación del problema	7
1.2.1. Problema general.....	7
1.2.2. Problemas específicos	7
1.3. Importancia de la investigación	7
1.4. Justificación de la investigación	8
1.4.1. Justificación económica	8
1.4.2. Justificación teórica.....	8
1.4.3. Justificación tecnológica	9
1.5. Delimitación del estudio	9
1.5.1. Delimitación espacial	9

1.5.2.	Delimitación temporal.....	9
1.5.3.	Delimitación teórica	9
1.6.	Limitación.....	10
1.7.	Objetivos de la investigación.....	10
1.7.1.	Objetivo general	10
1.7.2.	Objetivos específicos.....	10
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO		11
2.1.	Marco histórico	11
2.2.	Investigaciones relacionadas con el tema	12
2.2.1.	Investigaciones internacionales.....	12
2.2.2.	Investigaciones nacionales	19
2.3.	Estructura científica y teórica que sustenta el estudio	20
2.3.1	Ligante asfáltico	20
2.3.1.1.	Definición.....	20
2.3.1.2.	Componentes del ligante asfáltico.....	22
2.3.1.3.	Tipos de ligantes asfálticos	22
2.3.1.4.	Ligantes asfálticos con aditivos.....	24
2.3.1.5.	Ligantes asfálticos con bitúmenes.....	24
2.3.1.6.	Ligantes asfálticos con nanotecnología.....	25
2.3.1.7.	Ensayos en ligante asfálticos.....	26
2.3.2	Nanotubos de carbono	30

2.3.2.1.	Origen de los nanotubos de carbono	30
2.3.2.2.	Definición.....	31
2.3.2.3.	Obtención de nanotubos de carbono	32
2.3.2.4.	Propiedades	35
2.3.2.5.	Características	36
2.3.2.6.	Aplicaciones	36
2.3.3	Caracterización.....	38
2.3.3.1.	Caracterización física	38
2.3.3.2.	Caracterización Reología	38
2.4.	Definición de términos básicos.....	39
2.5.	Hipótesis	40
2.5.1.	Hipótesis general	40
2.5.2.	Hipótesis específicas	40
2.6.	Variables	40
2.6.1.	Definición conceptual de la variable.....	41
2.6.2.	Operacionalización de las variables	41
CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO.....		43
3.1.	Tipo, método y diseño de la investigación	44
3.1.1.	Método de investigación	44
3.1.2.	Enfoque de la investigación	44
3.1.3.	Orientación de la investigación.....	44

3.1.4.	Tipo de investigación	44
3.1.5.	Nivel de la investigación	45
3.1.6.	Diseño de la investigación.....	45
3.2.	Objeto de Estudio.....	46
3.2.1.	Población y muestra	46
3.3.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	46
3.3.1.	Instrumentos de recolección de datos.....	46
3.3.2.	Validez del instrumento	47
3.3.3.	Confiabilidad de los instrumentos.....	48
3.4.	Descripción de procedimientos de análisis.....	48
3.4.1.	Modificación del ligante asfáltico Pen 60/70.....	48
3.4.2.	Ensayo de Penetración	55
3.4.3.	Ensayo de punto de Ablandamiento.....	59
3.4.4.	Viscosidad Brookfield, 135°C	63
3.4.5.	Ductibilidad.....	66
3.4.6.	Punto de Inflamación	70
3.4.7.	Efecto de calentamiento y ventilación de asfaltos RTFOT.....	73
3.4.8.	Determinación de propiedades reológicas de ligantes asfálticos mediante el DSR (Ligante asfáltico sin envejecer)	76
3.4.9.	Determinación de las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos DSR envejecido RTFOT.....	79

3.4.10. Recuperación y fluencia del asfalto a esfuerzos repetidos mediante reómetro de corte dinámico (MSCR).....	81
3.4.11. Envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos mediante el dispositivo de envejecimiento presurizado (PAV).....	84
3.4.12. Determinación del límite intermedio del grado de desempeño del Ligante asfáltico + RTFOT + PAV	86
3.4.13. Determinación del límite inferior del grado de desempeño BBR del ligante asfáltico envejecido RTFOT + PAV	89
3.4.14. Clasificación del asfalto según grado de desempeño AASHTO M 320 .97	
3.4.15. Ligante asfáltico virgen Pen 60/70.....	100
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	103
4.1. Resultados.....	103
4.1.1. Ligante Asfáltico PEN 60/70	103
4.1.1.1. Caracterización física	103
4.1.1.2. Caracterización Reológica.....	104
4.1.2. Ligante asfáltico con 2.5% de nanotubos de carbono de pared múltiple	107
4.1.2.1. Caracterización física	107
4.1.2.2. Caracterización Reológica.....	107
4.2. Análisis de resultados	110
4.2.1. Contrastación de hipótesis.....	110

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	116
REFERENCIAS DOCUMENTARIAS	118
ANEXOS	125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Marco histórico	11
Tabla 2 Composición del asfalto.....	22
Tabla 3 Características de los NTC	36
Tabla 4 Operacionalización de variables	42
Tabla 5 Instrumentos de recolección de datos	47
Tabla 6 Especificaciones técnicas de los MWNTC	51
Tabla 7 Programación de ensayos.....	54
Tabla 8 Datos de penetración.....	58
Tabla 9 Lectura de muestra 1	63
Tabla 10 Lectura de muestra 1 del ensayo de viscosidad	65
Tabla 11 Lectura de distancia de las muestras	70
Tabla 12 Medida del punto de inflamación	72
Tabla 13 Resultado de cambio de masa	76
Tabla 14 Resultado de ensayo DSR.....	78
Tabla 15 Ensayo DSR envejecido.....	80
Tabla 16 Resultado del ensayo MSCR	83
Tabla 17 Clasificación del ligante.....	84
Tabla 18 Resultado del límite intermedio	88
Tabla 19 Muestra 1 a -12°C	92
Tabla 20 Rigidez muestra 1 a -12°C	92
Tabla 21 Muestra 2 a -12°C	93
Tabla 22 Rigidez muestra 2 a -12°C	93
Tabla 23 Promedio de rigidez m1 y m2.....	94
Tabla 24 Muestra 1 a -18°C	94

Tabla 25 Rigidez de la muestra 1 a -18°C	95
Tabla 26 Muestra 2 a -18°C	95
Tabla 27 Rigidez de la muestra 2 a -18°C	96
Tabla 28 Promedio rigidez a -18°C	96
Tabla 29 Clasificación ligante asfáltico	97
Tabla 30 Caracterización del ligante asfáltico virgen	100
Tabla 31 Caracterización del ligante asfáltico pen 60/70	101
Tabla 32 Caracterización física ligante asfaltico pen 60/70	103
Tabla 33 Ensayo MSCR ligante pen 60/70	104
Tabla 34 Clasificación MSCR ligante pen 60/70	105
Tabla 35 Clasificación ligante PG pen 60/70	106
Tabla 36 Caracterización física ligante asfaltico con 2.5% de mwntc	107
Tabla 37 Clasificación MSCR del ligante asfáltico + 2.5% mwntc	108
Tabla 38 Clasificación MSCR del ligante + 2.5% mwntc	109
Tabla 39 Clasificación PG del ligante + 2.5% mwntc	109
Tabla 40 Comparación de caracterización física	111
Tabla 41 Comparación MSCR de caracterización reológica	113
Tabla 42 Comparación PG de caracterización reológica	114
Tabla 43 Capacidad de mejora	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Modalidad de ocurrencia de accidentes de tránsito en carreteras.....	4
Figura 2 Vehículos que participaron en accidentes de tráfico en carreteras.....	5
Figura 3 Proceso de destilación del petróleo	21
Figura 4 Dimensiones de placas del ensayo DSR.....	27
Figura 5 Ensayo de punto de ablandamiento	28
Figura 6 Buckiesferas	30
Figura 7 Nanotubos de carbono	31
Figura 8 Método de deposición de vapor químico.....	32
Figura 9 Método de descarga de arco eléctrico	33
Figura 10 Método de deposición por láser pulsado	34
Figura 11 Método de ablación láser.....	34
Figura 12 Metodología y ensayos	43
Figura 13 Ligante asfáltico	49
Figura 14 Pesado de MWNTC.....	52
Figura 15 Adicción de MWNTC	53
Figura 16 Calentamiento del ligante	55
Figura 17 Ligante asfáltico pen 60/70	56
Figura 18 Moldes para el ensayo de penetración.....	56
Figura 19 Máquina de agua.....	57
Figura 20 Calibración del penetrómetro	58
Figura 21 Lectura de ensayo de penetración.....	59
Figura 22 Moldes de ensayo de ablandamiento.....	59
Figura 23 Enrasado del asfalto.....	60
Figura 24 Termómetro	60

Figura 25 Molde de ensayo de punto de ablandamiento.....	61
Figura 26 Ensayo de punto de ablandamiento	62
Figura 27 Caída de esferas	62
Figura 28 Resultados de punto de ablandamiento	63
Figura 29 Pesado de muestras para viscosidad	64
Figura 30 Calibración equipo Brookfield	64
Figura 31 Gráfica de lectura de viscosidad.....	65
Figura 32 Pesado del ligante para el ensayo de ductibilidad	66
Figura 33 Introducción del ligante al horno.....	67
Figura 34 Preparación de molde para ductibilidad	67
Figura 35 Muestras para ensayo de ductibilidad.....	68
Figura 36 Enrasado y cámara de agua	68
Figura 37 Procedimiento de ensayo de ductibilidad	69
Figura 38 Distancia de rotura de la muestra	69
Figura 39 Gráfica del ensayo de ductibilidad	70
Figura 40 Calentamiento y calibración copa Cleveland	71
Figura 41 Colocación del ligante en la copa de Cleveland.....	71
Figura 42 Inflamación del ligante con nanotubos.....	72
Figura 43 Gráfica de punto de inflamación	73
Figura 44 Calentamiento del ligante asfáltico en estufa	73
Figura 45 Pesado del ligante	74
Figura 46 Reposo del ligante	74
Figura 47 Pesado de tubos de ensayo	75
Figura 48 Horno RTFOT	76
Figura 49 Moldes para ensayo DSR	77

Figura 50 Calibración Reómetro digital	77
Figura 51 Gráfica de ensayo DSR	78
Figura 52 Colocación del ligante envejecido en moldes	79
Figura 53 Colocación de ligante en pastillas	80
Figura 54 Gráfica de ensayo DSR + RTFOT	81
Figura 55 Reómetro digital	82
Figura 56 Ensayo MSCR	82
Figura 57 Gráfica de tensión vs tiempo	83
Figura 58 Horno PAV	85
Figura 59 Muestras PAV	85
Figura 60 Cámara de desgasificación	86
Figura 61 Muestras luego de PAV	87
Figura 62 Reómetro para hallar el límite intermedio.....	87
Figura 63 PG intermedio.....	88
Figura 64 Ensayo BBR	89
Figura 65 Pesas de calibración.....	90
Figura 66 Vigas ensayo BBR.....	90
Figura 67 Comienzo del ensayo BBR.....	91
Figura 68 Especificaciones asfalto AASHTO M320 tabla 1	98
Figura 69 Especificaciones PG del asfalto AASHTO M320 tabla 2.....	99
Figura 70 Especificaciones PG asfalto AASHTO M320 tabla 3 A.....	99
Figura 71 Especificaciones PG asfalto AASHTO M320 tabla 3B	100
Figura 72Especificaciones del asfalto clasificado por penetración	101
Figura 73 %Capacidad de mejora	115

RESUMEN

Esta investigación, titulada: Ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple para determinar su caracterización física y reológica es de enfoque cuantitativo que, surge ante el problema ¿De qué manera el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple mejora su caracterización física y reológica? que motivó la formulación del objetivo. Evaluar el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple para determinar su caracterización física y reológica, con la finalidad de analizar el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple, a fin de determinar su caracterización física y su reología, que a través de la metodología y ensayos de laboratorio como grado de desempeño Superpave PG , DSR (AASHTO T315), BBR (ASTM D 6648), recuperación de fluencia a esfuerzo múltiple MSCR (AASHTO TP70), penetración (ASTM D5), punto de ablandamiento (ASTM D36), ductibilidad (ASTM D113), viscosidad de Brookfield (ASTM D4402), se llegó a los resultados de que el ligante asfáltico mejora su caracterización física en la viscosidad en un 3.06% , en el punto de inflamación en un 6.43% y en su caracterización reológica en Jnr en un 28.73%, evidenciado en la Tabla 43, así concluyendo que el ligante asfáltico con MWNTC mejora su caracterización física y reológica.

Los resultados de laboratorio presentados en el Anexo 3, Anexo 4, Anexo 5 y Anexo 6 fueron almacenados y analizados de acuerdo con la normativa ASTM y AASHTO correspondiente, finalmente obteniendo las características del ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple.

Palabras claves: Caracterización física, ligante asfáltico, nanotubos de carbono de pared múltiple (MWNTC), reología

ABSTRACT

This research, entitled: Asphalt binder with multi-walled carbon nanotubes to determine physical characterization and rheology is a quantitative approach that arises when faced to the problem: How does the asphalt binder with multi-walled carbon nanotubes improves physical characterization and rheology? That motivated the formulation of the objective. Evaluate the asphalt binder with multi-walled carbon nanotubes to determine physical characterization and rheology in the order to analyze the asphalt binder with multi-walled carbon nanotubes, for the determination of the physical characterization and rheology which through the methodology and laboratory tests such as Superpave PG performance grade DSR (AASHTO T315), BBR test (ASTM D 6648) MSCR multiple stress creep recovery (AASHTO TP70), Penetration (ASTM D5), point softening (ASTM D36), ductility (ASTM D113), Brookfield viscosity (ASTM D4402), the results were obtained that the asphalt binder improves physical characterization in viscosity by 3.06%, in flash point by 6.43% and rheological in J_{nr} by 28.73% evidenced in Table 43, thus concluding that the asphalt binder with MWNTC improves physical characterization and rheology.

The laboratory results present in Annex 3, Annex 4, Annex 5, Annex 6, were stored and analyzed in accordance with ASTM and AASHTO regulations, finally obtaining the characteristics of the asphalt binder with multi-walled

Keywords: Physical characterization, asphalt binder, multi-walled carbon nanotubes (MWNTC), rheology.

INTRODUCCIÓN

La nanotecnología modifica el comportamiento mecánico y reológico del asfalto mejorando las condiciones del desempeño. (Villegas et al ,2018).

Los nanotubos son materiales artificiales que miden 100 nanómetros que son 100 veces más resistentes que el acero, tienen una resistencia elevada al calor y son hidrofóbicos. Los nanotubos se destacan por tomar las partes más fuertes del asfalto generando adherencia y evitan el desgaste. (Reyes & Daza,2012)

En la siguiente investigación se determina la caracterización física y reológica del ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple utilizando ensayos de laboratorio establecidos por la normativa ASTM Y AASHTO.

La limitación de la investigación fue el tiempo de espera del proceso de importación del nanomaterial.

La siguiente investigación se desarrolla en cuatro capítulos los cuales son:

Capítulo I: Se realiza la problemática del ligante asfáltico, seguidamente se presenta la importancia de la investigación, así también se detalla la justificación económica, teórica y tecnológica. Luego se expone la delimitación espacial, temporal y teórica. Por último, se presentan los objetivos generales y específicos de la investigación.

Capítulo II: Primeramente, se presenta el marco histórico que se recopiló para la investigación, asimismo se presentan las investigaciones nacionales e internacionales

relacionadas con el tema. Luego se realiza la estructura científica y teórica que sustenta el estudio. Continuando se exponen las hipótesis generales y específicas formuladas. Seguidamente se detallan las variables, sus definiciones conceptuales y se presenta un cuadro de operacionalización de las variables.

Capítulo III: En primer lugar, se presenta la metodología que se utilizó para la investigación, las cuales son los ensayos AASHTO T315, ASTM D 6648, AASHTO TP 70, ASTM D5, ASTM D36, ASTM D113, AASHTO T84, y ASTM D 4402. Luego se expone el método, enfoque, orientación, tipo, nivel y diseño de la investigación.

Continuando con el capítulo se desarrolla la población y muestra, las técnicas e instrumentos de recolección de datos, se describe la validez y confiabilidad de los instrumentos. Por último, se desarrollan los procedimientos de análisis.

Capítulo IV: Se presentan los resultados, asimismo se detallan la constatación de las hipótesis con los resultados y se discute los resultados.

Finalmente se presentan las conclusiones con las que damos respuesta a los objetivos de la investigación y seguidamente se detallan las recomendaciones.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

El Perú es uno de los países menos desarrollados en infraestructura vial en Sudamérica, en los últimos años se ha visto reflejado los estragos que causó el fenómeno del Niño Costero del 2017 el cual dio origen muchos daños en la mayoría de los proyectos viales del Perú, esto fue señalado por Jorge Zegarra presidente del área de Construcción. e Ingeniería de la Cámara de Comercio de Lima (CCL).

Aldazabal.A.(2019) *El 80% de las carreteras del Perú está en mal estado. Diario Correo* “Las lluvias y el stress térmico (el fuerte calor, sobre todo en el norte del país) han dañado seriamente las carretas del país, tanto que el 80% está en mal estado y requieren ser reparadas y asfaltadas con productos bituminosos de larga duración”

ALD Automotive Perú (2020) *Cómo afecta el mal estado de las carreteras a la seguridad en el vehículo.* “Una carretera que se encuentra en mal estado, puede causar desperfectos en los automóviles asimismo la presencia de grietas, baches, socavones u otro daño estructural que tenga las carreteras incrementan el riesgo de sufrir accidentes de tránsito, ocasionado por una pérdida de control del vehículo, por fatiga del conductor, o por inclemencias meteorológicas que ocasionan desprendimientos de la capa de asfalto y acumulación de agua en ciertos tramos de vía.”

La población afectada son los pobladores de las ciudades donde se encuentran las carreteras, asimismo los usuarios foráneos que realizan el uso de carreteras para transportarse

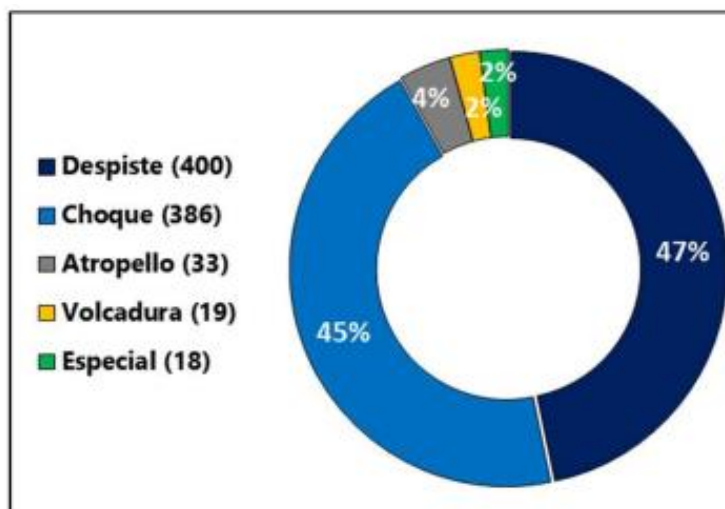
de una ciudad a otra, por otro lado, también se encuentran afectadas las empresas de transporte que transportan mercaderías para uso comercial y transporte de pasajeros.

Las consecuencias para esta población afectada es el incremento de accidentes de tránsito, asimismo la gravedad de ellos, ya que los accidentes no solo son ocasionados por la fatiga o cansancio de los conductores que se encuentran realizando las rutas, sino también el estado de las carreteras tiene una influencia directa en los accidentes ocasionando despistes, volcaduras, y averías en los vehículos usuarios.

Según, Sutran. (2021). *Reporte estadístico N°004-2021-Accidentes de tránsito ocurridos en carreteras a febrero del 2021*. Las modalidades de ocurrencia de los accidentes producidos en las diferentes carreteras del Perú son los siguientes.

Figura 1

Modalidad de ocurrencia de accidentes de tránsito en carreteras



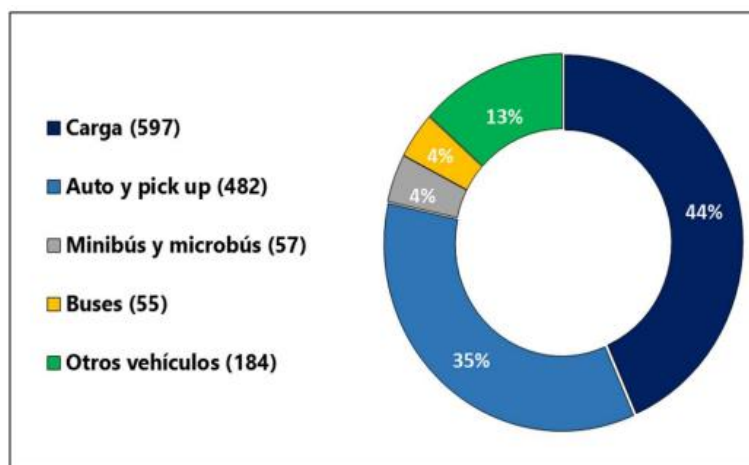
Nota. Esta figura muestra un gráfico de la frecuencia de ocurrencia de los accidentes de tránsito en las carreteras del Perú ocurridos en febrero. De Reporte estadístico N°004-2021-Accidentes de tránsito ocurridos en carreteras a febrero del 2021, DIRPRCAR-PNP SUTRAN (2021)

Se puede observar que el mayor porcentaje de la modalidad de ocurrencia de accidentes es de un 47% el cual es por despiste y seguidamente el 45% que es por choque.

De enero a febrero del 2021 se identificaron 1375 vehículos que tuvieron accidentes de tránsito en las carreteras, los cuales son identificados por el siguiente gráfico.

Figura 2

Vehículos que participaron en accidentes de tráfico en carreteras.



Nota: En esta figura muestra un gráfico donde se detalla el porcentaje de participación de los tipos de vehículos en accidentes de tráfico. De Reporte estadístico N°004-2021-Accidentes de tránsito ocurridos en carreteras a febrero del 2021, DIRPRCAR-PNP SUTRAN (2021)

Del total de los usuarios accidentados, el mayor porcentaje de usuarios son los transportistas de carga con 44%, seguidamente por los autos y pick up con un 35%

Según los gráficos proporcionados podemos observar que las personas afectadas directamente son los usuarios de carga y transporte con la modalidad de accidente de despiste o choque, estos accidentes son ocasionados por estado de la carretera que no proporciona una seguridad vial adecuada para todos los usuarios y asimismo por fallas humanas.

Por lo cual se busca con esta investigación desarrollar nuevas alternativas de asfaltos para el uso de estos en pavimentos del Perú, teniendo la finalidad de obtener mayor resistencia a las propiedades físicas, estructurales, y climatológicas para poder brindar una mejor seguridad vial a los usuarios teniendo unas carreteras de buen estado, esto también contribuye a que las carreteras puedan requerir menos mantenimiento vial y se pueda ahorrar costos a largo plazo.

Según Kuennen T. (2014). *La ciencia pequeña puede traer grandes cambios a las carreteras*. “Se piensa que la nanotecnología solo es aplicada a los aparatos pequeños, que van relacionados con la medicina, sin embargo, el sector construcción esta dando comienzo al uso de estos nanomateriales para poder realizar mejoras en las construcciones de puentes, edificios y carreteras.

En algunas carreteras la correcta aplicación de la nanotecnología esta permitiendo que se pueda reparar de forma automática los daños causados en los pavimentos como agujeros, asimismo se han desarrollado señales de tráfico que pueden limpiarse de manera autónoma. Por otro lado, se está utilizando nanomateriales para la fabricación de acero y hormigón más resistentes a daños estructurales y ambientales; esto se puede evidenciar en Estados Unidos donde se realizó el uso de nano sensores para vigilar riesgos o irregularidades poco frecuentes que se presentan en las obras de arte como puentes.”

Se busca promover las nuevas tecnologías como el uso de la nanotecnología en las mezclas asfálticas, la cual producirá un mejor desarrollo de la infraestructura vial disminuyendo los problemas actuales que se tiene a causa de diferentes factores como es el clima, las cargas de vehículos y el deterioro de los pavimentos

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿De qué manera el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple mejora su caracterización física y reológica?

1.2.2. Problemas específicos

¿De qué manera el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple mejora su caracterización física?

¿De qué manera el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple mejora su caracterización reológica?

¿De qué manera la evaluación de las características físicas y reológicas entre el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple y el ligante convencional identifica la capacidad de mejora?

1.3. Importancia de la investigación

La importancia de esta investigación radica que la adicción de nanotubos de pared múltiple al ligante asfáltico pen 60-70 generará una mejor resistencia estructural en los pavimentos, mejorará la reacción a los cambios térmicos que se tiene en los diferentes climas del Perú; en algunos casos los betunes que son adicionados a los ligantes asfálticos ayudan a los pavimentos a generar una mejor impermeabilización; asimismo proporcionan una mejor adherencia y mayor elasticidad a los pavimentos.

Estos cambios positivos que generan los nanotubos de carbono hacia los ligantes asfálticos permitirá tener en Perú pavimentos más resistentes, lo cual proporcionará un mejor servicio para los usuarios de las carreteras locales y nacionales.

De esta manera se manifiesta la importancia en cumplir el ciclo de vida de los pavimentos programados permitiendo reducir los costos en el mantenimiento.

1.4. Justificación de la investigación

1.4.1. Justificación económica

Utilizando los nanotubos de pared múltiple en los ligantes asfálticos, se contribuye a realizar carreteras de mayor calidad para los usuarios directos, con carreteras de mayor resistencia estructural y mejor desempeño, frente a cambios climáticos, requieren de un menor mantenimiento ya que su desempeño frente a factores externos es mejor, por lo cual disminuye el costo de mantenimiento y mejora la calidad del pavimento.

1.4.2. Justificación teórica

La presente investigación tiene como finalidad promover el uso de nuevas tecnologías, como la nanotecnología, que engloba diferentes materiales; uno de ellos son los nanotubos de carbono de pared múltiple los cuales son utilizados para realizar mejoras en los ligantes asfálticos incrementando la resistencia de los pavimentos ante los mecanismos de daño que se pueden presentar como cambios climáticos, cambios físicos y cambios químicos.

1.4.3. Justificación tecnológica

El empleo de las nuevas tecnologías en la presente investigación fomenta la incorporación de nuevos materiales, obtenidos a través de la nanotecnología, que corrige las deficiencias encontradas a lo largo de las experiencias en pavimentos.

También se justifica que esta investigación invita a los demás investigadores a valerse de la tecnología de punta.

1.5. Delimitación del estudio

1.5.1. Delimitación espacial

La siguiente investigación se llevará a cabo en la ciudad de Lima, debido a que es la única que cuenta con laboratorios apropiados para poder realizar los ensayos con los ligantes asfálticos.

1.5.2. Delimitación temporal

Temporalmente la investigación se delimita de los meses de diciembre y enero 2021, donde se recolectará la información a través de ensayos de laboratorio y seguidamente se utilizará los instrumentos de recolección de datos de cada ensayo de laboratorio.

1.5.3. Delimitación teórica

En la siguiente investigación estará delimitada al uso de las normas ASTM y AASHTO para los ensayos de laboratorio, evaluando a los ligantes asfálticos de nanotubos de pared múltiple con los parámetros establecidos por la normativa.

1.6. Limitación

La investigación fue limitada por el tiempo de espera de la importación de los materiales de china debido la situación pandémica que estamos atravesando los tiempos del proceso de importación se han incrementado.

1.7. Objetivos de la investigación

1.7.1. Objetivo general

- Evaluar el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple para determinar su caracterización física y reológica.

1.7.2. Objetivos específicos

- Determinar el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple a fin de determinar caracterización física.
- Determinar el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple a fin de identificar su caracterización reológica.
- Evaluar las características físicas y reológicas entre el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple y el ligante asfáltico convencional a fin de identificar su capacidad de mejora.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Marco histórico

Para la elaboración de la siguiente tesis se realizó la recopilación del siguiente marco histórico.

Tabla 1.

Marco histórico

Autor /Año	Objetivo	Resultado	Aporte	Metodología
Kroto 1985	Creación de tecnología con carbono	Creación de Buckiesferas	Buckiesferas de carbono	Artículo científico
Irijima 1991	Creación de fibras de carbono	Creación de nanotubos de carbono de pared múltiple	Nanotubos de carbono de pared múltiple	Artículo científico
Irijima 1993	Creación de láminas de nanofibras de carbono	Creación de nanotubos de carbono con pared simple	Nanotubos de carbono de pared simple	Artículo científico
M. Faramarzi M. Arabani, A. K. Haghi, V.Mottaghitalab 2015	Preparación y caracterización de nanotubos de carbono	Preparación y caracterización de nanotubos de carbono	Caracterización de ductilidad, penetración y viscosidad	Artículo Técnico
X.Zhang, X. Song, S.Wu,Q.Liu, Z. Fan 2017	Evaluación termodinámica de las propiedades del grafeno con	Identificación de las propiedades termodinámicas	Aumento de conductividad térmica del grafeno con los nanotubos de carbono	Artículo científico

	nanotubos de carbono			
M.Faizan, N. Ahmad, M.Ali, M.Hafeez,J. Rafi,S.Bilal, W.Haroon 2018	Distribución Homogénea y mejora de rendimiento del aglutinante asfáltico	Mejoramiento del rendimiento, dureza ductilidad y penetración del asfalto	Mejoramiento del rendimiento del hormigón asfáltico	Artículo científico

Nota: En la tabla se muestra el marco histórico que fue recolectado, se indica el objetivo principal de cada investigación, el resultado, su aporte y la metodología aplicada.

2.2. Investigaciones relacionadas con el tema

Para la elaboración de la tesis se tomó como fuentes trabajos de investigación, trabajos bibliográficos nacionales e internaciones, publicaciones científicas y artículos relacionados con el tema desarrollado.

2.2.1. Investigaciones internacionales

Pérez, V. (2016) Mezclas asfálticas con betunes modificados con nanotubos de carbono, diseño y propiedades.

Dicha investigación desarrolló las propiedades reológicas de betunes modificados con nanotubos de carbono. Se desarrolla comparaciones de mezclas asfálticas convencionales y mezclas modificadas con nanotubos de carbono.

Se desarrolló ensayos con diferentes porcentajes de betunes de carbono modificado con nanotubos de carbono. Luego de realizarse dichos ensayos se llegó a la conclusión de:

- Las mezclas convencionales con dichos betunes presentan problemas de sensibilidad al agua debido a la elevada superficie específica de los nanotubos.
- Los betunes modificados presentan un cambio en su comportamiento eléctrico.
- Los betunes modificados presentan buen comportamiento en mezclas asfálticas con elevados contenidos de ligantes.

Luna, M. (2017) *Asfalto modificado con nanosustancias*. Universidad nacional Autónoma de México. Facultad de ingeniería. Ciudad de México

La investigación desarrolla mezclas asfálticas por el medio de adición, de porcentajes diferentes de nanosustancias que se encuentran en el mercado de México.

Enfocándose en tratamiento de mezclas para mejorar sus propiedades técnicas, mecánicas y resistentes para mejorar la vida útil de las carreteras. Al realizar los ensayos se llegó a la conclusión de:

- Los nanomateriales contribuyen a la mejora de las propiedades del asfalto.
- Las mezclas asfálticas modificadas generan una mejor rehabilitación, conservación y mantenimiento de las vías.
- A largo plazo genera una reducción de costo en mantenimientos.

Casanova, L. (2018) *Empleo de mezclas asfálticas modificadas con nanotecnología para el mejoramiento de la estructura de pavimento flexible en la construcción de los terceros carriles de la vía Bucaramanga - Cuestaboba*. Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Ingeniería. Especialización de Ingeniería de Pavimentos. Colombia

El siguiente proyecto se desarrolló las estructuras de pavimentos asfálticos en los tramos de los terceros carriles de la vía Bucaramanga – Cuestaboba donde se utilizó asfalto modificado con nanotubos y nanofibras de carbono utilizando mezcla asfáltica en caliente comparando el rendimiento con la mezcla asfáltica convencional. Se concluyó lo siguiente:

- La mezcla asfáltica modificada con nanotubos presenta un incremento del módulo de elasticidad.
- Al utilizar esta mezcla, el espesor de la capa de asfalto disminuye.
- Aumenta el módulo de elasticidad de tratamientos de mecanismos de falla del pavimento.

Jiménez. A. (2012). *Mejoramiento del asfalto 60/70 y la mezcla asfáltica mdc-2 con nanotubos de carbono, obtenidos a partir de metano vía catalítica*. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería Civil. Bogotá. Colombia.

La siguiente investigación se estudió el efecto de la adición de nanotubos de carbono en la resistencia ante el ahuellamiento y fatiga del asfalto 60/70 y de la mezcla asfáltica MDC-2 como aporte a la búsqueda de materiales viales mejorados. Se obtuvo las siguientes conclusiones:

- Se determinó que los nanotubos de carbono son de alto grado de grafitización, así como cierta porción de carbono amorfo.
- La caracterización química de los asfaltos sin modificar el peso de nanotubos de carbono indicó durante el proceso que no se genera envejecimiento por oxidación del asfalto.

- El empleo de nanotubos de carbono general menor susceptibilidad a deformaciones permanentes, a bajas temperaturas presenta comportamientos diferentes.
- La adición de nanotubos de carbono en un 2% genera un aumento en todas las magnitudes de los módulos dinámicos y su porcentaje de incremento es mayor a temperaturas elevadas lo que contribuye con la estabilidad de la mezcla.

Quintero. R. (2014). *Asfalto modificado con nanocomposito de sbs/mmwcnt y el procedimiento para su obtención*. Corporación para la investigación y desarrollo de asfaltos en el sector transporte e industrial. Santander. Colombia.

En la siguiente investigación se realizó la modificación de asfalto con polímeros, el cual tiene la finalidad de retardar el envejecimiento, la deformabilidad y la susceptibilidad térmica, así también para mejorar la resistencia mecánica a las solicitudes de tráfico. Se obtuvo lo siguiente resultados:

- El porcentaje de pérdida de masa por envejecimiento RTFOT disminuyó en la mezcla modificada con nanotubos de carbono.
- La adición de 5 % de nanotubos de carbono en la mezcla asfáltica permite obtener la mejor mezcla.
- El corte de las láminas de nanocompuesto se realizará de 0.2 a 4 cm.
- Los nanotubos de carbono en una mezcla asfáltica mejoran significativamente las propiedades mecánicas.

Andino. C. (2016). *Mezclas bituminosas modificadas por adición de nanopartículas*. Universidad de las Fuerzas Armadas. Sangolquí. Ecuador.

En la investigación se realizó el análisis de las características y propiedades mecánicas de mezclas bituminosas modificadas con nanopartículas. Determinando las propiedades reológicas y físicas del ligante asfáltico AC-20, realizando los ensayos de índice de penetración, densidad, ductibilidad y punto de inflamación. Se concluyó:

- Se observó que el punto de ablandamiento más alto ocurre en el asfalto modificado.
- Los índices de penetración para los asfaltos son entre -0,11, 0,90 y 1,07.
- Los asfaltos modificados presentan una disminución de la densidad de un pequeño porcentaje lo que indica que es más ligero.
- Se observa que existe mayor ductilidad en el asfalto modificado en un 6.7%, lo que incide en una menor probabilidad de que se produzca microfisuración térmica a bajas temperaturas de servicio.

Rubio. M. (2017). *Desempeño mecánico de mezcla HMA-2 modificada con nanotubos de carbono y nanofibras con proceso y sin proceso de purificación*. México.

En la investigación se evaluó el desempeño de la mezcla asfáltica tipo II, HMA-2 modificada con nanofibras y nanotubos de carbono, se analizaron 3 diferentes muestras modificadas, para evaluar el comportamiento en el laboratorio. Se concluyó:

- La mezcla modificada con nanotubos de carbono mostro el incremento de 34% de las propiedades mecánicas en comparación a la mezcla no modificada.
- Incremento la elasticidad y la viscosidad de la mezcla asfáltica.
- Al incrementar la elasticidad la fatiga del asfalto disminuyo significativamente.
- Mejoro la durabilidad y mejoró el envejecimiento de la mezcla asfáltica modificada con NTC.

Llanos. D. (2017). *Los nanotubos de carbono como nueva alternativa de aplicación para mejorar la resistencia a la fatiga o reducir fisuramiento en diseño de pavimentos rígidos con concreto hidráulico*. Universidad técnica particular de Loja. Loja. Ecuador.

En la siguiente investigación se desarrolla la incorporación de nuevos materiales en el diseño de hormigones para pavimentos rígidos, empleando MWNTC, que serán vaciados a la pasta cementante mediante dispersión ultrasónica, y se analizó si las propiedades mecánicas del asfalto mejoran. Se obtiene las siguientes conclusiones:

- Las propiedades de los nanotubos de carbono modificaron la estructura del hormigón convirtiéndolo en un material conductivo.
- Las propiedades mecánicas de los NTCPM modificaron la estructura del hormigón convirtiéndolo en un material más resistente a la flexión por tracción incrementando su módulo de roturas hasta en un 46,70% para hormigones modificados.
- El módulo de elasticidad y la relación de poisson no se ven alterados por la presencia de los nanotubos de carbono en la estructura del hormigón.

- Los nanotubos de carbono en la pasta cementante otorgaron propiedades eléctricas capaces de medir la conductividad eléctrica inicial del hormigón en estado dinámico bajo a una aplicación de carga.

Villacorta.F (2014). *Nano materiales en el desempeño del Asfalto*. Laboratorio Nacional de modelos estructurales y materiales. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

En el siguiente artículo científico se evalúa el desempeño de los ligantes asfálticos que son modificados con nano materiales, evaluando el daño por humedad, el agrietamiento térmico, la adhesividad y la deformación permanente del asfalto. También se evaluó el envejecimiento y oxidación de este. Se obtuvo las siguientes conclusiones:

- El aumento de las propiedades físico-mecánicas de los asfaltos con nanotubos de carbono se evidencian notablemente.
- Tanto el nivel mecánico como químico tiene un cambio del comportamiento de los nanomateriales.
- Al realizar el aumento de la concentración de los NTC, la resistencia a la deformación permanente mejora sin embargo esto puede afectar a la resistencia a la fatiga negativamente.
- Se evidenció que al utilizar el 3% de nanosilice la resistencia a la fatiga y a la deformación permanente mejoran.

Camargo A. y Manchego M. (2017). *Análisis experimental del comportamiento en el estado fresco y endurecido de una matriz cementicia con nanocompuestos de carbono*. Pontificia Universidad Javeriana. Colombia.

En la siguiente investigación se realizó el análisis del efecto que proporciona la adición de nanocompuestos de carbono a una matriz cementicia tipo mortero, teniendo como objetivo la determinación de la influencia de esta adición a las propiedades en estado fresco, fluidez y variación de temperaturas. Se obtuvo las siguientes conclusiones:

- Las mezclas cementicias adicionadas con nanocompuestos de carbono se ven afectadas en la fluidez.
- La Adicción de nanocompuestos de carbono disminuye la ganancia de temperatura durante la hidratación de la matriz cementicia para cada una de las concentraciones.
- Con la adicción de nanocompuestos de carbono se obtienen ganancias de resistencias finales a la flexión.
- Las ganancias en resistencia a la compresión aumentan en un 7,3 %, siendo la adicción de NTC que genera alta resistencia a la compresión.

2.2.2. Investigaciones nacionales

Candia D. y Ccorahua V. (2019). Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica modificada con nanotubos de carbono con respecto a una mezcla asfáltica convencional, según el método. Marshall. Universidad Andina del Cuzco - Perú.

En la siguiente investigación se realiza un análisis comparativo de la mezcla convencional y la mezcla con nanotubos de carbono, analizando la estabilidad Marshall, el Flujo y el Porcentaje de vacíos de cada mezcla, al realizar la comparación de las mezclas se obtuvo los siguientes resultados:

- La mezcla modificada con NTC presenta un incremento de estabilidad, disminuyen los porcentajes de vacíos y valores de flujo.
- La estabilidad Marshall va aumentando según la proporción de los nanotubos de carbono adicionados.
- Se presenta una menor deformación y disminución del flujo de la mezcla modificada con nanotubos de carbono.
- El porcentaje de vacíos de la mezcla modificada disminuye significativamente.

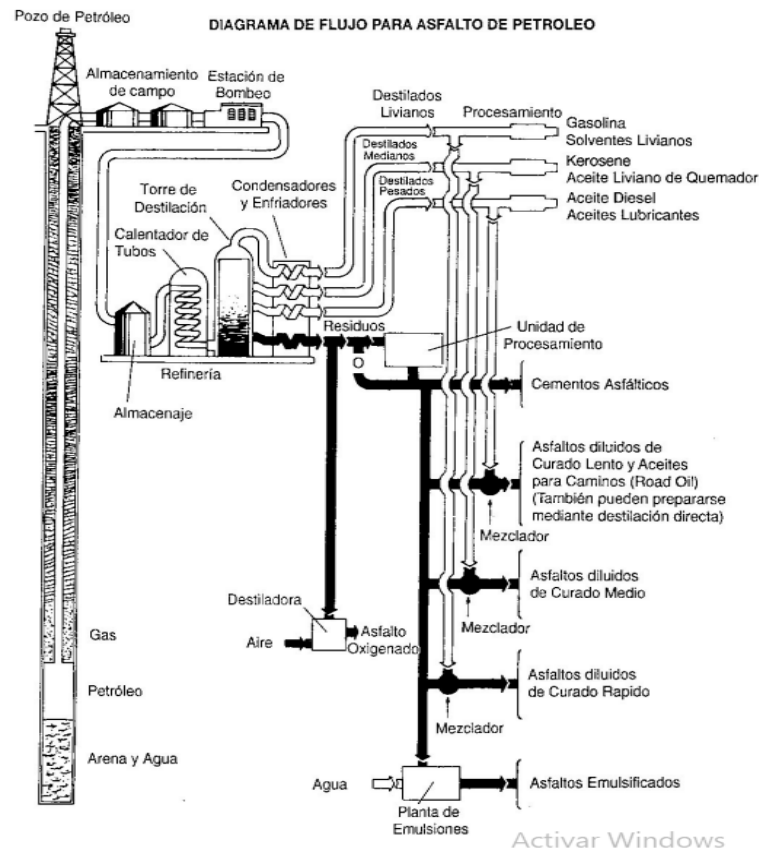
2.3. Estructura científica y teórica que sustenta el estudio

2.3.1 *Ligante asfáltico*

2.3.1.1. Definición

Según Bernucci, B., Motta, G., Ceratti, P., Soares, B., (2008) *Pavimentación Asfáltica*. Los ligantes asfálticos son bitúmenes que provienen de la destilación del petróleo, que tienen la propiedad de ser un adhesivo termiviscoplastico impermeable al agua. Debido al contacto del aire y el agua los ligantes asfálticos sufren de un proceso de envejecimiento por oxidación lenta.

Figura 3
Proceso de destilación del petróleo



Nota: En la figura se presenta el proceso que se realiza para la destilación del crudo, se presenta el proceso desde el pozo al petróleo hasta llegar al producto final que son los asfaltos. De Asphalt Institute MS -22

Los investigadores han realizado estudios en el campo de los ligantes asfálticos mediante la incorporación de polímeros, teniendo como resultado una mezcla de mejor calidad, los polímeros que han sido incorporados en algunos casos mejoran los comportamientos elásticos, incrementan la resistencia a la deformación permanente, y disminuyen el agrietamiento por fatiga asimismo mejoran la adhesión entre los agregados y el asfalto. Los polímeros más estudiados en los últimos años son SBR (caucho de estireno- butadieno), SBS (copolímero de estireno- butadieno), EVA (copolímero de etileno-acetato vinilo).

2.3.1.2. Componentes del ligante asfáltico

Los ligantes asfálticos tienen una composición química muy compleja, los cuales pueden cambiar según el país de origen, su composición es la siguiente: carbono del 82% a 88%; hidrógeno de 8% a 11%, azufre de 0% a 6%, oxígeno de 0 a 1.5% y nitrógeno de 0% a 1%. Las siguientes composiciones pueden variar según el proceso de refinamiento. Leite. (1999); Shell. (2003).

Tabla 2.
Composición del asfalto

Ligantes asfálticos	Composición
Carbono	De 88% a 82 %
Hidrógeno	De 8% a 11%
Azufre	De 0% a 6%
Oxígeno	De 0% a 0.15%
Nitrógeno	De 0% a 1%

Nota: En la tabla se presenta los porcentajes diversos materiales que forman parte de los ligantes asfálticos. Adaptado de Leite (1999) & Shell (2003).

2.3.1.3. Tipos de ligantes asfálticos

De acuerdo con la procedencia de cada ligante son:

- *Ligantes asfálticos naturales*

Según Miro Recasens R. (1994) *Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo de cántabro*. “Los ligantes naturales son formados por la naturaleza los cuales no son obtenidos por destilación del petróleo, estos se forman a partir de la migración de pétreos naturales a través de rocas o fisuras.

El asfalto natural de mayor pureza se encuentra en Estados Unidos conocido como “Gilsonita”, esta puede tener de 90 a 95% de pureza de betún con una penetración representativa de 0 a 3 unidades.

El segundo depósito más representativo es el asfalto “Trinidad” en Venezuela, con una superficie de 0,5Km² teniendo una pureza de 54% combinado con agua mineral, al realizar la purificación esta se convierte en el material llamado “Trinidad Epuré”, este material es uno de los más aceptados en todo el mundo.

- ***Ligantes asfálticos manufacturados***

Betunes asfálticos o Betún de penetración

Según Miro Recasens R., (1994) *Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo cántabro*. Los betunes asfálticos son mezclas modificadas de hidrocarburos, que son obtenidos a través del proceso de oxidación, se produce un calentamiento de 200 °C. Estos betunes oxidados no son recomendados para el uso en pavimentos porque son poco dúctiles, pero si son recomendados para el uso de capas impermeabilizantes ya que presentan una gran resistencia a los agentes atmosféricos.

- ***Betunes fluidificados***

Según Miro Recasens R., (1994) *Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo cántabro*. Los betunes fluidificados son betunes que son mezclados con disolventes volátiles hidrocarbonatados para poder evitar la precipitación

de los asfáltenos. Los disolventes utilizados tienen la función de disminuir la viscosidad para poder favorecer la puesta en obra que luego se elimina en el proceso de curado.

2.3.1.4. Ligantes asfálticos con aditivos

Según Miro Recasens R., (1994) *Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo cántabro*. Debido a la búsqueda constante de mejorar las propiedades de los ligantes asfálticos como la mejora de la resistencia, mejor susceptibilidad térmica, resistencia al envejecimiento y mayor ductibilidad, se busca la incorporación de aditivos que ayuden al ligante a mejorar las características reológicas que presentan y térmicas. Son conocidos ligantes modificados a los cuales el modificador se añade al ligante o en la planta de fabricación de la mezcla.

2.3.1.5. Ligantes asfálticos con bitúmenes

Según Miro Recasens R., (1994) *Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo cántabro*. Los modificadores más utilizados son los polímeros elastotermoplásticos, al realizar la incorporación de los polímeros al betún produce el cambio de propiedades e interacciones como:

- Composición y estructura molecular
- Composición química y estructura
- Proporción betún y polímero

La consistencia del betún depende de la variación de la temperatura a la que es sometida, en altas temperaturas se presenta deformaciones plásticas y en bajas temperaturas se presenta el fenómeno de fragilidad. Con el aumento de los polímeros se puede mejorar el

comportamiento ante la susceptibilidad térmica. Algunos de los modificadores más utilizados son:

- Polímeros
- Caucho reciclado
- Extendedores
- Fillers
- Fibras
- Activantes
- Materiales Hidrocarbonados”

2.3.1.6. Ligantes asfálticos con nanotecnología

- *Ligantes asfálticos con nano arcillas*

Caro Spinel S. (2011). Desde los años 1950 el uso de nanoarcillas en los ligantes asfálticos y mezclas asfálticas han ido incrementando con el fin de mejorar la eficacia de las condiciones de los materiales generando una mejora en sus propiedades.

La adición de nanoarcillas se ha evidenciado que disminuyen los valores de penetración y ductibilidad de los ligantes y mezclas asfálticas, asimismo incrementa la viscosidad de esta. Obteniendo como consecuencia mayores beneficios en el comportamiento reológico teniendo mejoras notables en las propiedades del asfalto.

- *Ligantes asfálticos con nanosilice*

Se ha realizado muchos ensayos de ligantes asfálticos y mezclas asfálticas modificados con diferentes porcentajes de nanosilice evidenciando el comportamiento del nanomaterial y la influencia en las propiedades del asfalto, generando una mejora en el desempeño de ambos. Se evidencia que esta modificación genera un aumento notable en la resistencia a la

deformación permanente. Sin embargo, en algunos casos se recomienda siempre realizar un control de calidad posterior a la modificación.

2.3.1.7. Ensayos en ligante asfálticos

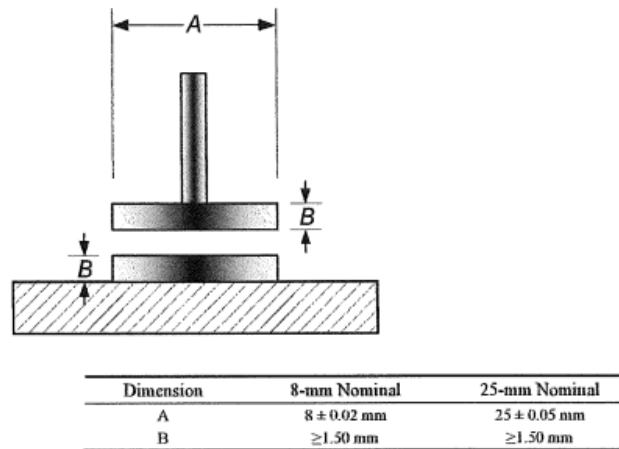
- ***AASHTO T315/ASTM D 7175 (DSR)***

American association of state highway and transportation officials. (2019). AASHTO T315. “Este ensayo se realizará para la determinación del módulo de corte dinámico y el ángulo de fase del asfalto. Se utiliza en los ligantes que tienen módulo de corte dinámico de 100 Pa a 10 lvpPa. Este ensayo está diseñado para la determinación de las propiedades viscoelásticas de los ligantes asfálticos.

Este ensayo se realiza utilizando un reómetro de corte dinámico y una geometría de prueba de placas paralelas.

Se forman especímenes de ensayo de 1mm a 2mm de espesor por 25 mm o 8mm de diámetro entre las placas metálicas que se encuentran paralelas. Para el ensayo la placa superior baja y libera frecuencias preseleccionadas y amplitudes de deformación rotacional. La tensión o deformación va directamente relacionado con el tipo de ligante asfáltico que se está ensayando.”

Figura 4
Dimensiones de placas del ensayo DSR



Nota. La siguiente figura presenta las dimensiones de las placas que ejercen la fuerza sobre la muestra al momento de realizar el ensayo DSR. De American association of state highway and transportation officials. (2019). AASHTO T315

- **AASHTO TP70 o Multiple stress creep recovery (MSCR)**

Elizondo F., Salazar J. Villegas E. (2009), “Este ensayo está basado en la norma internacional AASHTO TP70, que son la medición de las propiedades de un asfalto que fue envejecido por el horno RTFO, en el cual se aplica una fuerza de 100Pa a 3200Pa. El resultado de este ensayo nos da a conocer la respuesta elástica del ligante asfáltico modificado a un esfuerzo cortante y recuperación.”

- **ASTM D5 o Penetración a 25° C**

American society for testing and materials. (2005) ASTM D5. “Este ensayo de materiales bituminosos, semisólidos y sólidos permite la determinación de la penetración.

La penetración se mide a través de un penetrómetro en el cual se aplica una aguja estándar a la muestra. Este ensayo no da la medida de la consistencia de la mezcla. Los valores más altos indican una consistencia más suave y los más bajos una consistencia más rígida.

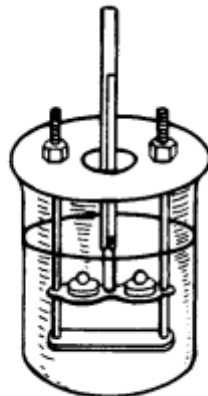
La muestra debe encontrarse fluida para poder colocarla en el molde de lo contrario se debe calentar la muestra y revolver para poder tener una temperatura uniforme y esta se encuentre fluida para colocarla en los moldes, se debe evitar incorporar burbujas en la muestra.”

- **ASTM D36 (Punto de Ablandamiento)**

American society for testing and materials. (1995). ASTM D36. “Este método se realiza para determinar el punto de reblandecimiento del betún en el rango de 30 a 157°C, donde se utiliza el aparato de anillo y la bola sumergida en agua destilada, glicerina o etilenglicol.”

Figura 5

Ensayo de punto de ablandamiento



(d) Two-Ring Assembly

Nota. La figura muestra el aparato anillo y bola que es utilizado en el ensayo de punto de ablandamiento. De American society for testing and materials. (1995). ASTM D36

- ***ASTM D113 (Ductibilidad)***

American society for testing and materials. (2008). ASTM D113. “Este ensayo determina la ductibilidad de un material bituminoso utilizando muestras donde se alargan y se mide la distancia antes de romperse en dos extremos, se separan a una velocidad y a una temperatura específica.”

- ***ASTM D4402/T316 (Viscosidad)***

American society for testing and material. (2013). ASTM D4402. “Este método de prueba consiste en realizar la medición de la viscosidad aparente del asfalto de 38 a 260°C utilizando un viscosímetro rotacional y control de temperatura.”

- ***AASHTO T240/ASTM D2872 (RTFOT)***

American society for testing and material (2017). ASTM D2872. Horno de laminado de película delgada RTFOT. “Esta prueba se utiliza para medir el efecto del calor y el aire en una película de ligante asfáltico en movimiento. El efecto de este tratamiento se determina a partir de la toma del peso antes y después del ensayo.”

- ***AASHTO R28/ASTM D6521 (PAV)***

American association of state highway and transportation officials (2016). AASHTO R28. “Recipiente de envejecimiento a presión PAV. Este ensayo cubre el envejecimiento acelerado o también llamado oxidación de los ligantes asfálticos por medio de aire a presión y temperatura elevada. Este simula el envejecimiento del servicio de los ligantes. Esta prueba tiene como objetivo proporcionar una evaluación de la resistencia relativa de diferentes ligantes asfálticos al envejecimiento oxidativo a temperaturas seleccionadas.”

- **ASTM D 6648(BBR)**

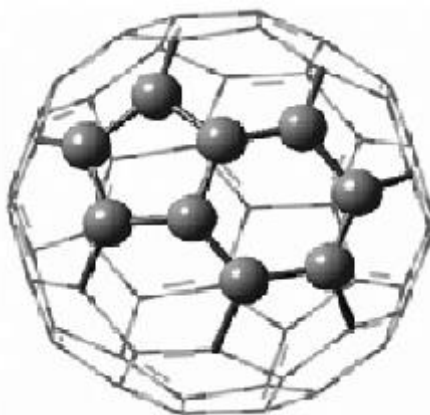
American society for testing and material (2016). ASTM D 6648. “Método de prueba estándar para determinar la rigidez de fluencia a la flexión del aglutinante de asfalto usando el reómetro de haz de flexión. Este ensayo determina la rigidez o fluencia a la flexión y el cumplimiento de los valores de los ligantes asfálticos. Esta rigidez tiene valores de flexión en un rango de 20Mpa a 1Mpa, se puede realizar con ligantes envejecidos.”

2.3.2 *Nanotubos de carbono*

2.3.2.1. **Origen de los nanotubos de carbono**

Según, Balandrán-Quintana, René R, Romero-Villegas, Gabriel Iván, Mendoza-Wilson, Ana M, & Sotelo-Mundo, Rogerio R. (2008). Nanotubos de carbono y bionanotecnología. *Interciencia*, 33(5), 331-336. Gracias a la investigación de la formación de moléculas de cadenas de carbono en el espacio, se tuvo como resultado Buckiesferas, las cuales son esferas con medidas nanométricas que por defecto tienen una estructura estable.

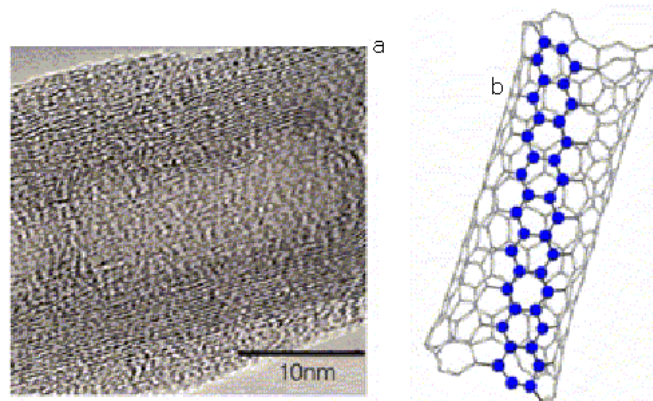
Figura 6
Buckiesferas



Nota. En la figura se muestra la distribución molecular pertenecientes a las Buckiesferas. De Balandrán-Quintana, René R, Romero-Villegas, Gabriel Iván, Mendoza-Wilson, Ana M, & Sotelo-Mundo, Rogerio R. (2008)

En 1991 Iijima descubrió tubos pequeños de medidas nanométricas, el cual fue la primera aparición de los Nanotubos de Carbono, a continuación, podemos observar en la figura la estructura de los Nanotubos de Carbono de pared múltiple, seguidamente en 1993 se procede al descubrimiento de los Nanotubos de Carbono de pared simple.

Figura 7
Nanotubos de carbono



Nota. En la figura se muestran los nanotubos de carbono, en la parte a se observa los nanotubos de carbono en una escala nanométrica y en la parte b se tiene la estructura hexagonal de los nanotubos. De Iijima (1993)

Según Collins y Avouris, 2000; Baughman ,2002, los nanotubos de carbono se caracterizan por presentar propiedades térmicas, óptimas, mecánicas, eléctricas y electrónicas.

2.3.2.2. Definición

Los nanotubos de carbono se presentan de dos maneras, la primera son nanotubos de pared simple (SWCNT) y la segunda de pared múltiple (MWCNT), el diámetro varía según el tipo de nanotubo. Los nanotubos se caracterizan por ser materiales química y térmicamente estables, tiene una elasticidad elevada a comparación de otros nanomateriales, y cuentan con una baja densidad.

2.3.2.3. Obtención de nanotubos de carbono

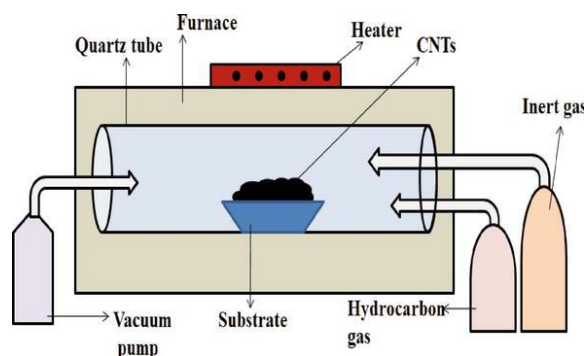
Según Kumar A., Thangavelu K. y Dhananjeyan V. (2020) Se encuentran diversos métodos de extracción de nanotubos, pero los más usados son:

- *Método de deposición de vapor químico*

Este método es una técnica en la cual los reactivos vaporizados reaccionan químicamente y forman el nanomaterial que se deposita. Se pueden utilizar gases como acetileno, etileno, metano, etc. Para la producción de nanotubos de carbono se utilizan catalizadores. La temperatura del horno es de 500 a 900 °C.

Figura 8

Método de deposición de vapor químico.



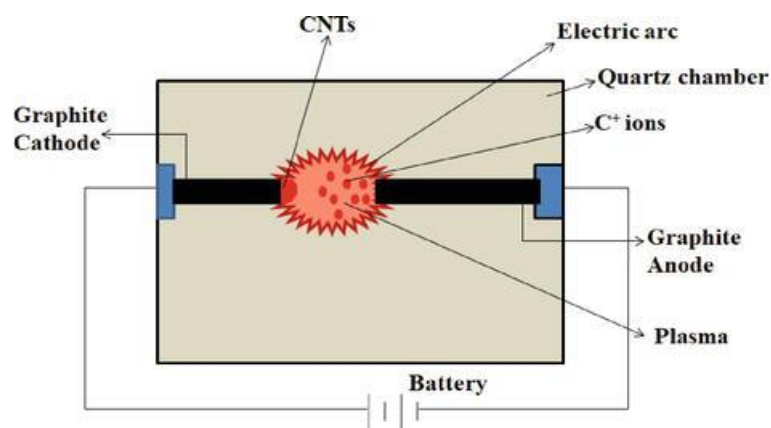
Nota. En la figura se presenta el proceso que se realiza para la obtención de los nanotubos de carbono mediante el método de deposición de vapor químico. Recuperado de Kumar A., Thangavelu K. y Dhananjeyan V. (2020). *Nanotubos de carbono, síntesis, propiedades y aplicaciones.*

- ***Método de descarga de arco eléctrico***

Para el siguiente método se introduce un potencial de 20 a 25 V a través de los electrodos de grafito que tiene una distancia de 1 mm y con presión de 500 torr de gas de helio, dentro de una cámara de cuarzo. Los electrodos se golpean y como consecuencia se obtiene un arco eléctrico, la cual se transforma en energía esta se ioniza los átomos de carbono de ánodo de grafito produciendo iones, estos iones de carbono cargados positivamente se mueven, se reducen y se depositan en el cátodo formando los nanotubos de carbono.

Figura 9

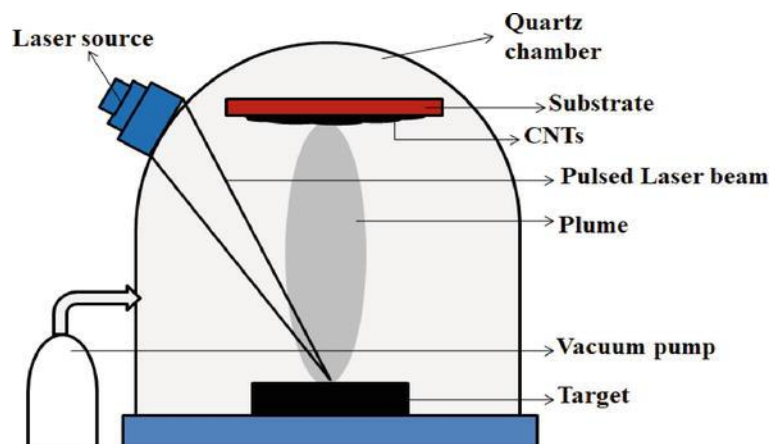
Método de descarga de arco eléctrico



Nota. La figura representa el proceso que se realiza para la obtención de los nanotubos de carbono mediante el método de descarga de arco eléctrico. Recuperado de Kumar A., Thangavelu K. y Dhananjeyan V. (2020). *Nanotubos de carbono, síntesis, propiedades y aplicaciones.*

- ***Método de deposición por láser pulsado***

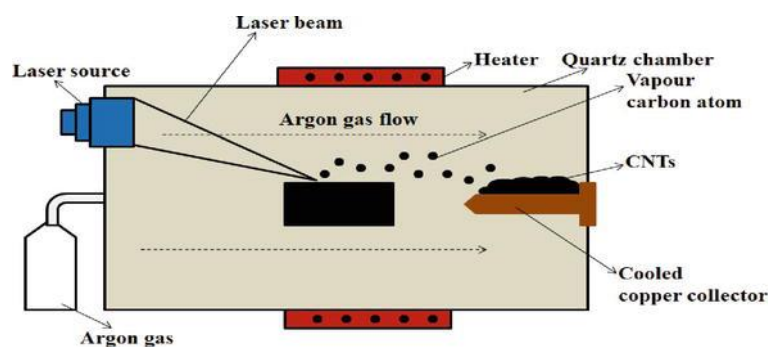
Este método se realiza a través de una técnica de deposición de película delgada en el que el carbono se vaporiza mediante los rayos láser pulsado y los átomos se depositan en los sustratos. El rayo láser golpea los átomos, estos se vaporizan y forman penachos, los cuales se depositan y crecen como nanotubos de carbono.

Figura 10*Método de deposición por láser pulsado*

Nota. La figura representa el proceso que se realiza para la obtención de los nanotubos de carbono mediante el método de deposición por láser pulsado. Recuperado de Kumar A., Thangavelu K. y Dhananjeyan V. (2020). *Nanotubos de carbono, síntesis, propiedades y aplicaciones.*

- **Método de ablación láser**

Es el método de deposición física de vapor por el cual el grafito se vaporiza mediante la inyección de láser. Se coloca el grafito en el centro de la cámara de cuarzo, se llena de gas argón y se calibra a 1200 °C. Los átomos vaporizados de carbono son barridos hacia el cobre y enfriados por el flujo de gas argón, seguidamente estos átomos se almacenan en el colector de cobre y crecen como nanotubos de carbono, para la obtención de nanotubos de pared múltiple se utilizan nanopartículas catalizadoras de Fe, Co, Ni.

Figura 11*Método de ablación láser*

Nota. La figura representa el proceso de obtención de los nanotubos de carbono mediante el método de ablación láser. Recuperado de Kumar A., Thangavelu K. y Dhananjeyan V. (2020). *Nanotubos de carbono, síntesis, propiedades y aplicaciones.*

2.3.2.4. Propiedades

- *Propiedades elásticas*

Según Kumar A., Thangavelu K. y Dhananjeyan V. (2020). Los nanotubos se caracterizan por la elasticidad que presentan en sus diferentes formaciones como nanotubos de pared simple y múltiples. Al realizar una exposición de este material a fuerzas máximas y altas presiones de compresión de la dirección axial los nanotubos tienen la característica de ser moldeables al doblarse y torcerse sin alterarse, por lo cual no genera ningún daño a los nanotubos de carbono. Es decir, este material conserva su estructura geométrica original, pero al ser sometido a fuerzas de presión este presenta un límite en el cual puede formar una deformación temporal del nanotubo.

Esta propiedad es identificada mediante el módulo de elasticidad o también módulo elástico, esta se puede analizar mediante la transmisión eléctrica microscopía.

Los nanotubos de carbono asimismo son excelentes conductores térmicos por lo que pueden soportar la presión atmosférica en los rangos de 2900 °C y 800 °C en condiciones normales.

- *Propiedades ópticas*

Los nanotubos tienen propiedades de asimilación, fotoluminiscencia y espectroscopia que permiten una representación energética y solida lo cual puede generar una emisión de luz ultravioleta y la absorción o emisión de energía.

2.3.2.5. Características

Según Collins y Avouris, 2000, las propiedades generales de los nanotubos son las siguientes:

Tabla 3

Características de los NTC

Propiedades	Nanotubos de Carbono
Diámetro	0.10 a 0.90 nm
Densidad	1.33 a 1.40 g. 10^{-3}
Fuerza de tensión	45x10 ¹² Pa
Estabilidad térmica	Estable a $\geq 2800^{\circ}\text{C}$ en vacío $\geq 750^{\circ}\text{C}$ en aire
Costo	1gr NTC = 0.15 USD

Nota. La tabla nos muestra las características principales de los nanotubos de carbono. De Collins y Avouris, 2000.

2.3.2.6. Aplicaciones

- *Campo Biomédico*

En los últimos años se ha realizado diferentes investigaciones de los nanotubos de carbono y se presentan muy buenas propiedades obtenidas por este nanomaterial, se han experimentado diversos productos como nanosensores, instrumentos médicos y otros en los cuales se ha evidenciado que genera una mejoría en la resistencia de los materiales y un buen almacenamiento de energía.

- *Implantes artificiales*

Debido a las extrañas propiedades físicas y químicas que presentan estos nanocompuestos se han realizado implantes con la adición de nanotubos de carbono lo cual generaron un buen desarrollo en pacientes que rechazaban los implantes. Los implantes más comunes en los cuales se han utilizado esta tecnología son de articulaciones artificiales o sustitutos óseos, la cual ha generado una máxima resistencia una capacidad fácil de moldear y una buena adhesión celular.

- *Construcción*

Otro campo donde se ha realiza el uso constante de los nanotubos es en la ciencia de los materiales, en la cual se ha podido realizar ensayos con los ligantes asfálticos y mezclas asfálticas observando un gran cambio de las propiedades mecánicas de la mezcla, mejorando el desempeño, la viscosidad, la penetración; generando una mejor resistencia de los asfaltos a los cambios térmicos a que son sometidos. Así mismo, se observó que los nanotubos de carbono repelen el agua por lo cual genera una buena resistencia a la humedad.

- *Cáncer*

Se han utilizado los nanotubos para la adición a fármacos que son para generar una resistencia celular del paciente con cáncer. A añadir los nanotubos de carbono a los fármacos, este puede rastrear fácilmente los receptores específicos que causan el cáncer.

2.3.3 *Caracterización*

2.3.3.1. **Caracterización física**

La caracterización física del asfalto

Según Sierra H. & Mejía U. (2017), es de suma importancia el diseño, almacenamiento, construcción y mantenimiento de los pavimentos por lo cual las propiedades físicas del asfalto que tienen un impacto directo son:

- Penetración.
- Punto de ablandamiento
- Ductibilidad
- Punto de inflamación

2.3.3.2. **Caracterización Reología**

Según Blankenship, Adenrson, Elwarday, Hajj, King (2019). En los ligantes asfálticos el envejecimiento es uno de los factores claves que determinan la vida útil de un pavimento asfáltico por lo cual la reología es fundamental para poder identificar las propiedades del ligante frente a cambios de temperatura y presiones a largo plazo . La caracterización reológica de un asfalto tiene las siguientes propiedades.

- Recuperación elástica
- Recuperación a la flexión
- Grado de desempeño

2.4. Definición de términos básicos

- Ligantes asfálticos

Es un material de color oscuro de consistencia viscosa que se encuentra en la naturaleza o por refinación de petróleos, empleados mayormente en pavimentación.

- Caracterización física

La caracterización física tiene la finalidad de identificar el ligante asfáltico para verificar que este cumpla con la normativa que corresponde y la calidad de este, se puede hallar a través de diversos ensayos de laboratorio como el ensayo de penetración, ensayo de punto de ablandamiento, ensayo de viscosidad, ensayo de ductibilidad.

- Nanotubos de carbono

Son alótopos de carbono que son compuestos obtenidos del grafito o fullerenos obtenidos a través del laboratorio por error, se presentan en capas hexagonales de manera tubular, estos nanotubos se pueden presentar en de paredes múltiple y de paredes simples.

- Reología

Es la capacidad del ligante a soportar diversos volúmenes de tráfico y se evalúa a diferentes temperaturas.

2.5. Hipótesis

2.5.1. Hipótesis general

- Evaluando el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple se determina la mejora de su caracterización física y reológica.

2.5.2. Hipótesis específicas

- Evaluando el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple se determina la mejora de su caracterización física.
- Determinando el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple se identifica la mejora de su caracterización reológica.
- Evaluando las características físicas y reológicas entre el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple y el ligante asfáltico convencional se identifica la capacidad de mejora.

2.6. Variables

Se considera para la investigación las siguientes variables, ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple y resistencia ante mecanismos de daño.

2.6.1. Definición conceptual de la variable

- Variable independiente:

Ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple, es una variable cuantitativa continua.

- Variable dependiente:

Caracterización física y reológica, es una variable dependiente cuantitativa continua.

2.6.2. Operacionalización de las variables

La operacionalización de las variables se presenta en la Tabla 4.

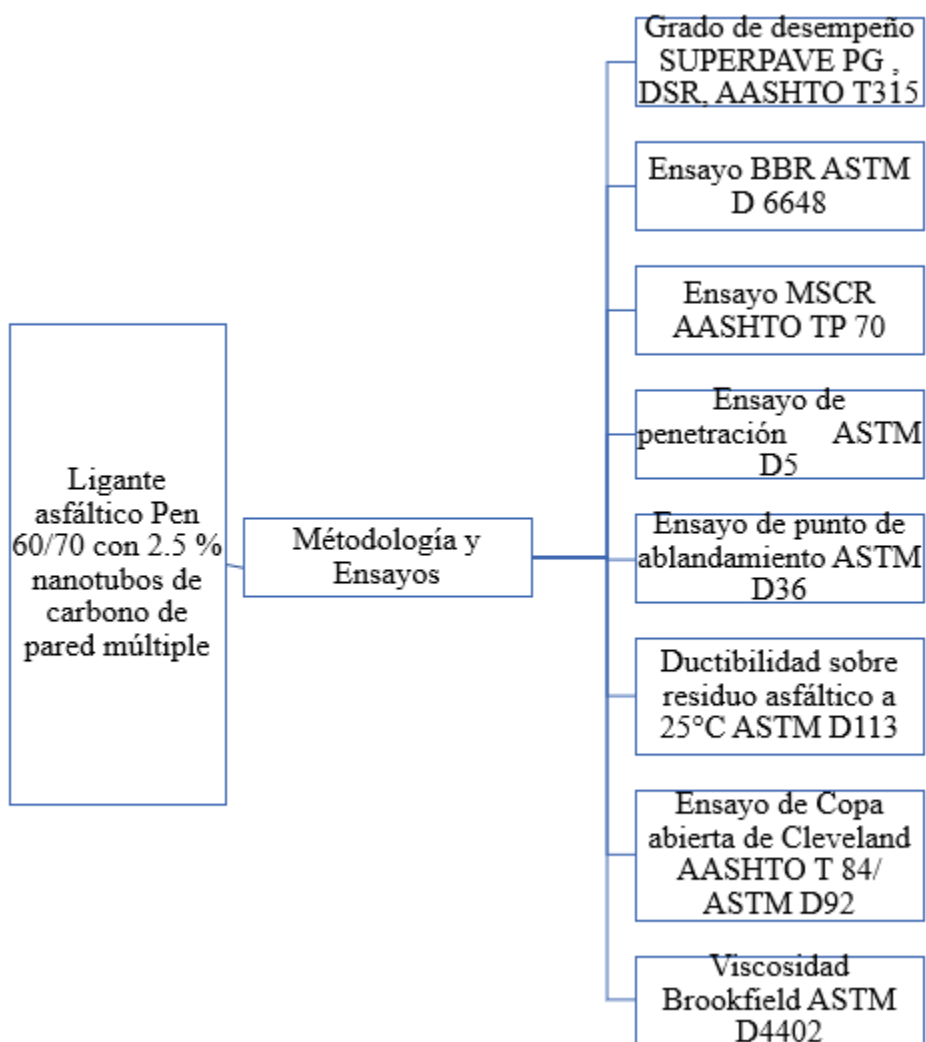
Tabla 4
Operacionalización de variable

Variables	Definición	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos	Herramientas	
<u>Variable independiente</u> Ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple	Asfalto Pen 60/70 con nanotubos de carbono	Tipo de aditivo	% de nanotubos de carbono de pared múltiple (MWNTC)	Laboratorio	Investigaciones nacionales e internacionales	
<u>Variable dependiente</u> Caracterización física y reológica	Propiedades relacionadas al desempeño de un ligante asfáltico	Caracterización física	Resistencia a la rotura	Ensayo de penetración	ASTM D-5	
			Temperatura de Fluidez	Ensayo de punto de ablandamiento	ASTM D-36	
			Ductibilidad	Ensayo de ductibilidad	ASTM D-113	
		Caracterización reológica		Punto de inflamación	Ensayo de copa abierta de Cleveland	ASTM D-92/ AASHTO T48
				Viscosidad	Ensayo viscosidad dinámica	AASHTO T316/ ASTM D4402
				Recuperación elástica	Ensayo MSCR	ASTM D 7405
				Resistencia a la flexión	Ensayo BBR	ASTM D 6648
		Grado de desempeño	Ensayo DSR	AASHTO T315/ ASTM D7175		

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO

La metodología empleada consiste en la evaluación del ligante asfáltico Pen 60/70 con 2.5% de nanotubos de carbono utilizando las normativas ASTM y AASHTO.

Figura 12
Metodología y ensayos



Nota. En la figura se presenta la metodología y ensayos que se utilizaron en la investigación.

3.1. Tipo, método y diseño de la investigación

3.1.1. Método de investigación

El método de la investigación es deductivo, ya que se utilizó premisas para poder validar las hipótesis que se presentan en la investigación.

3.1.2. Enfoque de la investigación

El enfoque de la investigación es mixto, ya que se van a utilizar ensayos de laboratorio y estadísticas, que son cuantitativos para poder obtener datos cualitativos del ligante y realizar la profundización de los resultados obtenidos en la investigación.

3.1.3. Orientación de la investigación

La orientación de la investigación es aplicada por que se busca dar solución a un problema que afecta a la población que se ve afectada por el bajo rendimiento de las carreteras en el Perú.

3.1.4. Tipo de investigación

La investigación es de tipo descriptiva, ya que tiene la finalidad de describir el comportamiento del ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple ante los mecanismos de daño evaluando los componentes principales en una realidad dada.

3.1.5. Nivel de la investigación

El nivel de la investigación es descriptivo y explicativo, porque se van a realizar 6 diferentes ensayos de laboratorio los cuales tendrán el propósito de describir el comportamiento de las muestras y seguidamente se realizará la explicación de los cambios en las características que presentan.

3.1.6. Diseño de la investigación

Experimental

Es experimental ya se van a realizar ensayos de laboratorio de unas muestras para poder determinar diferentes características y luego se medirá los efectos de las variables independientes en las dependientes.

Transversal

Es transversal porque se van a realizar los ensayos solo una vez, el objetivo principal es la obtención de datos de la muestra para poder identificar las características y el tiempo de obtención de estas es prolongado.

Prospectiva

Se realizará la verificación, inspección y revisión de los aparatos donde se realizarán los ensayos de laboratorio en los cuales se obtendrán las mediciones de las diferentes características.

3.2. Objeto de Estudio

3.2.1. Población y muestra

Ligante asfáltico con 2.5 % de nanotubos de carbono.

3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos se realiza mediante los formatos establecidos en la normativa AASTHO y ASTM, según cada ensayo que se realiza, la metodología empleada para esta recolección de internacional.

3.3.1. Instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos de recolección son los formatos de las pruebas de laboratorio brindados por la normativa internacional Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) y la normativa American Association of State Highway and Transportation Officials (ASSHTO). Los ensayos son los siguientes en la Tabla 5:

Tabla 5
Instrumentos de recolección de datos

Norma	Ensayo
AASHTO T315	Propiedades reológicas de ligantes asfálticos (DSR)
ASTM D 7405	Recuperación de Fluencia a esfuerzo múltiple (MSCR)
AASHTO T48/ASTM D92	Punto de inflamación
AASHTO T240/ASTM D2872	Efecto de calentamiento y ventilación de asfalto (RTFOT)
AASHTO R 28/ ASTM D6521	Envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos (PAV)
ASTM D 6648	Determinación rigidez del asfalto con reómetro de viga flexible (BBR)
ASTM D5	Penetración
ASTM D36	Punto de ablandamiento
ASTM D113	Ductibilidad
ASTM D4402/T316	Viscosidad de Brookfield

Nota. En la siguiente tabla se presenta los instrumentos que se utilizó para la recolección de datos.

3.3.2. Validez del instrumento

Los instrumentos se encuentran validados por las normativas ASTM y ASSHTO, que son estándares internacionales para realizar los ensayos de laboratorio y son utilizadas para elaborar las mediciones y control de calidad de los ligantes asfálticos.

3.3.3. Confiabilidad de los instrumentos

La confiabilidad de los instrumentos es garantizada por la normativa internacional que proporciona la relación de los equipos de laboratorio óptimos. Asimismo, el laboratorio donde se realizó las pruebas sigue la normativa respectiva y la correcta calibración de cada equipo respetando los estándares.

Se realizó parámetros establecidos por American Society for Testing and Materiales) que brinda normativas internacionales para la realización de los ensayos de laboratorio. Asimismo, se realizó el uso de los parámetros dados por American Association of State Highway and Transportation (AASHTO) que son estándares, especificaciones y normativas internacionales que proporcionan las guías de los ensayos de laboratorio y los formatos de la recopilación de datos.

3.4. Descripción de procedimientos de análisis

3.4.1. Modificación del ligante asfáltico Pen 60/70

El asfalto que se evaluó es un Pen 60/70 de la refinería Repsol, la cual ha sido donación del área de ventas de la refinería La Pampilla ubicada en Carretera a Ventanilla, km.25, Callao 6.

El asfalto utilizado fue del tanque identificado 333B y se solicitó la cantidad de 2 galones.

Figura 13

Ligante asfáltico



Nota. En la siguiente figura se observa los galones que fueron recogido de la refinería.

Los nanotubos de carbono son provenientes de China de la empresa HONGWU INTERNATIONAL GROUP LTD, ubicada en Chuangkegu N43 Tangdong Road East Tianhe Guangzhou GD, China, adquirida a través de la importación directa, la importación del material demoró 15 días hábiles a través de la empresa FedEx. El polvo de MWCNT valorizado en 2420.00 yuanes, se importó 250gr.



Las siguientes especificaciones de los nanotubos de pared múltiple son proporcionadas por la fábrica presentados en la Tabla 6.

Tabla 6
Especificaciones técnicas de los MWNTC

产品名称	Nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT)	
Nombre del Producto		
颜色	黑色	合格 Conforme
Color	Black	
粒径大小		
Tamaño de partícula	8-20nm	合格 Conforme
长度		
Longitud	5-20um	合格 Conforme
含量		
Pureza	>=99%	合格 Conforme
PH 值	7-8	合格 Conforme
H2O	0.4%	合格 Conforme
Cu	<0.8 ppm	合格 Conforme
Fe	<1 ppm	合格 Conforme
Mo	<0.090%	合格 Conforme
Mg	<0.92 ppm	合格 Conforme
Ni	<0.085%	合格 Conforme
电阻率		
Resistencia	948.7uΩ · m	合格 Conforme

Nota. En la siguiente tabla se presenta las especificaciones técnicas brindadas por el fabricante.

El proceso de modificación del ligante asfáltico Pen 60/70 se realizó en el laboratorio Jbo ingenieros. Se realizó el pesado de los nanotubos de carbono de pared múltiple, los cuales se utilizaron 86.5 gr por galón.

Figura 14
Pesado de MWNTC



Nota. En la figura se puede observar el pesado de los nanotubos de carbono de pared múltiple.

Luego de tener la proporción de MWNTC, que son equivalentes a 2.5% del ligante asfáltico se procede a calentar el asfalto pen 60/70 a una temperatura de 130°C se adiciona los nanotubos y con la ayuda de un dispersor se realiza la mezcla con un tiempo de 45 minutos y una velocidad de 2400 rpm, hasta que la mezcla quede homogénea.

Figura 15
Adicción de MWNTC



Nota. En la figura el proceso que se realiza al añadir los nanotubos de carbono de pared múltiple al ligante asfáltico.

Luego de obtener el ligante modificado con nanotubos de carbono de pared múltiple se procede a llevar la muestra de 1 galón a los laboratorios TDM Asfaltos que se encuentra en la Zona industrial Las Praderas de Lurín, para poder agendar el día que se va a realizar los ensayos. Luego de realizar la coordinación con el laboratorio se obtiene el siguiente horario para realizar los ensayos el cual se presenta en la tabla 7.

Tabla 7
Programación de ensayos

Ensayos de Laboratorio			
Hora	Sala Ligantes	Sala de Calidad	Día
10 am a 3pm	Medición de PG alto en DSR Envejecimiento en RTFOT	Penetración, 25 °C Punto de Ablandamiento	Lunes 7
10 am a 3 pm	Envejecimiento en PAV Medición de RTFOT en DSR Medición de MSCR	Ductibilidad 25°C, después de RTFOT Viscosidad a 135 °C	Martes 8
10 am a 3 pm	Envejecimiento en PAV Medición de PAV en DSR Ensayo de BBR Temperatura 1	Punto de Inflamación	Miércoles 9
10 am a 3pm	Ensayo de BBR Temperatura 2		Jueves 10

Nota. La tabla presenta la programación que se realizó en los laboratorios TDM.

Debido a ser un proyecto de tesis, el grupo TDM da facilidad a los tesistas de poder acceder al laboratorio y presenciar todos los ensayos que se van a realizar, fomentado la facilidad de realizar investigaciones.

3.4.2. Ensayo de Penetración

Para el ensayo de penetración ASTM D-5, se realiza la preparación del ligante asfáltico en el horno a una temperatura de 130 °C.

Figura 16

Calentamiento del ligante



Nota. En la figura se muestra el calentamiento del ligante asfáltico que se utilizará para ensayos de laboratorio.

Al tener el ligante a 130 °C, este se encuentra en un estado fluido el cual es óptimo para poder empezar a realizar los ensayos, ya que el ligante es manejable y es posible colocarlo en los moldes del ensayo. Para el ensayo se realizarán dos muestras.

Figura 17
Ligante asfáltico pen 60/70



Nota. En la figura se observa el pen 60/70 en una forma fluida y los moldes que se utilizaran en el ensayo de penetración.

Colocamos el asfalto en los moldes que se va a utilizar para el ensayo de penetración y se deja enfriar por 30 minutos a temperatura ambiente para que el asfalto se estabilice y no genere calor a través del molde.

Figura 18
Moldes para el ensayo de penetración



Nota. En la figura se presenta los moldes con el ligante asfáltico que se usaran para la prueba.

Luego de los 30 minutos de espera se procede a llevar las muestras a la máquina de agua destilada para poder colocar las muestras a una temperatura calibrada a 25 °C, que tiene un factor de corrección de 1°C y se procede a dejar las muestras por 1 hora y 30 minutos.

Figura 19
Máquina de agua



Nota. En la figura se observa cómo se introduce los moldes de asfalto a la máquina de agua.

Luego se retira los moldes para colocarlo en el penetrómetro digital, primero se calibra el agua con la maquina seguidamente se realiza 3 lecturas de penetración en tres puntos diferentes estos puntos tienen que estar triangularmente y separados por 1 centímetro como mínimo. Se evaluaron dos moldes y se obtuvieron 6 lecturas.

Figura 20
Calibración del penetrómetro



Nota. En la figura se observa la calibración del penetrómetro digital

Se obtuvo los siguientes datos presentados en la tabla 8:

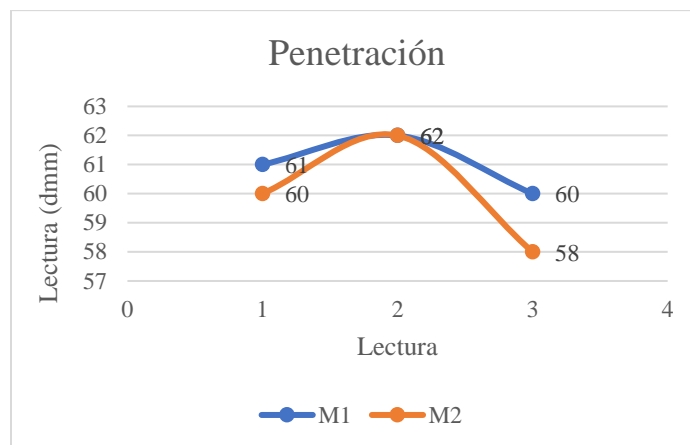
Tabla 8
Datos de penetración

Ligante asfáltico con 2.5% MWNTC				
Molde/Lectura	L1	L2	L3	Promedio
M1	61	62	60	61
M2	60	62	58	60

Nota. En la siguiente tabla se presentan los resultados del ensayo de penetración de los dos moldes

Utilizando los siguientes datos podemos realizar la siguiente gráfica para poder analizar la variación de la penetración en las muestras.

Figura 21
Lectura de ensayo de penetración



Nota. En la figura se observa la lectura de la penetración de las dos muestras que fueron evaluadas en el penetrómetro digital.

Podemos afirmar que la penetración a 25°C, 100gr,5 seg, del ligante asfáltico con 2.5% de nanotubos de carbono es de 60 dmm.

3.4.3. *Ensayo de punto de Ablandamiento*

Para realizar ensayo punto de ablandamiento ASTM D-36 primero se calienta la mezcla a 130°C en el horno, luego de obtener el ligante a la temperatura correcta se prosigue a colocarlo en los moldes para el ensayo.

Figura 22
Moldes de ensayo de ablandamiento



Nota. En la figura se observa el asfalto en los moldes que se realizara los ensayos.

Al tener los moldes con el ligante se procede a esperar 30 minutos a temperatura ambiente para poder realizar el enrase de los moldes con la ayuda de una espátula.

Figura 23

Enrasado del asfalto



Nota. En la figura se observa el momento que se realiza el enrasado.

Para el ensayo de punto de ablandamiento el agua donde se coloca la mezcla se debe encontrar a 5°C para poder comenzar el ensayo se debe tener dos pesas circulares de bronce de 3.5 kg cada una.

Figura 24

Termómetro



Nota. En la figura se observa el termómetro que se utilizó en el ensayo.

Se centra las pesas en el molde y este se coloca en el agua y se coloca sobre la base, seguidamente se prende el mechero, para este ensayo se debe utilizar el termómetro 15C, se coloca el termómetro en el vaso de ensayo.

Figura 25

Molde de ensayo de punto de ablandamiento



Nota. En la figura se observa el molde que se utilizó para el ensayo.

Cada 12 segundos debe subir un grado de temperatura en el vaso, se toma nota del tiempo y temperatura en que las dos esferas de sobrepasan el ligante.

Figura 26

Ensayo de punto de ablandamiento



Nota. En la figura se observa el ensayo de punto de ablandamiento.

Con la ayuda de un cronometro tomamos la medida del tiempo y observamos la temperatura en el termómetro, la variación de la caída de las esferas tiene que ser menor que 1°C , en caso esta sea mayor se debe realizar el ensayo nuevamente.

Figura 27

Caída de esferas



Nota. En la figura se observa la caída de las esferas alcanzado el límite del molde.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 9

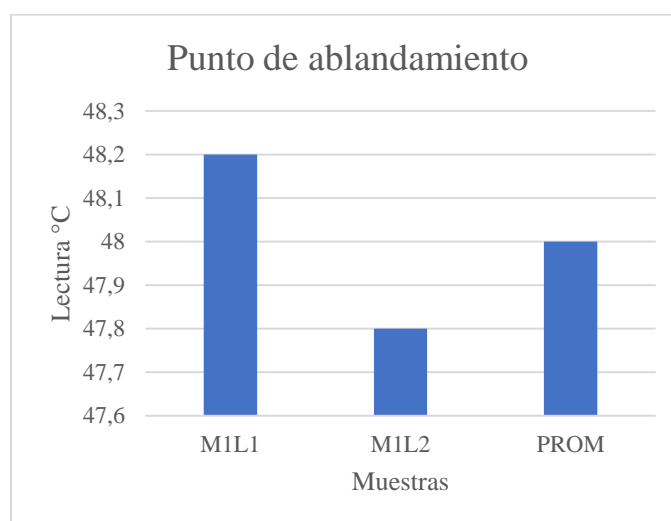
Lectura de muestra 1

Muestra/ Lectura	L1	L2
M1	48.2 °C	47.8°C

Nota. Se observa en la tabla las dos lecturas de la muestra 1

Figura 28

Resultados de punto de ablandamiento



Nota. En la figura se observa las lecturas y el promedio del ensayo del punto de ablandamiento.

Se afirma que el punto de ablandamiento del ligante con 2.5% MWNTC es de 48°C.

3.4.4. Viscosidad Brookfield, 135°C

Antes de realizar el ensayo ASTM D4402 se calienta la muestra a 130°C con la ayuda del horno por un tiempo de 1 hora y 30 minutos. Para comenzar el ensayo se vierte 8 gr. del ligante sobre 3 moldes diferentes con la ayuda de la balanza.

Figura 29
Pesado de muestras para viscosidad



Nota. En la figura se observa el pesado de la muestra para realizar el ensayo de viscosidad.

Luego de tener las 3 muestras, se coloca en la máquina para poder calibrarla por 10 minutos a una temperatura de 135°C, la maquina tiene un factor de corrección de 1°C por lo cual colocamos 136°C.

Figura 30
Calibración equipo Brookfield



Nota. En la figura se observa la calibración que se realiza al equipo antes de comenzar el ensayo.

Luego de esperar el tiempo de calibración se prosigue a realizar el ensayo, la maquina trabaja a 20 rpm, se realiza la secuencia para todas las muestras y se obtiene los siguientes resultados.

Tabla 10

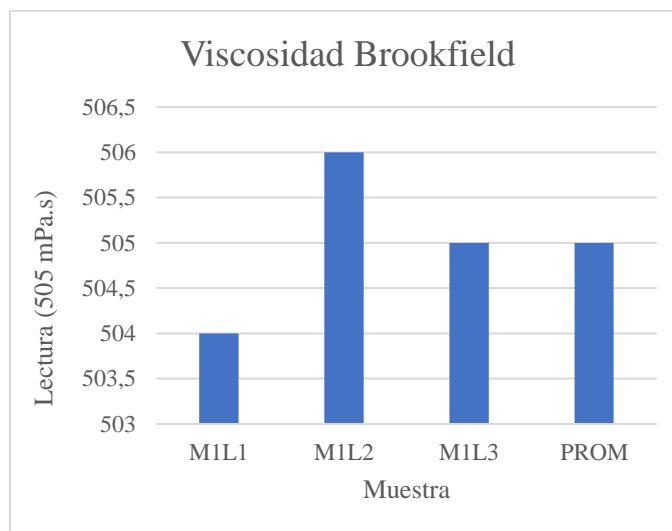
Lectura de muestra 1 del ensayo de viscosidad

Muestra/Lectura	L1	L2	L3
M1	504	506	505

Nota. En la tabla se observa las tres lecturas de la muestra 1.

Figura 31

Gráfica de lectura de viscosidad



Nota. En la figura se observa las lecturas y el promedio de la viscosidad del Brookfield

Afirmamos que el resultado de la Viscosidad Brookfield 135°C del ligante asfaltico con nanotubos de carbono de pared múltiple es de 505 mPa.s.

3.4.5. Ductibilidad

Para realizar el ensayo de ductibilidad ASTM D 113 del ligante asfáltico, se realiza la Película Fina Rotatoria en el Laboratorio de ligante, en el cual se calienta la mezcla a 130°C, se vierte en tubos de ensayos, en cada uno se coloca 35 gr.

Figura 32

Pesado del ligante para el ensayo de ductibilidad



Nota. En la siguiente figura se observa el pesado del ligante en los tubos de ensayo.

Luego se deja reposar a temperatura ambiente por 1 hora. para ser colocado en el horno rotatorio para que este ligante este 2 horas y 30 minutos dentro de este. Luego de realizar la película fina se retira los tubos para continuar con el ensayo.

Figura 33

Introducción del ligante al horno

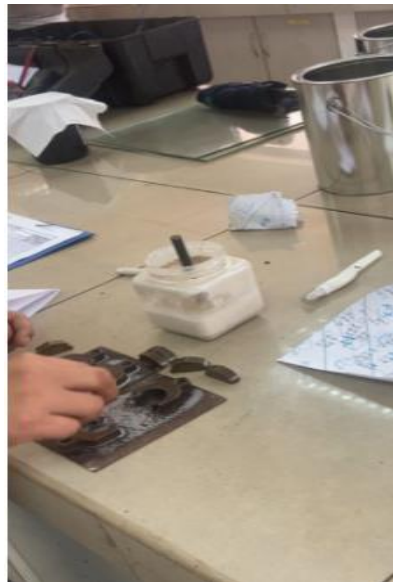


Nota. En la figura se observa los tubos que serán introducidos en el horno.

Para realizar este ensayo se utilizó tres moldes, en los cuales con la ayuda de una brocha se unta la mezcla de glicerina más talco para evitar la adherencia del ligante al molde. Seguidamente se vertió la mezcla.

Figura 34

Preparación de molde para ductibilidad



Nota. En la figura se observa la preparación del molde con glicerina y talco.

Luego de obtener los moldes llenos se dejó reposar por 30 minutos a temperatura ambiente, para seguidamente ser llevados a la cámara de agua a una temperatura de 25°C por 30 minutos.

Figura 35

Muestras para ensayo de ductibilidad



Nota. En la figura se muestra las muestras que se utilizaran para el ensayo.

Luego de retirarlos de la cámara de agua se procede a enrasar los moldes y se lleva otra vez a la cámara de agua por 1 hora y 30 minutos.

Figura 36

Enrasado y cámara de agua



Nota. En la figura se observa el enrasado y el colocado a la cámara de agua.

Al finalizar el tiempo de espera se procede a hacer el ensayo, en este se hace un estiramiento del ligante hasta poder ver a que distancia este se llega a romper, el equipo esta calibrado a una velocidad de 5 centímetros por minuto.

Figura 37

Procedimiento de ensayo de ductibilidad

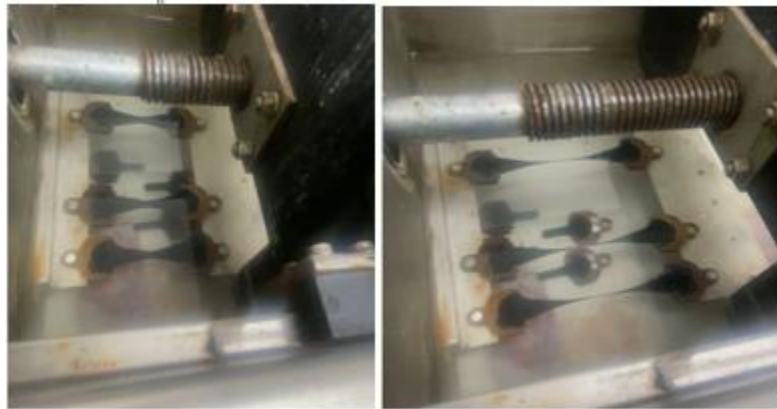


Nota. En la figura se observa el colocado de la muestra para realizar el ensayo de ductibilidad.

Al tener las 3 muestras ubicadas, se procede a observar la distancia en la que el ligante se rompe y se toma nota.

Figura 38

Distancia de rotura de la muestra



Nota. En la figura se observa la distancia de rotura de las muestras.

Se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la tabla 11:

Tabla 11

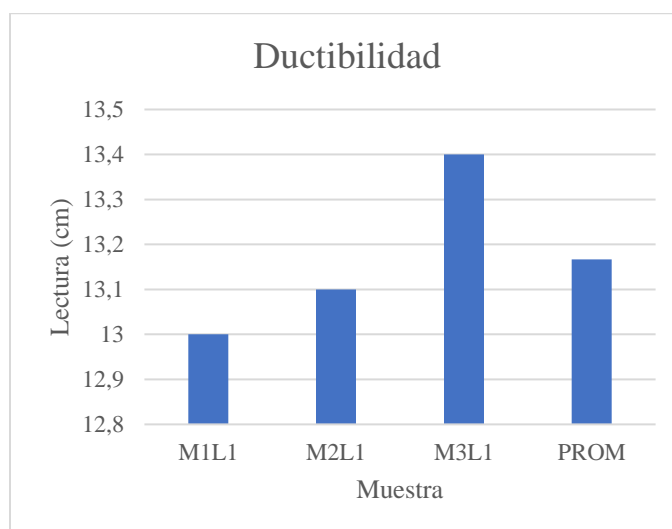
Lectura de distancia de las muestras

Muestra/Lectura	L1
M1	13
M2	13.1
M3	13.4

Nota. En tabla se presentan los resultados de las muestras del ensayo.

Figura 39

Gráfica del ensayo de ductibilidad



Nota. En la figura se observa las lecturas de las muestras y el promedio de estas.

Se afirma que el ensayo de ductibilidad a 25°C al ligante asfáltico después de Película Fina Rotatoria es 13 cm.

3.4.6. Punto de Inflamación

Para comenzar el ensayo ASTM D-92 se realiza el armado del equipo, donde se coloca el molde donde ira el ligante, seguidamente se adicional el termómetro calibrado, el termómetro

usado es 11 C que va de 0° a 400° Celsius, luego se calienta el ligante con la ayuda de una estufa a 130° por 30 minutos.

Figura 40

Calentamiento y calibración copa Cleveland



Nota. En la figura se observa el calentamiento del ligante asfáltico y la calibración del equipo de Cleveland.

Se vierte el ligante al molde dejando 1 centímetro, ya que el asfalto al aumentar de temperatura este incrementa el volumen y puede rebalsar.

Figura 41

Colocación del ligante en la copa de Cleveland



Nota. En la figura se observa la colocación del ligante asfáltico con nanotubos en la copa de Cleveland.

Se prosigue a encender el mechero y se observa el cambio de temperatura. Cuando el asfalto presenta una leve explosión se toma nota de esta temperatura ya que este es el punto de inflamación.

Figura 42

Inflamación del ligante con nanotubos.



Nota. En la figura se observa el momento donde el ligante asfáltico llega a su punto de inflamación

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 12

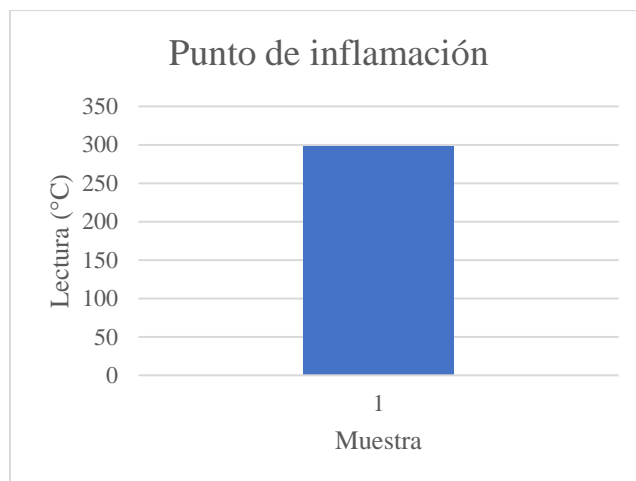
Medida del punto de inflamación

Ensayo	Medida
Punto de inflamación	298 °C

Nota. En la tabla se obtiene la medida del punto de inflamación del ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple.

Figura 43

Gráfica de punto de inflamación



Nota. En la figura se presenta el punto de inflamación de la muestra 1

3.4.7. Efecto de calentamiento y ventilación de asfaltos RTFOT

Para realizar el ensayo T240 o D2872 primero se hace el calentamiento del ligante asfáltico con nanotubos de carbono con la ayuda del horno a 130°C por 30 minutos para poder verter el ligante en los tubos de ensayo.

Figura 44

Calentamiento del ligante asfáltico en estufa



Nota. En la figura se observa el calentamiento del ligante a utilizar en el ensayo.

Luego de pesar los tubos de ensayo, se tara para poder colocar el asfalto, se debe colocar 35 gramos en los 10 tubos de ensayo de los cuales 8 se colocarán al horno y a 2 se le realizarán la pérdida de masa, se debe girar los tubos para poder tener una pared uniforme del ligante.

Figura 45
Pesado del ligante



Nota. En la figura se observa el pesado del ligante asfáltico y la rotación del mismo en los tubos para tener una película uniforme.

Luego de terminar de colocar el ligante se debe dejar reposar los vasos echados y por 1 hora a temperatura ambiente.

Figura 46
Reposo del ligante



Nota. En la figura se observa que las muestras en reposo y son colocadas en el rack.

Al concluir la hora de espera se selecciona los 2 vasos que serán utilizados para la pérdida de masa y se vuelven a pesar con la ayuda de la balanza.

Figura 47

Pesado de tubos de ensayo



Nota. En la figura se observa el pesado que se realiza para calcular la pérdida de masa.

Luego al tener la variación de peso de los vasos que se obtiene de pesar los vasos antes de colocar el ligante y luego de colocar el ligante envejecido en el RTFOT, se prosigue a poner los 8 vasos restantes a cada capsula del horno RTFOT y se coloca por 1 hora y 25 minutos, los cuales van a ser utilizados para realizar los siguientes ensayos.

Figura 48
Horno RTFOT



Nota. En la figura se observa la colocación de los vasos en el horno RTFOT

Se obtuvo el siguiente resultado en el cambio de masa RTFOT:

Tabla 13
Resultado de cambio de masa

Ensayo	Resultado
Cambio masa RTFOT	-0.294 %

Nota. En la tabla se presentan los resultados del cambio de masa RTFOT.

3.4.8. Determinación de propiedades reológicas de ligantes asfálticos mediante el DSR

(Ligante asfáltico sin envejecer)

Para realizar el ensayo AASHTO T315 O ASTM D7175 se calienta el asfalto a una temperatura de 130°C por 30 minutos.

Seguidamente se agrega la muestra en dos moldes que van a pasar al reómetro digital. El reómetro digital va a evaluar 5 diferentes temperaturas, las temperaturas que se evaluó son de

52°C, 58°C, 64°C y 70°C. Se configura el reómetro a la temperatura que se va a evaluar con ayuda del cubo de temperatura.

Figura 49

Moldes para ensayo DSR



Nota. En la figura se observa los moldes antes de colocar el ligante y después de colocar el ligante.

Se coloca las muestras en el equipo. El equipo tiene el principio de platos paralelos, una vez que se coloca la muestra el equipo va a adelgazar la muestra a 1 mm, luego de esto el equipo a va a pedir que se enrasar la muestra, para que la muestra quede de acuerdo con la normativa correspondiente.

Figura 50

Calibración Reómetro digital



Nota. En la figura se observa la calibración del reómetro.

Al finalizar el proceso de la evaluación de las temperaturas el reómetro nos indica los resultados:

Tabla 14

Resultado de ensayo DSR

Frec. Angular Rad/s	Temp °C	Delta δ	G* kPa	G*/sin δ kPa	Pasa/Falla
10	52.0	78.0	8.46	8.65	Pasa
10	58.0	80.6	3.83	3.88	Pasa
10	64.0	82.9	1.77	1.79	Pasa
10	70.0	84.7	0.852	0.856	Falla

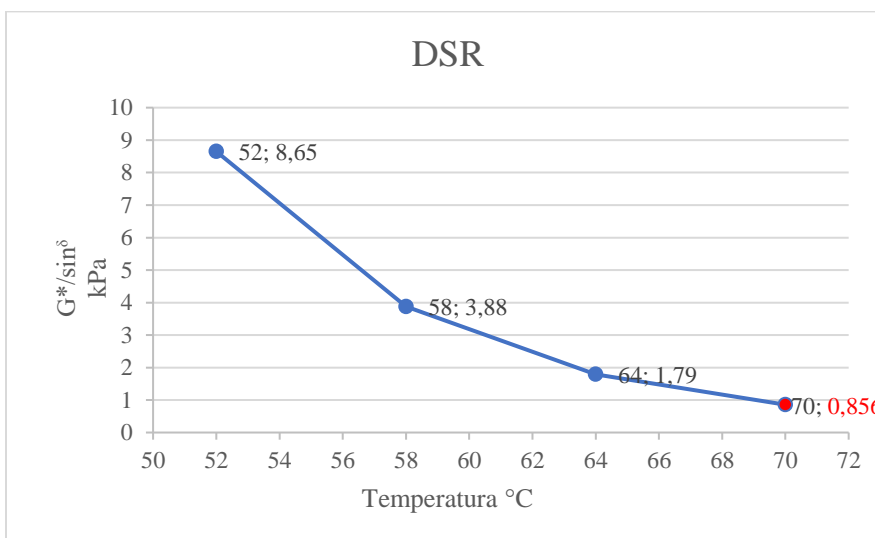
Nota. En la tabla se presenta el momento de falla del ensayo DSR

Cuando $G^*/\sin\delta$ es mayor que 1.0 kPa significa que la muestra pasa y si el valor es menor que 1.0 kPa la muestra falla.

Temperatura estimada de falla del ligante: 68.7°C

Figura 51

Gráfica de ensayo DSR



Nota. En la figura se presenta la gráfica del esfuerzo cortante $G^*/\sin\delta$ kPa de acuerdo al ensayo DSR.

3.4.9. Determinación de las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos DSR envejecido RTFOT

Luego de realizar el envejecimiento del ligante en el horno RTFOT especificado en el punto 3.4.7, se toma la muestra de un vaso de ensayo para realizar la determinación del límite superior del grado de desempeño DSR para poder comprobar que el PG es 64 y contrastar con el resultado del punto 3.4.8.

Figura 52
Colocación del ligante envejecido en moldes



Nota. En la figura se muestra el momento en que se coloca el ligante envejecido en los moldes.

Se realiza los mismos pasos que el punto 3.4.8, se realiza el llenado de las pastillas con la muestra, se calibra el reómetro, luego se realiza el enlace y se toma los datos.

Figura 53*Colocación de ligante en pastillas*

Nota. En la figura se observa el momento que se coloca el asfalto en las pastillas para luego ser puestas en el reómetro.

Se obtiene los siguientes datos:

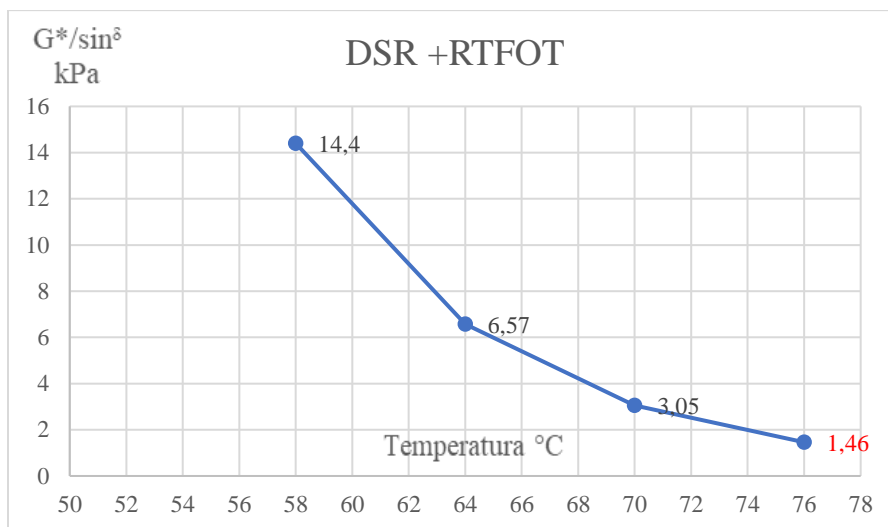
Tabla 15*Ensayo DSR envejecido*

Frec. Angular Rad/s	Temp. °C	Delta ^δ	G* kPa	G*/sin ^δ kPa	Pasa/Falla
10	58.0	71.5	13.7	14.4	Pasa
10	64.0	74.8	6.34	6.57	Pasa
10	70	78.0	2.98	3.05	Pasa
10	76	80.8	1.44	1.46	Falla

Nota. En la tabla se presenta el resultado de falla del ensayo DSR envejecido.

Temperatura estimada de falla del ligante +RTFOT:72.7°C

Figura 54
Gráfica de ensayo DSR + RTFOT



Nota. En la figura se tiene la gráfica del esfuerzo cortante $G^*/\sin\delta$ kPa resultado del ensayo DSR +RTFOT que se ha realizado.

A comparación con el ensayo DSR con la muestra no envejecida, este ensayo DSR +RTFOT el $G^*/\sin\delta$ tiene que superar el valor de 2.2 kPa para que pase y si es menor que 2.2 kPa falla.

Al obtener el contraste del ensayo DSR con la muestra no envejecida y el DSR + RTFOT podemos afirmar que el ligante asfáltico con 2.5% de nanotubos de carbono de pared múltiple tiene un PG 64.

3.4.10. Recuperación y fluencia del asfalto a esfuerzos repetidos mediante reómetro de corte dinámico (MSCR)

Para realizar el ensayo MSCR o D7405, se toma dos vasos de las muestras que ya han sido envejecida en el RTFOT, se utilizara el reómetro, muestras de plato de 25 mm por 1mm de espesor.

El MSCR nos va a indicar el tipo de tráfico que va a soportar el ligante asfaltico con 2.5% mwntc. Se configura la temperatura a 64°C porque el PG ya fue confirmado en los ensayos anteriores.

Figura 55
Reómetro digital



Nota. En la siguiente se observa el momento de calibración del reómetro digital.

Se calibra el reómetro, se coloca la pastilla en el reómetro, seguidamente se enrasa la muestra para obtener la cantidad que necesita la máquina, y se procede a realizar el ensayo MSCR.

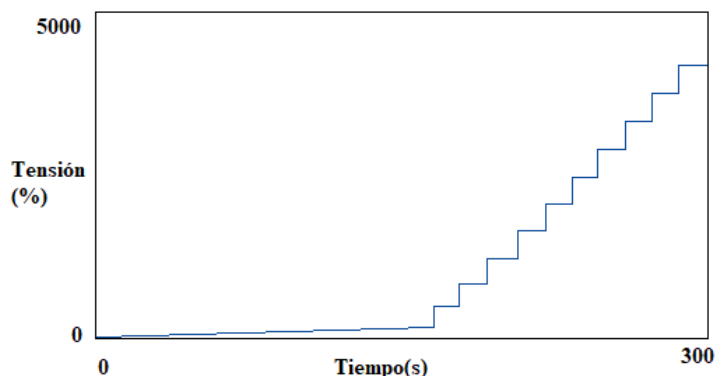
Figura 56
Ensayo MSCR



Nota. En la figura se observa el enrasado de la muestra y el proceso del ensayo MSCR.

Los 10 primeros ciclos que se observa en la figura 57 son los puntos cuales están sometidos a una carga de 10 kPa, los puntos siguientes son sometidos a una presión de 3200 kPa 10 veces más. El esfuerzo aplicado es 1 segundo y 9 segundos de recuperación.

Figura 57
Gráfica de tensión vs tiempo



Nota. En la gráfica se representa los 10 esfuerzo que fueron aplicados al ligante asfáltico.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 16
Resultado del ensayo MSCR

Parámetro	Resultado
Temperatura Prueba	64 °C
Porcentaje promedio de recuperación a 0.100kPa	15.87%
Porcentaje promedio de recuperación a 3.200 kPa	6.21%
Diferencia entre el Porcentaje promedio de diferencia de 0.100kPa y 3.200kPa (ΔJnr)	60.88%
Jnr a 0.1kPa	1.07 kPa ²
Jnr a 3.2 kPa	1.31 kPa ²
Diferencia de porcentaje de Jnr 0.1kPa y Jnr 3.2kPa	22.80%

Nota. En la tabla se observan los resultados obtenidos por el ensayo MSCR.

De acuerdo con los resultados y a la normativa ASTM D7405, identificamos el tipo de tráfico que resiste el ligante asfáltico:

$$\Delta Jnr < 75\%$$

$$\Delta Jnr = 22.80\% \text{ cumple } \checkmark$$

$$Jnr \text{ a } 3.2 \text{ Pa} = 1.1 \text{ kPa}^2$$

Si: $Jnr < 0.5$ Tráfico extremo (E)

$0.5 < Jnr < 1.0$ Tráfico Muy Pesado (V)

$1.0 < Jnr < 2.0$ Tráfico Pesado (H)

$2.0 < Jnr < 4.0$ Tráfico Estándar (S)

$Jnr = 1.31$ por lo tanto podemos afirmar que el ligante puede soportar un tráfico pesado. Se obtiene los siguientes resultados finales:

Tabla 17
Clasificación del ligante

Parámetro	Método de ensayo	Jnr 3200 kPa	Jnr diff %	Clasificación
Fluencia no recuperable a 64°C	D7405	1.31	22.80	H (Tráfico Pesado)

Nota. En la tabla se encuentra la clasificación del asfalto por Jnr

3.4.11. Envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos mediante el dispositivo de envejecimiento presurizado (PAV)

Para realizar el envejecimiento del lígate PAV o ASTM D 6521, se van a utilizar una temperatura de 100°C con una duración de horno de 20 horas con 10 minutos. En la rejilla del horno se pueden colocar 10 muestras, en nuestro caso utilizaremos 2 muestras que fueron previamente calentadas en el horno RTFOT en el punto 3.4.7.

Figura 58
Horno PAV



Nota. En la figura se observa el horno PAV que fue utilizado.

La variación de la temperatura solo puede ser de 1°C, se procede a retirar las rejillas y colar las 2 muestras que se van a envejecer, las muestras van a estar sometidas a una carga de 2.10 Mpa, su envejecimiento será equivalente de 7 a 10 años.

Figura 59
Muestras PAV



Nota. En la figura se observa las muestras que serán introducidas en el horno PAV.

Luego de las 20 horas de envejecimiento se procede a colocar el ligante en moldes que posteriormente serán introducidas al horno de desgasificación al vacío (ASTM D6521). En esta

cámara de desgasificación se eliminará todas las burbujas de aire que han sido atrapadas en el horno PAV.

Figura 60
Cámara de desgasificación



Nota. En la figura se observa la cámara de desgasificación y la colocación de muestras.

3.4.12. Determinación del límite intermedio del grado de desempeño del Ligante asfáltico +

RTFOT + PAV

Al tener la muestra envejecida luego de RTFOT en el punto 3.4.7 y pasar por el envejecimiento PAV en el punto 3.4.11, se toma un dish y se coloca este ligante envejecido a un molde que es colocado seguidamente en el reómetro que nos permitirá hallar el límite intermedio del grado de desempeño del ligante asfáltico con 2.5% de nanotubos de carbono de pared múltiple.

Figura 61
Muestras luego de PAV



Nota. En la figura se puede observar las muestras obtenidas luego de realizar el envejecimiento.

Al tener la muestra del ligante envejecido listo seguimos los pasos del punto **3.4.8**, se calibra el reómetro, se coloca la muestra en el reómetro y se toma nota de los resultados.

Figura 62
Reómetro para hallar el límite intermedio



Nota. En la figura se observa el proceso del reómetro digital para hallar el límite intermedio del ligante.

Se obtiene los siguientes resultados:

Tabla 18

Resultado del límite intermedio

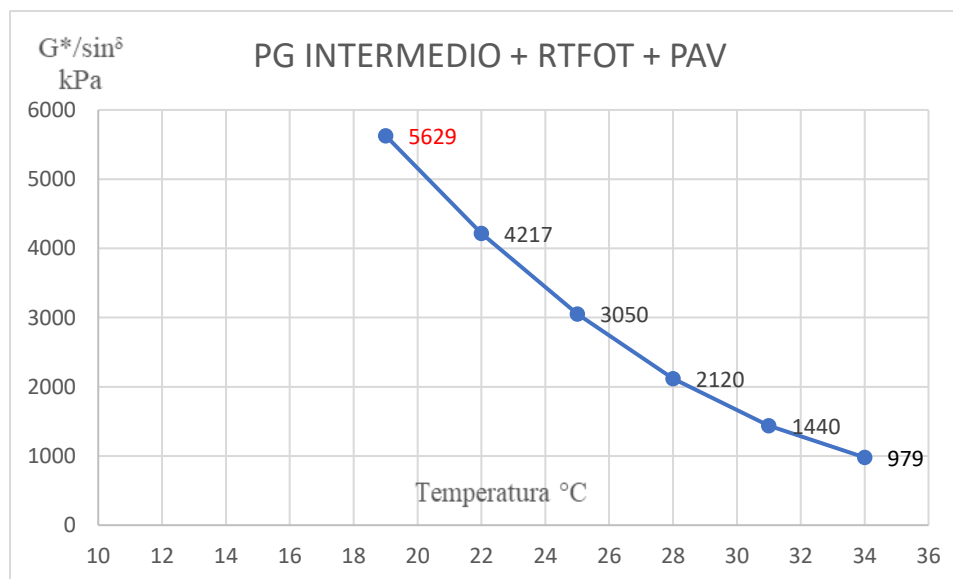
Frec. Angular Rad/s	Temp °C	Delta ^δ	G kPa	G* \sin^{δ} kPa	Pasa/Falla
10	34.0	46.3	1350	979	Pasa
10	31.0	44.2	2060	1440	Pasa
10	28.0	42.1	3160	2120	Pasa
10	25.0	40.1	4730	3050	Pasa
10	22.0	38.0	6850	4217	Pasa
10	19.0	35.9	9600	5629	Falla

Nota. En la tabla se presenta el momento de falla y el límite intermedio del ligante.

Temperatura de falla estimada: 21.2°C

Figura 63

PG intermedio



Nota. En la gráfica se observa el momento de falla y la temperatura última que pasa que es 22°C que viene a ser el límite intermedio del ligante.

De acuerdo con los resultados podemos decir que el límite intermedio del grado de desempeño de ligantes asfáltico con nanotubos de carbono envejecido RTFOT + PAV es de 22°C y su temperatura de falla es de 21.2

3.4.13. Determinación del límite inferior del grado de desempeño BBR del ligante asfáltico envejecido RTFOT + PAV

Para realizar el ensayo del límite inferior de ligante asfáltico BBR ASTM D6648, se utilizó la segunda muestra que fue envejecida en RTFOT y en PAV en el punto 3.4.11. Este ensayo de viga de flexión se realizó a 2 temperaturas diferentes la primera a una temperatura de -12C y la segunda a -18°C. Mediante este ensayo se obtiene la resistencia del material a la flexión a bajas temperaturas.

Figura 64
Ensayo BBR



Nota. En la figura se muestra donde se realizará el ensayo BBR y la calibración.

Se acondiciona el horno BBR a la temperatura de -12°C, este proceso dura 3 horas, al finalizar se hace la calibración de este con las pesas de 100 gr.

Figura 65
Pesas de calibración



Nota. En la figura se muestra las pesas del ensayo de calibración del equipo.

Se coloca la muestra envejecida después del PAV en 4 moldes de vigas, para la temperatura de -12°C se usó 2 vigas y para -18°C se empleó 2 vigas, dejamos reposar la muestra a temperatura ambiente por 1 hora, para luego enrasar con una espátula, luego se lleva 2 muestras al congelador por 2 minutos y se procede a desmoldar las vigas.

Figura 66
Vigas ensayo BBR



Nota. En la figura se observa las vigas del ensayo BBR y el desmolde de estas.

Luego de realizar el desmolde de las vigas se introducen en el horno que se encuentra a -12°C y se dejan reposar por 60 minutos para que las muestras se temperen. Luego se coloca la muestra en la rejilla donde se somete a la viga a un esfuerzo para que esta se deforme y el equipo mida el grado de deflexión de la muestra a esa temperatura, se espera que la rigidez no sobrepase el valor de 300 Mpa. Se tomará la lectura de las 2 muestras. Finalmente se repite el mismo procedimiento para las 2 muestras a temperatura de -18°C .

Figura 67

Comienzo del ensayo BBR



Nota. En la figura se observa el momento en el que se coloca la viga para que sea ensayada y el momento en el que se retira la viga deformada.

Se obtienen los siguientes datos:

Muestra 1 a -12°C

Tabla 19

Muestra 1 a -12°C

Parámetros	Datos
Temperatura	-12°C
Temperatura mínima	-11.9°C
Temperatura máxima	-12.1°C
Tiempo	60 min

Nota. En la figura se obtiene los parámetros de la muestra 1 del ensayo BBR. La variación de la temperatura de la muestra 1 no puede ser mayor de 1°C.

Medición de Rigidez de la muestra 1 a -12°C

Tabla 20

Rigidez muestra 1 a -12°C

Tiempo (s)	Fuerza (mN)	Deflexión (nm)	Rigidez (Mpa)	Rigidez estimada (Mpa)	Diferencia (%)	Valor m
8.0	995	0.335	239	239	0.000	0.269
15.0	989	0.400	199	200	0.503	0.286
30.0	993	0.490	163	163	0.000	0.304
60.0	997	0.608	132	132	0.000	0.322
120.0	994	0.764	105	105	0.000	0.340
240.0	997	0.978	82.2	82.1	-0.122	0.358

Nota. En la tabla se presenta los resultados de la rigidez de la muestra 1

La lectura de la muestra 1 a -12°C nos indica que la rigidez de es de 132 Mpa con un valor m de 0.322

Muestra 2 a -12°C

Tabla 21

Muestra 2 a -12°C

Parámetros	Datos
Temperatura	-12°C
Temperatura mínima	-11.9°C
Temperatura máxima	-12.1°C
Tiempo inmersión	60.0 min

Nota. En la tabla se muestra los parámetros de la muestra 2 para realizar el ensayo BBR. La variación de la temperatura de la muestra 2 no puede ser mayor a 1 °C

Medición de la rigidez de la muestra 2 a -12°C

Tabla 22

Rigidez muestra 2 a -12°C

Tiempo (s)	Fuerza (mN)	Deflexión (mm)	Rigidez (Mpa)	Rigidez estimada (Mpa)	Diferencia (%)	Valor m
8.0	995	0.322	249	249	0.000	0.275
15.0	995	0.384	209	209	0.000	0.290
30.0	998	0.472	169	170	0.592	0.306
60.0	993	0.586	137	137	0.000	0.322
120.0	997	0.738	109	109	0.000	0.338
240.0	997	0.944	85.2	89.4	0.235	0.355

Nota. En la tabla se presenta la medición de la rigidez de la muestra 2.

La lectura de la muestra 2 a -12°C indica que la rigidez es de 137 Mpa con un valor m de 0.322.

Al obtener las dos lecturas de la muestra 1 y muestra 2 que se encuentra a -12°C, procedemos a hallar el promedio de la rigidez y del valor de m.

Tabla 23*Promedio de rigidez a -12°C*

Muestra	Rigidez	Valor m
Muestra 1	132 Mpa	0.322
Muestra 2	137 Mpa	0.322
Promedio rigidez	135 Mpa	0.322

Nota. En la tabla se muestra el promedio de la rigidez obtenido de las dos muestras.

El ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple que fue ensayado a -12°C tiene un módulo de rigidez de 135 Mpa y un valor de m estimado de 0.322.

Muestra 1 a -18°C

Tabla 24*Muestra 1 a -18°C*

Parámetros	Datos
Temperatura	-18.0°C
Temperatura mínima	-17.9°C
Temperatura máxima	-18.1°C
Tiempo inmersión	60min

Nota. En la tabla se muestra los parámetros de la muestra 1 a -18°C. La variación de la temperatura de la muestra 1 no debe ser mayor a 1

Medición de Rigidez de la muestra 1 a -18°C

Tabla 25
Rigidez de la muestra 1 a -18°C

Tiempo (s)	Fuerza (mN)	Deflexión (mm)	Rigidez (Mpa)	Rigidez estimada (Mpa)	Diferencia (%)	Valor m
8.0	991	0.181	441	440	-0.227	0.230
15.0	989	0.211	378	379	0.265	0.248
30.0	995	0.253	317	317	0.000	0.267
60.0	997	0.306	263	262	-0.380	0.286
120.0	995	0.375	214	213	-0.467	0.305
240.0	988	0.464	172	171	-0.581	0.324

Nota. En la figura se presenta los resultados de la rigidez de la muestra 1

La lectura de la muestra 1 a -18°C indica que la rigidez es de 263 Mpa con un valor m de 0.286

Muestra 2 a -18°C

Tabla 26
Muestra 2 a -18°C

Parámetros	Datos
Temperatura	-18°C
Temperatura mínima	-17.9°C
Temperatura máxima	-18.1°C
Tiempo inmersión	60min

Nota. En la tabla se muestra los parámetros de la muestra 2 a -18°C. La variación de la muestra 2 no debe ser mayor a 1°C.

Medición de la rigidez de la muestra 2 a -18°C

Tabla 27*Rigidez de la muestra 2 a -18°C*

Tiempo (s)	Fuerza (mN)	Deflexión (mm)	Rigidez (Mpa)	Rigidez estimada (Mpa)	Diferencia (%)	Valor m
8.0	999	0.185	435	436	0.230	0.225
15.0	1004	0.215	377	376	-0.265	0.243
30.0	1003	0.256	316	316	0.000	0.264
60.0	1004	0.310	261	261	0.000	0.284
120.0	1000	0.380	212	213	0.472	0.304
240.0	996	0.468	172	171	-0.581	0.324

Nota. En la figura se muestra los resultados obtenidos de rigidez

La lectura de la muestra 2 a -18°C indica la rigidez de 261 Mpa y un valor m de 0.284

Al obtener los resultados de la muestra 1 y la muestra 2 obtenemos el promedio del módulo de rigidez y el valor de m.

Tabla 28*Promedio rigidez a -18°C*

Muestra	Rigidez	Valor de m
Muestra 1	263	0.286
Muestra 2	261	0.284
Promedio	262	0.285

Nota. En la tabla se presenta las lecturas de rigidez de las dos muestras y el promedio de estas.

El ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple que fue ensayado a -18°C tiene una rigidez de 262 Mpa y un valor de m estimado de 0.285.

3.4.14. Clasificación del asfalto según grado de desempeño AASHTO M 320

Luego de realizar los ensayos para poder identificar el PG del ligante asfáltico con 2.5% de nanotubos de carbono de pared múltiple podemos afirmar que tenemos un ligante con las siguientes características:

Tabla 29

Clasificación ligante asfáltico

Ligante asfáltico 2.5% MWNTC	
Grado de desempeño	PG 64-22
Temperatura Superior (°C)	64°C
Temperatura intermedia(°C)	22°C
Temperatura inferior	-22°C
Punto de inflamación	298°C
Viscosidad	505 cp
Clasificación MSCR a 64°C según AASHTO M332	H

Nota. En la tabla se presenta la clasificación del ligante asfáltico con 2.5% de mwntc

De acuerdo con la normativa AASHTO M320 el asfalto tiene un grado de desempeño PG 64-22, ya que cumple las siguientes condiciones, la temperatura máxima de diseño es menor a 64, la temperatura de diseño mínima de - 22, el punto de inflamación es 298 que es mayor a 230 y una viscosidad 505 que es mayor a 135. Se puede observar en figura 68, figura 69, figura70 y figura 71, la siguiente clasificación:

Figura 68
Especificaciones PG del asfalto AASHTO M320 tabla 1

Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por PG según Tabla 1 de AASHTO M320

	PG 46			PG 52						PG 58						PG 64					
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Temperatura de diseño máxima del pavimento promedio de 7 días, °C ¹	<46			<52						<58						<64					
Temperatura de diseño mínima del pavimento, °C ²	>-34	>-40	>-46	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-46	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40
Asfalto original																					
Punto de inflamación, T 48, °C, mínimo	230																				
Viscosidad, T 316: ³ máximo 3 Pa·s, temp de prueba, °C	135																				
Esfuerzo Cortante Dinámico, T 315: ⁴ G ⁺ /senS ⁺ mínimo 1.00 kPa temp de prueba @ 10 rad/s, °C	46			52						58						64					
Película delgada en horno rotativo (T 240)																					
Cambio de masa, ⁵ máximo, %	1.00																				
Esfuerzo cortante dinámico, T 315: ⁴ G ⁺ /senS ⁺ mínimo 2.20 kPa temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	46			52						58						64					
Residuo en cámara de presión (R 28)																					
Temperatura de curado PAV, °C ¹	90			90						100						100					
Esfuerzo cortante dinámico G ⁺ /senS ⁺ máximo 5000 kPa temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Resistencia al deslizamiento, T 313: ⁶ S, máximo 300 MPa valor-m, mínimo 0.300 temp de prueba @ 60 s, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30
Tensión Directa, T 314: ⁹ Def unitaria de la falla, mínimo 1,0% temp de prueba @ 1.0 mm/min, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

Nota. En la figura se presenta las especificaciones del cemento asfáltico clasificado por PG según AASHTO M320. El ligante asfáltico se encuentra en un PG 64 que esta señalado con un cuadro color rojo. Tomado del Manual de carreteras “Especificaciones técnicas generales para construcción” (pág.590) (EG-2013), 2013.Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Figura 69
Especificaciones PG del asfalto AASHTO M320 tabla 2

Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por PG Tabla 2 de AASHTO M320

	PG 46			PG 52						PG 58				PG 64							
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Temperatura de diseño máxima del pavimento promedio de 7 días, °C ^a	<46			<52						<58				<64							
Temperatura de diseño mínima del pavimento, °C ^b	>-34	>-40	>-46	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-46	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40
Asfalto original																					
Punto de inflamación, T 48, °C, mínimo	230																				
Viscosidad, T 316: ^a máximo 3 Pa s, temp de prueba, °C	135																				
Esfuerzo Cortante Dinámico, T 315: ^c G [*] /senS, ^d mínimo 1.00 kPa temp de prueba @ 10 rad/s, °C	46			52						58				64							
Película delgada en horno rotativo (T 240)																					
Cambio de masa, ^e máximo, %	1.00																				
Esfuerzo cortante dinámico, T 315: G [*] /senS, ^d mínimo 2.20 kPa temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	46			52						58				64							
Residuo en cámara de presión (R 28)																					
Temperatura de curado PAV, R 49 ^f	90			90						100				100							
Esfuerzo cortante dinámico G [*] senS, ^d máximo 5000 kPa temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Temperatura baja crítica de falla, R 49: Temperatura crítica de falla determinada mediante R 49, temperatura de prueba, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

Nota. En la figura se presenta la tabla 2 de las especificaciones del ligante asfáltico clasificado por su PG según AASHTO M320. Tomado del Manual de carreteras “Especificaciones generales para la construcción”, (pág.591) (EG-2013), 2013, Ministerio de Transportes y Comunicaciones

Figura 70
Especificaciones PG asfalto AASHTO M320 tabla 3 A

Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por PG Tabla 3 de AASHTO M320

	PG 46			PG 52						PG 58				PG 64							
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Temperatura de diseño máxima del pavimento promedio de 7 días, °C ^a	<46			<52						<58				<64							
Temperatura de diseño mínima del pavimento, °C ^b	>-34	>-40	>-46	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-46	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40
Asfalto original																					
Punto de inflamación, T 48, °C, mínimo	230																				
Viscosidad, T 316: ^a máximo 3 Pa s, temp de prueba, °C	135																				
Esfuerzo Cortante Dinámico, T 315: ^c G [*] /senS, ^d mínimo 1.00 kPa temp de prueba @ 10 rad/s, °C	46			52						58				64							
Película delgada en horno rotativo (T 240)																					
Cambio de masa, ^e máximo, %	1.00																				
MSCR, TP 70 ¹ : Tráfico standard “S” ^h J _{0.1,2} , maximum 4.0 J _{0.05m} , maximum 75% Temp de prueba @ 10 rad/sec, °C	46			52						58				64							
MSCR, TP 70 ¹ : Tráfico pesado “H” ⁱ J _{0.1,2} , maximum 2.0 J _{0.05m} , maximum 75% Temp de prueba @ 10 rad/sec, °C	46			52						58				64							
MSCR, TP 70 ¹ : Tráfico muy pesado “V” Grade ^j J _{0.1,2} , maximum 1.0 J _{0.05m} , maximum 75% Temp de prueba @ 10 rad/sec, °C	46			52						58				64							

Nota. En la figura se presenta la tabla 3 parte a de las especificaciones del asfalto clasificado por su PG según AASHTO M320. Tomado del Manual de carreteras “Especificaciones generales para la construcción”(pág.592)(EG-2013),2013,Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Figura 71
Especificaciones PG asfalto AASHTO M320 tabla 3B

Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por PG Tabla 3 de AASHTO M320

	PG 46			PG 52				PG 58				PG 64									
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Residuo en cámara de presión (R 28)																					
PAV temperature envejecimiento, °C ^f	90			90				100				100									
Esfuerzo Cortante Dinámico, T 315: Grado °S ^a G* senS _d máximo 5000 kPa Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Esfuerzo Cortante Dinámico, T 315: Grados °H & V ^a G* senS _f maximum 6000 kPa Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Resistencia al deslizamiento, T 313: ^g S _v máximo 300 MPa m-value, mínimo 0,300 temperatura de prueba @ 60 s, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30
Tensión directa, T 314: ^h Rotura de falla, minimum 1.0% Temp de prueba @ 1.0 mm/min, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

Nota. En la figura se presenta tabla 3 parte b de las especificaciones del asfalto clasificado por su PG según AASHTO M320. Tomado del Manual de Carreteras, “Especificaciones generales para la construcción” (pág. 593) (EG-2013), Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

3.4.15. Ligante asfáltico virgen Pen 60/70

De acuerdo con el Anexo 3, la caracterización del ligante asfáltico virgen Pen 60/70 del tanque 333B es:

Tabla 30
Caracterización del ligante asfáltico virgen

Ensayo	Norma	Resultado
Penetración a 25°C	ASTM D5	65 dmm
Ductibilidad a 25°C	ASTM D113	64.0 cm
Punto de inflamación	ASTM D92	298.0°C
Punto de ablandamiento	ASTM D36	50.2 °C
Viscosidad a 135°C	ASTM D2170	424 cP
Pérdida por calentamiento	ASTM D 1754	0.23 %

Nota. En la siguiente tabla se presenta la caracterización del asfalto que fue brindada por parte de la empresa, de acuerdo con el anexo 3.

De acuerdo con el Anexo 4, la caracterización del ligante asfáltico Pen 60/70 sin aditivo es la siguiente:

Tabla 31
Caracterización del ligante asfáltico pen 60/70

Ensayo	Norma	Resultado
Penetración a 25°C	ASTM D5	63 dmm
Viscosidad Brookfield 135°C	ASTM 4402	490 cP
Ductibilidad 25°C	ASTM D113	150 cm
Punto de Ablandamiento	ASTM D36	48.5 °C
Punto de inflamación	ASTM D92	280°C
Variación de masa RTFOT	ASTM D 2872	-0.276%

Nota. En la tabla se presenta la caracterización del ligante asfáltico pen 60/70 de acuerdo con el anexo 4.

Figura 72
Especificaciones del asfalto clasificado por penetración

Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por penetración

Tipo		Grado Penetración									
Grado	Ensayo	PEN 40-50		PEN 60-70		PEN 85-100		PEN 120-150		PEN 200-300	
		min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx
Pruebas sobre el Material Bituminoso											
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) ⁽¹⁾	MTC E 304	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
Ensayo de la Mancha (Ollensies) ⁽²⁾											
Solvente Nafta – Estándar	AASHTO M 20	Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Nafta – Xileno, %Xileno		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Heptano – Xileno, %Xileno		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Pruebas sobre la Película Delgada a 163°C, 3,2 mm, 5 h											
Pérdida de masa, %	ASTM D 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 ⁽³⁾	MTC E 306			50		75		100		100	

Nota. En la tabla se presenta las especificaciones de clasificación del asfalto. El asfalto utilizado se encuentra en los parámetros de pen 60/70 esto quiere decir de que cumple con los requerimientos mínimos de calidad. Tomado del Manual de Carreteras “Especificaciones generales para la construcción” (Pág. 472) (EG-2013), Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

De acuerdo con la caracterización obtenida del ligante asfáltico mediante los ensayos de laboratorio que se presentan en la tabla 30 y tabla 31, identificamos que el Pen 60/70 utilizado se encuentra dentro las especificaciones del cemento asfáltico dado por Ministerio de Transportes y Comunicaciones en manual “Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013” en la tabla 32, es decir este asfalto cuenta con las especificaciones mínimas de calidad para poder ser utilizado.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se presenta los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio y que se encuentran en los Anexos.

4.1.Resultados

Los resultados de los ensayos de laboratorio son presentados en el punto 4.1.1 que se expone las características físicas y reológicas del ligante asfáltico PEN 60/70 y en el punto 4.1.2 que se presentan las características físicas y reológicas del ligante asfáltico con 2.5% de nanotubos de carbono de pared múltiple.

4.1.1. Ligante Asfáltico PEN 60/70

4.1.1.1. Caracterización física

El ligante asfáltico utilizado que fue un pen 60/70 de la refinería de Repsol, tiene la caracterización física de una penetración de 63dmm, la viscosidad a 135 °C de 490 cp., el punto de ablandamiento de 48.5°C, un punto de inflamación de 280°C y una ductibilidad de 150 cm. Como se presenta en la Tabla 32.

Tabla 32

Caracterización física ligante asfáltico pen 60/70

Caracterización física	
Características	Resultados
Penetración, 25°C, 100g, 5seg	63 dmm
Viscosidad Brookfield, 135°C	490 cP
Punto de Ablandamiento	48.5 °C
Punto de Inflamación	280°C
Ductibilidad, 25°C	150 cm

Nota: En la tabla se presenta la caracterización física del ligante.

4.1.1.2. Caracterización Reológica

El ligante asfáltico pen 60/70 utilizado presenta una caracterización reológica con una temperatura de prueba de 64°C , tiene el porcentaje promedio de recuperación a 0.100 kPa de 15.05%, un porcentaje promedio de recuperación a 3.200 kPa de 5.25%, una diferencia entre porcentajes promedio diferencia de 0.100 kPa y 3.200 kPa de 65.10%, un Jnr a 0.1kPa de 1.46kPa², un Jnr a 3.2 kPa de 1.83 kPa²y por último una diferencia de Jnr de 25.47%, lo cual nos permite identificar el tipo de tráfico que puede soportar como se presenta en la Tabla 33.

Tabla 33

Ensayo MSCR ligante pen 60/70

Parámetro	Resultado
Temperatura Prueba	64°C
Porcentaje promedio de recuperación a 0.100 kPa	15.05%
Porcentaje promedio de recuperación a 3.200 kPa	5.25%
Diferencia entre el Porcentaje promedio diferencia de 0.100 kPa y 3.200 k Pa (Δ Jnr)	65.10%
Jnr a 0.1 k Pa	1.46 kPa ²
Jnr a 3.2 k Pa	1.83 kPa ²
Diferencia de porcentaje de Jnr 0.1kPa y Jnr 3.2kPa	25.47%

Nota. En la tabla 33 se presenta los resultados del MSCR ligante pen 60/70

De acuerdo con la normativa ASTM D7405, se identifica el tipo del tráfico que resiste el ligante asfáltico identificando en que rango se encuentra el Jnr hallado anteriormente, Primero considerando que la variación de Jnr se debe ser menor al 75% y la muestra tiene 25.47% , es decir se cumple la condición, seguidamente identificamos el Jnr a 3.2 kPa el cual es 1.83 kPa²:e

identificamos que se encuentra en el rango que pertenece mayor a 1.0 y menor a 2.0 por lo que afirmamos que el ligante puede soportar un tráfico Pesado.

$$\Delta Jnr < 75\%$$

$$\Delta Jnr = 22.80\% \text{ cumple } \checkmark$$

$$Jnr \text{ a } 3.2 \text{ Pa} = 1.83 \text{ kPa}^2$$

Si: $Jnr < 0.5$ Tráfico extremo (E)

$0.5 < Jnr < 1.0$ Tráfico Muy Pesado (V)

$1.0 < Jnr < 2.0$ Tráfico Pesado (H)

$2.0 < Jnr < 4.0$ Tráfico Estándar (S)

$Jnr = 1.83$, por lo tanto el ligante soporta un tráfico pesado (H).

Debido a lo expuesto en la tabla 33 y la anterior validación de Jnr se procede a concluir que el ligante asfáltico tiene una clasificación MSCR como se observa en la Tabla 34.

Tabla 34
Clasificación MSCR ligante pen 60/70

Parámetro	Método de ensayo	Jnr	Jnr diff	Clasificación
		3200kPa	%	
Fluencia no recuperable a 64°C	D7405	1.83	22.80	H (Tráfico Pesado)

Nota. En la tabla se encuentra la clasificación del ligante por Jnr

Luego se presenta la clasificación por grado de desempeño del ligante teniendo las siguientes características: el grado de desempeño es un PG 64-22, con una temperatura superior de 64°C , una temperatura intermedia de 22°C, una temperatura inferior de -22°C y la clasificación MSCR a 64°C de H (Tráfico Pesado), como se puede observar seguidamente en la Tabla 35.

Tabla 35
Clasificación ligante PG pen 60/70

Clasificación PG	
Grado de desempeño	PG 64- 22
Temperatura Superior(°C)	64
Temperatura Intermedia (°C)	22
Temperatura Inferior (°C)	-22
Clasificación MSCR a 64°C	H

Nota. En la figura se presenta la clasificación del ligante asfáltico por grado de desempeño. Estos resultados quieren decir que el ligante asfáltico como PG64-22 tiene un buen desempeño cuando trabaje a temperaturas altas como 64°C y temperaturas bajas como a -22°C.

4.1.2. Ligante asfáltico con 2.5% de nanotubos de carbono de pared múltiple

4.1.2.1. Caracterización física

El ligante asfáltico pen 60/70 con la adicción de 2.5% de nanotubos de pared múltiple tiene una caracterización física con una penetración a 25°C de 60dmm, viscosidad de 505 cP, un punto de ablandamiento de 48.2°C, un punto de inflamación de 298°C y una ductibilidad de 13cm, como se presenta en la Tabla 36.

Tabla 36

Caracterización física ligante asfáltico con 2.5% de mwntc

Caracterización física	
Características	Resultados
Penetración, 25°C, 100g, 5seg	60 dmm
Viscosidad Brookfield, 135°C	505 cP
Punto de Ablandamiento	48.2 °C
Punto de Inflamación	298 °C
Ductibilidad, 25°C, 5cn/min + RTFOT	13 cm

Nota. En la tabla se presenta la caracterización física del ligante asfáltico con 2.5% de mwntc

4.1.2.2. Caracterización Reológica

La caracterización reológica del ligante asfáltico con 2.5% de nanotubos de carbono de pared múltiple en la clasificación MSCR tiene una temperatura de prueba de 64°C, un porcentaje promedio de recuperación a 0.100kPa de 15.87%, un porcentaje promedio de recuperación a 3.200kPa de 6.21%, una diferencia entre el porcentaje promedio de la diferencia de 0.100kPa y 3.200kPa de 60.88%, un Jnr a 0.1Kpa de $1.07kPa^2$, un Jnr a 3.2 kPa de $1.31 kPa^2$ y una diferencia de porcentaje de Jnr de 22.80% como se observa en la Tabla 37., estos datos nos permiten determinar el tráfico que puede soportar el ligante.

Tabla 37
Clasificación MSCR del ligante asfáltico + 2.5% mwntc

Parámetro	Resultado
Temperatura Prueba	64 °C
Porcentaje promedio de recuperación a 0.100kPa	15.87%
Porcentaje promedio de recuperación a 3.200 kPa	6.21%
Diferencia entre el Porcentaje promedio de diferencia de 0.100kPa y 3.200kPa (ΔJnr)	60.88%
Jnr a 0.1kPa	1.07 kPa ²
Jnr a 3.2 kPa	1.31 kPa ²
Diferencia de porcentaje de Jnr 0.1kPa y Jnr 3.2kPa	22.80%

Nota. En la tabla se observan los resultados obtenidos por el ensayo MSCR del ligante asfáltico con 2.5% de nanotubos de carbono de pared múltiple.

De acuerdo con los resultados y a la normativa ASTM D7405, identificamos el tipo de tráfico que resiste el ligante asfáltico, con lo expuesto anteriormente se tiene que la variación del porcentaje de Jnr debe ser menor a 75% y el Jnr del ligante es de 22.80% el cual cumple con la condición, seguidamente se identifica el Jnr a 3.200kPa el cual es 1.31kPa² el cual cumple con la condición donde Jnr es mayor a 1.0 y menor a 2.0 ,se concluye que el ligante asfáltico con nanotubos de carbono puede soportar un tráfico Pesado.

$$\Delta Jnr < 75\%$$

$$\Delta Jnr = 22.80\% \text{ cumple } \checkmark$$

$$Jnr \text{ a } 3.2 \text{ Pa} = 1.31 \text{ kPa}^2$$

Si: $Jnr < 0.5$ Tráfico extremo (E)

$0.5 < Jnr < 1.0$ Tráfico Muy Pesado (V)

$1.0 < Jnr < 2.0$ Tráfico Pesado (H)

$2.0 < Jnr < 4.0$ Tráfico Estándar (S)

Jnr = 1.31 por lo tanto podemos afirmar que el ligante puede soportar un tráfico muy pesado. Se obtiene los siguientes resultados finales:

De acuerdo con el Jnr podemos identificar que el ligante asfáltico con 2.5% de nanotubos de pared múltiple tiene una clasificación MSCR como se muestra en la Tabla 38.

Tabla 38

Clasificación MSCR del ligante + 2.5% mwntc

Parámetro	Método de ensayo	Jnr 3200 kPa	Jnr diff %	Clasificación
Fluencia no recuperable a 64°C	D7405	1.31	22.80	H (Tráfico Pesado)

Nota. En la tabla se encuentra la clasificación del ligante +2.5% con nanotubos de carbono por Jnr.

Se presenta la clasificación de ligante asfáltico con 2.5 % de nanotubos de carbono de pared múltiple con grado de desempeño de PG 64-22, una temperatura superior de 64°C , una temperatura intermedia de 22°C, una temperatura inferior de -22°C y una clasificación MSCR a 64°C de H(Tráfico Pesado), como se muestra en la Tabla 39.

Tabla 39

Clasificación PG del ligante + 2.5% mwntc

Clasificación PG	
Grado de desempeño	PG 64- 22
Temperatura Superior(°C)	64
Temperatura Intermedia (°C)	22
Temperatura Inferior (°C)	-22
Clasificación MSCR a 64°C	H

Nota. En la tabla se clasifica por grado de desempeño el ligante con 2.5 % nanotubo de carbono de pared múltiple. Estos resultados quieren decir que el ligante asfáltico como PG64-22 tiene un buen desempeño cuando trabaje a temperaturas altas como 64°C y temperaturas bajas como a -22°C.

4.2. Análisis de resultados

De acuerdo con los resultados presentados en el punto 4.1 se observa que el ligante con 2.5 % de nanotubos de carbono de pared múltiple en su caracterización física y reológica presenta una mejora en su caracterización física en la viscosidad en un 3.06%, en el punto de inflamación en un 6.43%; y en su caracterización reológica mejora Jnr en un 28.73%, esto indica que el ligante presenta una mejoría gracias a el efecto de la adición de los nanotubos de carbono.

De acuerdo con el antecedente recopilado de Rubio. M (2017). *Desempeño de mezcla HMA-2 modificada con nanotubos de carbono*. México.

“Los nanotubos de carbono muestran un incremento de propiedades mecánicas en un 34%, un incremento de elasticidad, y mejora de viscosidad.”

Al realizar la comparación de los resultados del ligante asfáltico con 2.5% de nanotubos de carbono de pared múltiple frente a la mezcla asfáltica HMA-2 modificada con nanotubos de carbono se observa que ambas mezclas mejoran la viscosidad comprobando que el antecedente y la investigación realizada tienen una similitud de beneficios gracias a la adicción de los nanotubos de carbono.

4.2.1. Contrastación de hipótesis

De acuerdo con la primera hipótesis específica; Evaluando el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple se determina la mejora de su caracterización física. Los resultados presentan que de acuerdo a su penetración los dos asfaltos se encuentran en un asfalto Pen 60/70, de acuerdo a su viscosidad de que el ligante asfáltico con nanotubos de carbono

aumento en 15 Cp es decir tiene una mejor fluidez a altas temperaturas por lo cual su desempeño es mejor para operaciones de bombeo y mezclas; por el punto de ablandamiento disminuye en 0.3°C esto demuestra que el ligante asfáltico con nanotubos de carbono tiene una mejor resistencia a la deformación a altas temperaturas, por el punto de inflamación aumenta en 18°C esto quiere decir que el ligante con nanotubos puede ser manejado a más altas temperaturas lo cual ayuda a un mejor almacenaje y transporte de material, esto se evidencia en la Tabla 40.

Por lo cual se afirma que la hipótesis específica 1 es correcta ya que el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple mejora su caracterización física gracias a los nanotubos de carbono.

Tabla 40
Comparación de caracterización física

Característica	Ligante Pen 60/70	Ligante asfáltico + 2.5	Variación (B-A)
	A	% mwntc B	
Penetración	63dmm	60dmm	-3dm
Viscosidad	490 cP	505 cP	15Cp
Pto de ablandamiento	48.5 °C	48.2 °C	-0.3
Pto de inflamación	280 °C	298 °C	18°C

Nota. En la tabla se presenta la caracterización física del ligante asfáltico

De acuerdo con la segunda hipótesis específica, Determinando el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple se identifica su caracterización reológica. Los resultados presentan en la Tabla 41 que el ligante asfáltico con nanotubos de carbono tiene mejor porcentaje promedio de recuperación a 0.100kPa y 3.200kpa con una disminución de 0.82% y 0.96 % esto indica que la recuperación elástica es mejor. Asimismo, se observa que el ligante con nanotubos de carbono tiene un menor J_{nr} a 0.1kPa y a 3.2 kPa con una disminución de $-0.24kPa^2$ y $0.52kPa^2$, cuando J_{nr} es menor nos indica que el ligante con nanotubos tiene menor deformación permanente por lo cual este ligante tiene un mejor desempeño a cargas.

En la Tabla 42, podemos observar que los dos asfaltos tienen el mismo grado de desempeño PG 64- 22, esto quiere decir que el ligante con nanotubos y la ligante virgen tienen el mismo desempeño a las temperaturas altas a 64°C a temperaturas intermedias a 22°C y a temperaturas bajas de -22°C.

Por lo cual se afirma que la hipótesis 2 es correcta, a pesar de que el ligante asfáltico con nanotubos y el ligante asfáltico convencional tienen el mismo PG clasificado por el Manual de carreteras EG -2013, se observa una mejora en la recuperación elástica y deformación permanente en el ligante con nanotubos de carbono.

Tabla 41
Comparación MSCR de caracterización reológica.

Característica	Ligante Pen 60/70	Ligante asfáltico + 2.5% mwntc	Variación
	A	B	(B-A)
Temperatura de prueba	64°C	64°C	0°C
Porcentaje Promedio de recuperación a 0.100kPa	15.05%	15.87%	0.82%
Porcentaje Promedio de recuperación a 3.200kPa	5.25%	6.21%	0.96%
Jnr a 0.1kPa	1.46kPa ²	1.07kPa ²	-0.24kPa ²
Jnr a 3.2 kPa	1.83kPa ²	1.31kPa ²	-0.52kPa ²
Porcentaje de diferencia Δ Jnr	25.47%	22.80%	-2.67%

Nota. En la tabla se presenta la comparación y variación del ensayo MSCR.

Tabla 42
Comparación PG de caracterización reológica

Característica	Ligante Pen 60/70	Ligante asfáltico + 2.5% mwntc	Variación (B-A)
	A	B	
Grado de desempeño	64-22	64-22	0
Temperatura Superior	64	64	0
Temperatura Intermedia	22	22	0
Temperatura Inferior	-22	-22	0
Clasificación MSCR	H	H	0

Nota. En la tabla se presenta la comparación de PG y su variación.

De acuerdo con la tercera hipótesis específica. Evaluando las características físicas y reológicas entre el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple y el ligante asfáltico convencional se identifica la capacidad de mejora. De acuerdo con los resultados de la Tabla 40 y 41, se define las capacidades específicas de mejora de la caracterización física y reológica. En la Tabla 43 se observa que la variación de viscosidad aumenta en un 3.06%, el punto de ablandamiento en 6.43 % y el Jnr en 28.73%, Se puede afirmar que el Jnr es la característica del ligante más representativa que ha mejorado gracias a la adicción de los nanotubos de carbono.

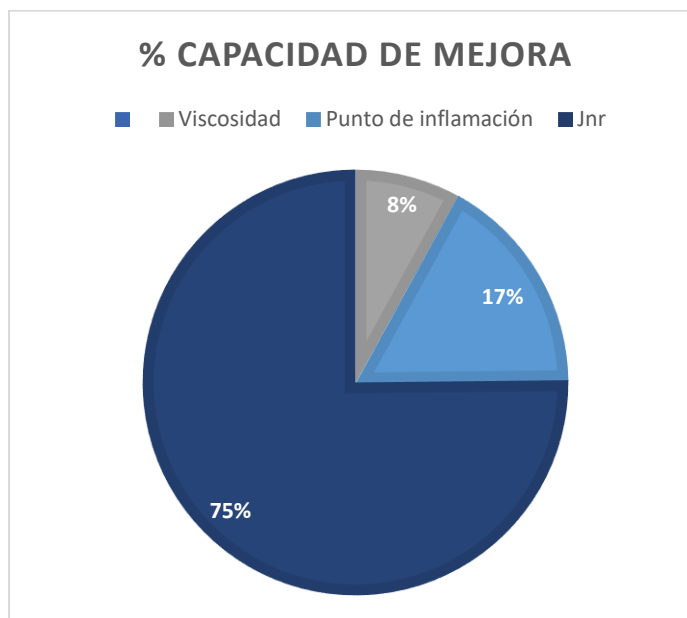
Por lo cual se afirma que la hipótesis específica 3 es correcta ya que la capacidad de mejora se presentó en 3 características específicas.

Tabla 43
Capacidad de mejora

Característica	Ligante asfáltico pen 60/70 A	Ligante asfáltico +2.5% mwntc B	Variación (B-A)	% de Variación
Viscosidad	490 cP	505 cP	15cP	3.06%
Punto de inflamación	280°C	298°C	18°C	6.43%
Jnr	1.81kPa	1.31kPa	0.52kPa	28.73%

Nota. En la tabla se presenta las capacidades de mejora del ligante.

Figura 73
%Capacidad de mejora



Nota. En la figura se observa que el porcentaje de mejora de la caracterización física y reológica. El más representativo es el de Jnr.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

1. De acuerdo con los resultados encontrados en los ensayos de laboratorio se determina que el ligante asfáltico con 2.5% de nanotubos de pared múltiple mejoran su caracterización física y reológica expuesto en Tabla 40, Tabla 41 y Tabla 43.
2. El ligante asfáltico con 2.5% de nanotubos de carbono de pared múltiple mejora su caracterización física aumento en su viscosidad en 15 Cp, que permite una mejor fluidez del ligante a altas temperaturas que permite un mejor bombeo y mezclas, en su punto de ablandamiento con la disminución de 0.3°C permitiendo una mejor resistencia a la deformación permanente a altas temperaturas; en su punto de inflamación con un incremento de 18°C que permite ser manipulado a más altas temperaturas mejorando su forma de almacenaje y transporte, expuesto en la Tabla 40.
3. El ligante asfáltico con 2.5% de nanotubos de carbono de pared múltiple mejora su caracterización reológica, presentan un mejor porcentaje de recuperación elástica en 0.82% y 0.96 %, mejora su capacidad a la deformación permanente con la disminución del Jnr en $-0.24kPa^2$ Y $0.52 Pa^2$, señalado en la Tabla 41.
4. Evaluando las características físicas y reológicas del ligante entre asfáltico con 2.5% de nanotubos de carbono de pared múltiple y el ligante convencional se identifica tres capacidades específicas de mejora con una variación de la viscosidad en 3.06%, en el punto de ablandamiento de 6.43% y en el Jnr en 28.73%, de acuerdo con la Tabla 43.

Recomendaciones:

1. Se recomienda realizar ensayos con 3% y 4% de nanotubos de carbono de pared múltiple ya que en la investigación se observa de que el J_{nr} es 1.81kPa que es un valor que soporta un tránsito pesado (H), sin embargo este rango de J_{nr} es de 1kPa hasta 2kPa , esto quiere decir que el J_{nr} hallado en la investigación con un ligero porcentaje más alto de nanotubos puede llegar al rango de 0.5kPa hasta 1.0kPa alcanzado un valor de soporte de tránsito muy pesado (V), lo cual generaría una oportunidad para realizar diseños de mezclas asfálticas incluyendo nanomateriales, ya que esto mejoraría notablemente una mejor respuesta a la deformación permanente y mejor desempeño de pavimentos ante cargas.
2. El uso de los nanotubos de carbono de pared múltiple mejora sus características físicas y reológicas en una ligera proporción, sin embargo, se recomienda realizar ensayos de laboratorio con otras proporciones de nanotubos de carbono para poder identificar la máxima capacidad de mejora de estos nanomateriales el ligante asfáltico.
3. Se recomienda realizar el análisis termogravimétrico (TGA) para poder evaluar la pérdida o ganancia de las temperaturas de los ligantes asfálticos con la adición de los nanotubos de carbono y poder evaluar el % de pérdida de peso, y la estabilidad térmica del material.
4. Se recomienda realizar ensayos con otros tipos de nanomateriales como nanosilice, nanoarcillas, nano grafeno para poder determinar nuevas capacidades de mejora en la caracterización física y reológica del asfalto en el Perú.
5. Promover el uso de los nanotubos de carbono a ensayos de mezclas asfálticas para poder terminar el comportamiento mecánico del nanomaterial.

REFERENCIAS DOCUMENTARIAS

Referencias bibliográficas

Aldazabal. A. (2019) *El 80% de las carreteras del Perú está en mal estado*. *Diario Correo*. Recuperado de: <https://diariocorreo.pe/economia/ccl-el-80-de-las-carreteras-del-peru-esta-en-mal-estado-876224/?ref=dcr>

American association of state highway and transportation officials. (2019). *AASHTO T315*. Recuperado de: https://www.academia.edu/26054753/AASHTO_T315-10_Determining_the_Rheological_Properties_of_Asfhalt_Binder_Using_a_Dynamic_Shear_Rheometer_DSR

American society for testing and materials. (2005) *ASTM D5*. Recuperado de: https://www.astm.org/d0005_d0005m-13.html

American society for testing and materials. (1995). *ASTM D36*. Recuperado de: <https://www.astm.org/Standards/D36>

American society for testing and materials. (2008). *ASTM D113*. Recuperado de: <https://www.astm.org/Standards/D113>

American society for testing and material. (2013). *ASTM D4402*. Recuperado de: https://www.astm.org/d4402_d4402m-15.html

American society for testing and material (2017). *ASTM D2872*. Recuperado de: <https://www.astm.org/Standards/D2872>

American association of state highway and transportation officials (2016). *AASHTO R28*. Recuperado de: <https://www.ccil.com/wp-content/uploads/2019/01/AASHTO-R28-12-2016-Oct-2018.pdf>

American society for testing and material (2016). *ASTM D 6648*. Recuperado de: https://infostore.saiglobal.com/en-us/standards/astm-d-6648-2008-r2016-153544_saig_astm_astm_2647223/

Ald Automotive (2020) *Cómo afecta el mal estado de las carreteras a la seguridad en el vehículo*. Recuperado de: <https://www.aldautomotive.pe/sobre-ald/noticias/ArticleID/3124/C%C3%B3mo-afecta-el-mal-estado-de-las-carreteras-a-la-seguridad-en-el-veh%C3%ADculo>

Andino. C. (2016). *Mezclas bituminosas modificadas por adición de nanopartículas*. Universidad de las Fuerzas Armadas. Sangolquí. Ecuador. Recuperado de: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12103/1/T-ESPE-053392.pdf>

Anwar, W., Ahmad, N., Khitab, A., Faizan, M., Tayyab, S., Saeed, M., & Imran, M. (2021, April). *Performance augmentation of asphalt binder with multi-walled carbon nanotubes*.

In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport (Vol. 174, No. 2, pp. 130-141).

Thomas Telford Ltd. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/12/6523/htm>

Balandrán-Quintana, René R, Romero-Villegas, Gabriel Iván, Mendoza-Wilson, Ana M, & Sotelo-Mundo, Rogerio R. (2008). *Nanotubos de carbono y bionanotecnología. Interciencia*, 33(5), 331-336. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/339/33933503.pdf>

Blankenship, Adenrson, Elwarday, Hajj, King (2019). *Propiedades químicas y reológicas del campo envejecido aglutinantes y su variación dentro del curso de uso*. Recuperado de: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/14680629.2021.1994450>

Bernucci, B., Motta, G., Ceratti, P., Soares, B., (2008) *Pavimentación Asfáltica*. Recuperado de: https://www.academia.edu/21661995/Pavimenta%C3%A7%C3%A3o_Asf%C3%A1ltica_Forma%C3%A7%C3%A3o_B%C3%A1sica_para_Engenheiros

Camargo A. y Manchego M. (2017). *Análisis experimental del comportamiento en estado fresco y estado endurecido de una matriz cementicia, adicionada con nanocompuestos de carbono*. Pontificia Universidad Javeriana. Colombia. Recuperado de: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/36824/CamargoRoaArlethMildre2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Candia D. y Ccorahua V. (2019). *Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica modificada con nanotubos de carbono con respecto a una mezcla asfáltica convencional, según el método. Marshall*. Universidad Andina del Cuzco -Perú. Recuperado de: https://repositorio.uandina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12557/4087/Daysi_Vladimir_Tesis_bachiller_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Caro Spinel S. (2011). *Evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas empleando propiedades termodinámicas*. Recuperado de: <https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/14603>

Casanova, L. (2018) *Empleo de mezclas asfálticas modificadas con nanotecnología para el mejoramiento de la estructura de pavimento flexible en la construcción de los terceros carriles de la vía Bucaramanga- Cuestaboba*. Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Ingeniería. Especialización de Ingeniería de Pavimentos. Colombia. Recuperado de: <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/17065>

Collins y Avouris, 2000; Baughman ,2002, *Nanotubos de Carbono La ruta a sus Aplicaciones*. Recuperado de: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1060928>

Jiménez. A. (2012). *Mejoramiento del asfalto 60/70 y la mezcla asfáltica mdc-2 con nanotubos de carbono, obtenidos a partir de metano vía catalítica*. Pontificia Universidad

Javeriana. Facultad de Ingeniería Civil. Bogotá Colombia. Recuperado de:
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/12682/JimenezTellezGabrielAlejandro2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Kuennem T. (2004). *La ciencia pequeña puede traer grandes cambios a las carreteras*. Recuperado de : <https://trid.trb.org/view/704809>

Kumar A., Thangavelu K. y Dhananjeyan V. (2020). *Nanotubos de carbono, síntesis, propiedades y aplicaciones*. Recuperado de: <https://www.intechopen.com/chapters/72939>

Leiva-Villacorta, F., Aguiar-Moya, J. P., Villegas-Villegas, R. E., Salazar-Delgado, J., & Loría-Salazar, L. G. (2014). *Nano-materiales en el desempeño del Asfalto*. Recuperado de: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/570>

Llanos. D. (2017). *Los nanotubos de carbono como nueva alternativa de aplicación para mejorar la resistencia a la fatiga o reducir fisuramiento en diseño de pavimentos rígidos con concreto hidráulico*. Universidad técnica particular de Loja. Loja. Ecuador. Recuperado de: <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/20.500.11962/21315/1/Llanos%20Rodr%C3%ADguez%2c%20Daniel%20Alexander.pdf>

Luna, M. (2017) *Asfalto modificado con nanosustancias*. Universidad nacional Autónoma de México. Facultad de ingeniería. Ciudad de México. Recuperado de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/12693/TESINA%20ODE%20LUNA%20GUTIERREZ%20MARTIN%20UBILFREDO.pdf?sequence=1>

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. “Especificaciones generales para la construcción”, (EG-2013) *Manual de Carreteras*. Recuperado de: [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-01-13%20Especificaciones%20Tecnicas%20Generales%20para%20Construcci%C3%B3n%20-%20EG-2013%20-%20\(Versi%C3%B3n%20Revisada%20-%20JULIO%202013\).pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-01-13%20Especificaciones%20Tecnicas%20Generales%20para%20Construcci%C3%B3n%20-%20EG-2013%20-%20(Versi%C3%B3n%20Revisada%20-%20JULIO%202013).pdf)

Miro Recasens R. (1994) *Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo de cántabro*. Recuperado de : https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6623/03_miroRecasens_capitol2.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Pérez. V. (2016) *Mezclas asfálticas con betunes modificados con nanotubos de carbono. Diseño y propiedades*. Recuperado de: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23913/mezclas_C_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Quintero. R. (2014). *Asfalto modificado con nanocomposito de sbs/mmwcnt y el procedimiento para su obtención*. Corporación para la investigación y desarrollo de asfaltos en el sector transporte e industrial. Santander. Colombia. Recuperado de: <https://patentimages.storage.googleapis.com/ee/28/f7/693c3650a2a0e0/WO2014029372A2.pdf>

R.Sampieri.(2015) 6ta ed. *Metodología de la investigación* México. Recuperado de: <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>

Rubio. M. (2017). *Desempeño mecánico de una mezcla HMA-2 modificada con nanotubos y nanofibras de carbono con proceso y sin proceso de purificación*. México. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v37n2/0120-5609-iei-37-02-00099.pdf>

Sierra H. & Mejía U. (2017), *Estado del arte de mezclas asfálticas modificadas en los últimos 10 años: Caso de estudio universidades de Bogotá D.C.* Recuperado de : <http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00003837.pdf>

Superintendencia de Transporte Terrestre de Personas, Carga y Mercancías. (2021). *Reporte estadístico N°004-2021-Accidentes de tránsito ocurridos en carreteras a febrero del 2021.* <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2008474/Reporte%20Estad%C3%ADstico%20N%C2%B004-2021%20-%20Accidentes%20de%20tr%C3%A1nsito%20ocurridos%20en%20carreteras%20%28a%20febrero%20del%202021%29.pdf.pdf>

Villacorta.F (2014). *Nano materiales en el desempeño del Asfalto*. Laboratorio Nacional de materiales y modelos estructurales. Universidad de Costa Rica. San José. Costa Rica. Recuperado de: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/xmlui/bitstream/handle/50625112500/570/2014%20Nano-materiales%20en%20el%20desempe%C3%B1o%20del%20Asfalto.pdf?sequence=1>

ANEXOS

ANEXO 1: DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD	126
ANEXO 2: MATRIZ DE CONSISTENCIA	127
ANEXO 3: INFORME DE ENSAYOS PEN 60/70 + 2.5% MWNTC A	128
ANEXO 4: INFORME DE ENSAYOS PEN 60/70 + 2.5% MWNTC B	130
ANEXO 5: REPORTE DE ANÁLISIS PEN 60/70 TANQUE 333B	134
ANEXO 6: INFORME ENSAYO ASFALTO PEN 60/70 SIN ADITIVO	136
ANEXO 7: CARACTERIZACIÓN LIGANTE ASFÁLTICO PEN 60/70 + RTFOT... ..	139
ANEXO 8 CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE MWNTC	150
ANEXO 9: IMPORTACIÓN DE NANOTUBOS	151

ANEXO 1: DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

ANEXO 2: MATRIZ DE CONSISTENCIA

Título: Ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple para determinar su caracterización física y reológica.

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones e Indicadores	Metodología
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable independiente		<u>Método de investigación</u> Deductivo
¿De qué manera el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple mejora su caracterización física y reológica?	Evaluar el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple para determinar su caracterización física y reológica.	Evalutando el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple se determina su caracterización física y reológica.	Ligante asfáltico con nanotubos de carbono	% de nanotubos de carbono de pared múltiple	<u>Enfoque de la investigación</u> Mixto <u>Orientación de la investigación</u>
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable dependiente	Dimensiones e Indicadores	Aplicada <u>Tipo de investigación</u>
¿De qué manera el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple mejora su caracterización física?	Evaluar el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple a fin de determinar su caracterización física.	Evalutando el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple se determina la mejora de su caracterización física.	Caracterización física y reológica	D1: Caracterización física	Descriptiva <u>Nivel de investigación</u>
¿De qué manera el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pares múltiple mejora su caracterización reológica?	Determinar el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple a fin de identificar su caracterización reológica.	Determinando el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple se identifica la mejora de su caracterización reológica.		I1: Resistencia a la rotura I2: Temperatura de Fluidez I3: Ductibilidad I4: Punto de inflamación I5: Viscosidad	<u>Diseño de la investigación</u> Experimental, Transversal y prospectiva
¿De qué manera la evaluación de las características físicas y reológicas entre el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple y el ligante convencional identifica la capacidad de mejora?	Evaluar las características físicas y reológicas entre el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple y el ligante asfáltico convencional a fin de identificar su capacidad de mejora.	Evalutando las características físicas y reológicas entre el ligante asfáltico con nanotubos de carbono de pared múltiple y el ligante asfáltico convencional se identifica la capacidad de mejora.		D2: Caracterización reológica Recuperación elástica I6: Reflexión a la flexión I7: Grado de desempeño	<u>Población y Muestra</u> Ligante asfáltico con 2.5% de nanotubos de carbono de pared múltiple

ANEXO 3: INFORME DE ENSAYOS PEN 60/70 + 2.5% MWNTC A

**INFORME DE ENSAYOS****AT-006-A-2022**

Muestra : PEN 60-70 con 2.5% de mntc
Cliente : María Cristina Adatao Barzola
Fecha de Ingreso : 2 de Febrero del 2022
Referencia : Tesis de Maestría

Tabla N°1. Ensayos al ligante asfáltico

Ensayo	Resultado	Unidades
Penetración, 25°C, 100 g, 5 seg	60	dmm
Viscosidad Brookfield, 135°C	505	cP
Punto de Ablandamiento	48.2	°C
Punto de Inflamación	298	°C

Tabla N°2. Ensayos al ligante asfáltico después de Película Fina Rotatoria

Ensayo	Resultado	Unidades
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min	13	cm

**Métodos de ensayo:**

- *ASTM D-5* : *Penetración de materiales bituminosos.*
- *ASTM D-36* : *Punto de ablandamiento de bitumen (aparato anillo y bola).*
- *ASTM D-92* : *Punto de inflamación y llama por el probador de copa abierta Cleveland.*
- *ASTM D-113* : *Ductilidad de materiales bituminosos.*
- *ASTM D 4402* : *Viscosidad dinámica de asfaltos.*
- *ASTM D 2872* : *Efecto de calentamiento y ventilación en asfaltos, RTFOT.*

Ing. Wendy Herencia
Jefe de Área Técnica

Lurin, 15 de Febrero del 2022

ANEXO 4: INFORME DE ENSAYOS PEN 60/70 + 2.5% MWNTC B

**INFORME DE ENSAYOS****AT-006-B-2022**

Muestra : PEN 60/70 con 2.5% de mntc
Solicitante : Maria Cristina Adauro Barzola
Proyecto : Tesis de Maestría
Fecha de ingreso : 2 de Febrero del 2022

Métodos de ensayo

AASHTO T48/ASTM D 92: Punto de Inflamación

AASHTO T316/ASTM D 4402: Viscosidad dinámica de asfaltos

AASHTO T240/ASTM D 2872: Efecto de calentamiento y ventilación en asfaltos, RTFOT

AASHTO T315/ASTM D 7175: Determinación de propiedades reológicas de ligantes asfálticos mediante el DSR.

AASHTO R 28/ASTM D 6521: Envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos mediante el dispositivo de envejecimiento presurizado (PAV)

ASTM D 6648: Determinación de la rigidez del asfalto con el reómetro de viga flexible (BBR)

ASTM D 7405: Recuperación y fluencia del asfalto a esfuerzos repetidos mediante reómetro de corte dinámico (MSCR)

Tabla N°1. Ensayos al ligante asfáltico

Ensayo	Método de ensayo		Resultado	Unidades
	AASHTO	ASTM		
Punto de Inflamación	T 48	D 92	298	°C
Viscosidad dinámica a 135°C	T 316	D 4402	505	mPa.s

Viscosímetro Brookfield RVDV3T, SC 21, 20 rpm



**Tabla N°2. Determinación del límite superior del grado de desempeño
(Ligante asfáltico sin envejecer)**

Ensayo	Método de ensayo		Resultado	Unidades	Límite Superior
	AASHTO	ASTM			
Módulo de deformabilidad (G*/senδ) 52°C	T 315	D 7175	8.65	kPa	64
Módulo de deformabilidad (G*/senδ) 58°C			3.88	kPa	
Módulo de deformabilidad (G*/senδ) 64°C			1.79	kPa	
Módulo de deformabilidad (G*/senδ) 70°C			0.856	kPa	
Angulo de fase (δ) 52°C			78.0	°	
Angulo de fase (δ) 58°C			80.6	°	
Angulo de fase (δ) 64°C			82.9	°	
Angulo de fase (δ) 70°C			84.7	°	

Temperatura de falla, °C	68.7
--------------------------	------

Tabla N°3. Ensayos al ligante asfáltico

Ensayo	Método de ensayo		Resultado	Unidades
	AASHTO	ASTM		
Cambio de masa RTFOT	T 240	D 2872	-0.294	%

**Tabla N°4. Determinación del límite superior del grado de desempeño
(Ligante asfáltico envejecido RTFOT)**

Ensayo	Método de ensayo		Resultado	Unidades	Límite Superior
	AASHTO	ASTM			
Módulo de deformabilidad (G*/senδ) 58°C	T 315	D 7175	14.4	kPa	70
Módulo de deformabilidad (G*/senδ) 64°C			6.57	kPa	
Módulo de deformabilidad (G*/senδ) 70°C			3.05	kPa	
Módulo de deformabilidad (G*/senδ) 76°C			1.46	kPa	
Angulo de fase (δ) 58°C			71.5	°	
Angulo de fase (δ) 64°C			74.8	°	
Angulo de fase (δ) 70°C			78.0	°	
Angulo de fase (δ) 76°C			80.8	°	

Temperatura de falla, °C	72.7
--------------------------	------



Tabla N°5. Resultados de ensayo Multiple Stress Creep Recovery

(MSCR a 64°C)

Parámetro	Método de ensayo	Resultado	Unidades
Promedio de porcentaje de recuperación a 0.1 kPa	D 7405	15.87	%
Promedio de porcentaje de recuperación a 3.2 kPa		6.21	%
Diferencia entre el promedio de porcentaje de recuperación a 0.1 kPa y 3.2 kPa		60.88	%
Jnr a 0.1 kPa		1.07	kPa ⁻¹
Jnr a 3.2 kPa		1.31	kPa ⁻¹
Diferencia entre Jnr entre 0.1 kPa y 3.2 KPa		22.80	%

Tabla N°6. Resumen de resultados del ensayo de recuperación elástica a diferentes esfuerzos (MSCR) al ligante asfáltico

Parámetro	Método de ensayo	Jnr 3200 kPa	Jnr diff %	Clasificación
Fluencia no recuperable a 64°C	D 7405	1.31	22.80	H

Tabla N°7. Determinación del límite intermedio del grado de desempeño (Ligante asfáltico envejecido RTFOT+PAV)

Ensayo	Método de ensayo		Resultado	Unidades	Temperatura Intermedia
	AASHTO	ASTM			
Módulo de fatiga (G*x senδ) 19°C	R 28	D 6521	6504	kPa	22
Módulo de fatiga (G*x senδ) 22°C			4443	kPa	
Módulo de fatiga (G*x senδ) 25°C			3050	kPa	
Módulo de fatiga (G*x senδ) 28°C			2120	kPa	
Módulo de fatiga (G*x senδ) 31°C			1440	kPa	
Módulo de fatiga (G*x senδ) 34°C			979	kPa	
Angulo de fase (δ) 19°C			35.9	°	
Angulo de fase (δ) 22°C			38.0	°	
Angulo de fase (δ) 25°C			40.1	°	
Angulo de fase (δ) 28°C			42.1	°	
Angulo de fase (δ) 31°C			44.2	°	
Angulo de fase (δ) 34°C			46.3	°	

Temperatura de falla, °C	21.2
--------------------------	------



**Tabla N°8. Determinación del límite inferior del grado de desempeño (BBR)
(Ligante asfáltico envejecido RTFOT+PAV)**

Ensayo	Método de ensayo		Resultado	Unidades	Temperatura Inferior
	AASHTO	ASTM			
Módulo de rigidez (s) -12°C	---	D6648	135	MPa	-22
Módulo de rigidez (s) -18°C			262	MPa	
Valor m estimado (m) -12°C			0.322		
Valor m estimado (m) -18°C			0.285		


Tabla N°9. Clasificación de asfalto según grado de desempeño AASHTO M 320

Grado de desempeño	PG 64 -22
Temperatura Superior (°C)	64
Temperatura intermedia (°C)	22
Temperatura Inferior (°C)	-22
Clasificación MSCR a 64°C según AASHTO M 332	H

Ing. Wendy Herencia
Jefe de Área Técnica

Lurín, 15 de Febrero del 2022

ANEXO 5: REPORTE DE ANÁLISIS PEN 60/70 TANQUE 333B


REPPOL

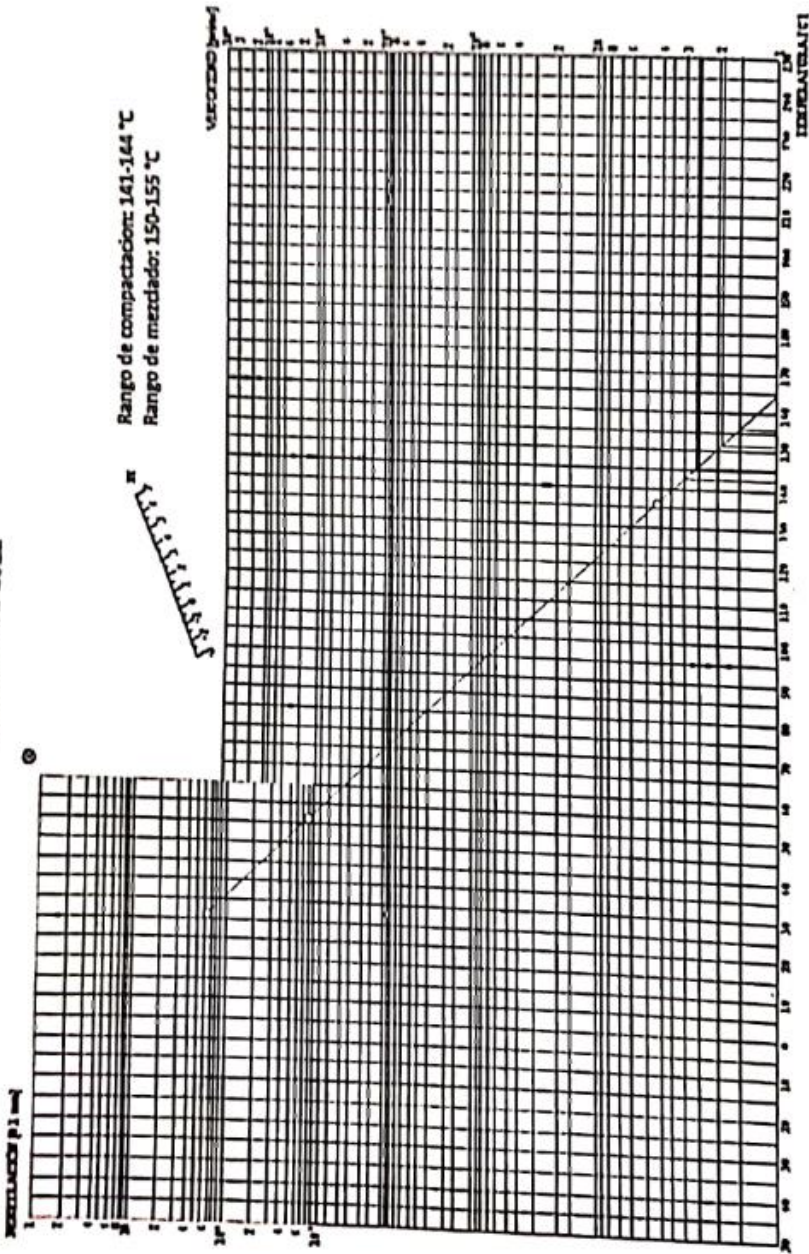
REPORTE DE ANÁLISIS DE CEMENTO ASFÁLTICO 60/70 **LOTE No. 60/70-005-01-2022**

REFINERÍA LA PAMPILLA S.A.A Carretera a Ventanilla km 25 S.N. Ventanilla	RECEPCIÓN DE LA MUESTRA 26/01/2022 01:43:35	FECHA DE CERTIFICACIÓN 26/01/2022 13:51:43
PRODUCTO Cemento Asfáltico 60/70	TANQUE 333B	DESTINO DE PRODUCTO Operaciones de Desembarco
PROCEDENCIA Almacén 1074410	VOLUMEN CERTIFICADO, m ³ 1990	BUQUE TANQUE
PROPIEDADES	MÉTODO	RESULTADO
	ASTM / OTROS	
PENETRACIÓN		
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	D 5 / AASHTO T 49	55
DUCTILIDAD		
Ductilidad a 25 °C, 5 minutos, cm	D 113 / AASHTO T 51	> 150
VOLATILIDAD		
Gravedad Específica a 15.6 °C/15.6 °C	D 70 / AASHTO T 229	1.0221
Punto de Inflamación, °C	D 92 / AASHTO T 48	256.0
Gravedad APL *API	D 70 / AASHTO T 229	6.9
FLUIDEZ		
Punto de Ablandamiento, °C	D 36	50.2
Viscosidad cinemática a 100°C, cSt	D 445	4117
Viscosidad cinemática a 135°C, cSt	D 2170 / AASHTO T 201	424
ENSAYOS DE PELÍCULA FINA		
Pérdida por Calentamiento, % m	D 1754 / AASHTO T 179	0.23
Penetración retenida, 100g, 5s, 1/10 mm, % del original	D 5 / AASHTO T 49	66.2
Ductilidad del residuo a 25°C, 5 minutos, cm	D 113 / AASHTO T 51	64.0
SOLUBILIDAD		
Solubilidad en Dioxolano, % m	D 2042 / AASHTO T 44	99.96
OTROS		
Índice de Penetración	LINE-EN 12591	-0.5
Ensayo de la Mancha (Water-Xtend)	AASHTO T102	20% blanco, negativo
OBSERVACIONES: PRODUCTO CUMPLE CON LAS ESPECIFICACIONES ASTM D840, AASHTO M 30-70 Y NORMA TÉCNICA PERUANA NTP 321.051		

GRÁFICO COMPACTACIÓN PEN 60/70



Cemento Asfáltico 60/70
60/70-005-01-2022



Pedro García M.
Gerente de Laboratorio

ANEXO 6: INFORME ENSAYO ASFALTO PEN 60/70 SIN ADITIVO

**INFORME DE ENSAYOS****Expediente de Servicios AT-004-2022**

Muestra : ASFALTO PEN 60-70 SIN ADITIVO
Cliente :
Fecha de Ingreso : 26-01-2022
Referencia : OS-002-22

Tabla N°1. Ensayos al ligante asfáltico

Ensayo	Resultado	Unidades
Penetración, 25°C, 100 g, 5 seg	63	dmm
Viscosidad Brookfield, 135°C	490	cP
Viscosidad Cinemática, 135°C	502.5	cSt
Viscosidad Absoluta, 60° C	4,171	Po
Ductilidad, 25°C	150	cm
Punto de Ablandamiento	48.5	°C
Punto de Inflamación	280	°C
Solubilidad en Tricloroetileno	99.90	%
Variación de masa	-0.276	%



Métodos de ensayo:

- ASTM D-5 : Penetración de materiales bituminosos.
- ASTM D-36 : Punto de ablandamiento de bitumen (aparato anillo y bola).
- ASTM D-92 : Punto de inflamación y llama por el probador de copa abierta Cleveland.
- ASTM D-113 : Ductilidad de materiales bituminosos.
- ASTM D-2042 : Solubilidad de materiales asfálticos en tricloroetileno.
- ASTM D-2170 : Viscosidad cinemática de asfaltos.
- ASTM D-2171 : Viscosidad absoluta de asfaltos.
- ASTM D 4402 : Viscosidad dinámica de asfaltos.
- ASTM D 2872 : Efecto de calentamiento y ventilación en asfaltos, RTFOT.

Ing. Wendy Herencia
Jefe de Area Técnica

Lurín, 4 de Febrero del 2022



INFORME DE ENSAYOS

Expediente de Servicios AT-007-2022

Muestra : ASFALTO PEN 60-70 SIN ADITIVO
Cliete :
Fecha de Ingreso : 26-01-2022
Referencia : OS-004-22

Tabla N°1. Ensayos al ligante asfáltico

Ensayo	Resultado	Unidades
Penetración, 15°C, 100 g, 5 seg	21	dmm
Penetración, 20°C, 100 g, 5 seg	35	dmm
Penetración, 30°C, 100 g, 5 seg	98	dmm

Métodos de ensayo:

- ASTM D-5 : Penetración de materiales bituminosos.

Ing. Wendy Herencia
Jefe de Area Técnica

Lurín, 4 de Febrero del 2022

ANEXO 7: CARACTERIZACIÓN LIGANTE ASFÁLTICO PEN 60/70 + RTFOT



LABMEP

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL-DA CON REGISTRO N° LE-076

INFORME DE ENSAYO

000084

0039/22
03-02-2022
Pág. 1 de 2

**Información Interna del LABMEP:**

Caracterización del proceso
Caracterización de Cementos Asfálticos

Estudio N.º
L.005.22

Muestra N.º
A0022/22

Fecha de recepción
31-01-2022

Información proporcionada por el cliente:

Nombre del proyecto

Datos del cliente

Muestreo

Fecha de muestreo

Responsabilidad del solicitante

Enero 2022

Tipo de material / Referencia del cliente

Cemento Asfáltico – PEN 60/70

Procedencia

Refinería Pampilla - REPSOL

Informe:

ENSAYO	MÉTODO	RESULTADO [Incertidumbre si aplica]	REPORTE DE ENSAYO N.º
03.01 – Penetración de Materiales Bituminosos / Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials	ASTM D5/D5M-20	Penetración ($\mu 0.1 \text{ mm}$) (25°C) = 61 <i>Ensayo realizado a la muestra de cemento asfáltico original</i>	0078.22
03.10 – Pérdida después del Calentamiento (RTFOT) (*) / Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test) (*)	ASTM D2872 / AASHTO T240	Pérdida después del Calentamiento (Promedio) = RTFOT = 0.142% <i>Ensayo realizado a la muestra de cemento asfáltico original</i>	0079.22
03.01 – Penetración de Materiales Bituminosos / Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials	ASTM D5/D5M-20	Penetración ($\mu 0.1 \text{ mm}$) (15°C) = 18 <i>Ensayo realizado a la muestra envejecida (después del ensayo RTFOT)</i>	0080.22
03.01 – Penetración de Materiales Bituminosos / Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials	ASTM D5/D5M-20	Penetración ($\mu 0.1 \text{ mm}$) (20°C) = 27 <i>Ensayo realizado a la muestra envejecida (después del ensayo RTFOT)</i>	0081.22
03.01 – Penetración de Materiales Bituminosos / Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials	ASTM D5/D5M-20	Penetración ($\mu 0.1 \text{ mm}$) (25°C) = 38 <i>Ensayo realizado a la muestra envejecida (después del ensayo RTFOT)</i>	0082.22
03.01 – Penetración de Materiales Bituminosos / Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials	ASTM D5/D5M-20	Penetración ($\mu 0.1 \text{ mm}$) (30°C) = 54 <i>Ensayo realizado a la muestra envejecida (después del ensayo RTFOT)</i>	0083.22

Todos los ensayos del presente informe de ensayo han sido realizados en las instalaciones del LABMEP, salvo el caso se apliquen subcontrataciones. Los resultados de ensayo presentados se refieren únicamente a la muestra ensayada.

Los resultados del presente informe de ensayo no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

El LABMEP no se responsabiliza cuando la información proporcionada por el solicitante pueda afectar a la validez de los resultados reportados.

Los resultados reportados en el presente informe de ensayo son aplicables a la muestra de acuerdo a las condiciones en que se recibió. El muestreo y entrega de la muestra en las instalaciones del LABMEP son responsabilidad del solicitante.

La fecha de ejecución de los ensayos se indica en los reportes de ensayo adjuntos que forman parte del presente informe.



LABMEP

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL-DA CON REGISTRO N° LE-076

INFORME DE ENSAYO

0039/22
03-02-2022
Pág. 2 de 2



INACAL
I.A. - Perú
Laboratorio de Ensayo
Acreditado

Registro N° LE - 076

03.05 - Ensayo de Viscosidad (Viscosímetro de Brookfield) (*) / Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer (*)	AASHTO T316 / ASTM D4402	Consultar Resultados en Anexos Ensayo realizado a la muestra envejecida (después del ensayo RTFOT)	0084.22
03.17 - Índice de Penetración (*)	RLB / UNE-EN 12591	Índice de Penetración = 1.197 Ensayo realizado a la muestra envejecida (después del ensayo RTFOT)	0085.22
03.02 - Punto de Ablandamiento usando Anillo y Bola (*) / Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus) (*)	ASTM D36	Temperatura A&B (p.2 °C) = 64.4°C Ensayo realizado a la muestra envejecida (después del ensayo RTFOT)	0086.22
03.06 - Peso Específico de Materiales Bituminosos (Método Pícnometro) (*) / Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Asphalt Binder (Pycnometer Method) (*)	ASTM D70	Peso Específico (Promedio del Cemento Asfáltico) = 1.021 g/cm ³ Ensayo realizado a la muestra envejecida (después del ensayo RTFOT)	0087.22

Observaciones: ---

Anexos: 10 Reportes de Ensayo (10 Páginas)

----- FIN DE DOCUMENTO -----

Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización del LABMEP

Todos los ensayos del presente Informe de ensayo han sido realizados en las instalaciones del LABMEP, salvo el caso se apliquen subcontrataciones. Los resultados de ensayo presentados se refieren únicamente a la muestra ensayada.



Los resultados del presente Informe de ensayo no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

El LABMEP no se responsabiliza cuando la información proporcionada por el solicitante pueda afectar a la validez de los resultados reportados.

Los resultados reportados en el presente Informe de ensayo son aplicables a la muestra de acuerdo a las condiciones en que se recibió. El muestreo y entrega de la muestra en las instalaciones del LABMEP son responsabilidad del solicitante.

La fecha de ejecución de los ensayos se indica en los reportes de ensayo adjuntos que forman parte del presente Informe.

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

	REPORTE DE ENSAYO				
	Muestra N.° A0022/22	Reporte N.° 0078 22	Página 1/1	Fecha 21/01/22	
03.01 - Penetración de Materiales Bituminosos ASTM D5/D5M-20					

Fecha de inicio de ensayo: 31/01/2022 Fecha de fin de ensayo: 2/02/2022

CONDICIONES DE ENSAYO

Temperatura de Ensayo	° C	25
Carga Total	g	100
Tiempo de Ensayo	s	5

ENSAYO

Determinación N.°	1	2	3	Promedio
Penetración (mm)	6.09	6.10	6.12	6
Penetración (x0.1 mm)	61	61	61	61

www.motaengil.com.ec es un sitio web integral de un informe de ensayo emitido por el LABMEP

Observaciones:

Ensayo realizado en muestra de cemento asfáltico original.

Elaborado por

Laboratorista

Revisado por

Jefe de Laboratorio


REPORTE DE ENSAYO
Muestra N.º
A0022/22

Reporte N.º
0079.22

Página
1/1

Fecha
2/Feb/22



03.10 - Pérdida después del Calentamiento (RTFOT)
ASTM D2872 / AASHTO T240
Fecha de inicio de ensayo: 31/01/2022

Fecha de fin de ensayo: 2/02/2022

Masa del Vaso (0.001g)	162.730	161.890
Masa de la muestra inicial - Cemento Asfáltico (0.001g)	35.120	35.090
Masa del Vaso + Cemento Asfáltico (0.001g)	197.850	196.980
Masa del Vaso + Cemento Asfáltico después de Calentamiento (0.001g)	197.800	196.930
Pérdida después del Calentamiento - RTFOT (0.001%)	0.142	0.142
Pérdida después del Calentamiento (Promedio) - RTFOT (0.001%)	0.142	

Observaciones:

Ensayo realizado en muestra de cemento asfáltico original.

 MOTAENCIL <small>PERU</small>	REPORTE DE ENSAYO			000088  INACAL <small>E.I.A. - Perú</small> <small>Laboratorio de Ensayo</small> <small>Acreditado</small> <small>Registro N° 12 - 016</small>
	Muestra N.° A0022/22	Reporte N.° 0080.22	Página 1/1	
03.01 - Penetración de Materiales Bituminosos ASTM D5/D5M-20				

Fecha de inicio de ensayo: 31/01/2022 Fecha de fin de ensayo: 2/02/2022

CONDICIONES DE ENSAYO

Temperatura de Ensayo	° C	15
Carga Total	g	100
Tiempo de Ensayo	s	5



ENSAYO

Determinación N.°	1	2	3	Promedio
Penetración (mm)	1.78	1.76	1.75	2
Penetración (x0.1 mm)	18	18	18	18

Este informe de ensayo es propiedad de LABMEP

Observaciones:

Ensayo realizado a la muestra envejecida (después del ensayo RTFOT - 0079.22).

	REPORTE DE ENSAYO				
	Muestra N. A0022/22	Reporte N. 0082.22	Página 1/1	Fecha 2/Feb/22	
03.01 - Penetración de Materiales Bituminosos ASTM D5/D5M-20					

Fecha de Inicio de ensayo: 31/01/2022 Fecha de fin de ensayo: 2/02/2022

CONDICIONES DE ENSAYO

Temperatura de Ensayo	* C	25
Carga Total	g	100
Tiempo de Ensayo	s	5


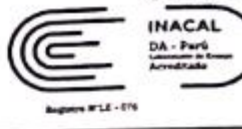
ENSAYO

Determinación N.º	1	2	3	Promedio
Penetración (mm)	3.78	3.75	3.76	4
Penetración (x0.1 mm)	38	38	38	38

Este reporte de ensayo sólo es válido si es parte integral de un informe de ensayo emitido por el LASMEP.

Observaciones:

Ensayo realizado a la muestra envejecida (después del ensayo RTFOT - 0079.22).

 MOTAENCIL PERÚ	REPORTE DE ENSAYO			 INACAL DA - Perú Laboratorio de Ensayos Acreditado Registro N° LE - 076
	Muestra N. A0022/22	Reporte N. 0063.22	Página 1/1	
03.01 - Penetración de Materiales Bituminosos ASTM D5/D5M-20				

Fecha de inicio de ensayo: 31/01/2022 Fecha de fin de ensayo: 2/02/2022

CONDICIONES DE ENSAYO

Temperatura de Ensayo	* C	30
Carga Total	g	100
Tiempo de Ensayo	s	5

ENSAYO

Determinación N.°	1	2	3	Promedio
Penetración (mm)	5.40	5.38	5.39	5
Penetración (x0.1 mm)	54	54	54	54



REPORTE DE ENSAYO

Muestra N.º: A0022/22
 Reporte N.º: 0084.22
 Página: 1/1
 Fecha: 02/Feb/22

03.05 - Ensayo de Viscosidad (Viscosímetro de Brookfield)
 ASTM D4402 / AASTHO T316

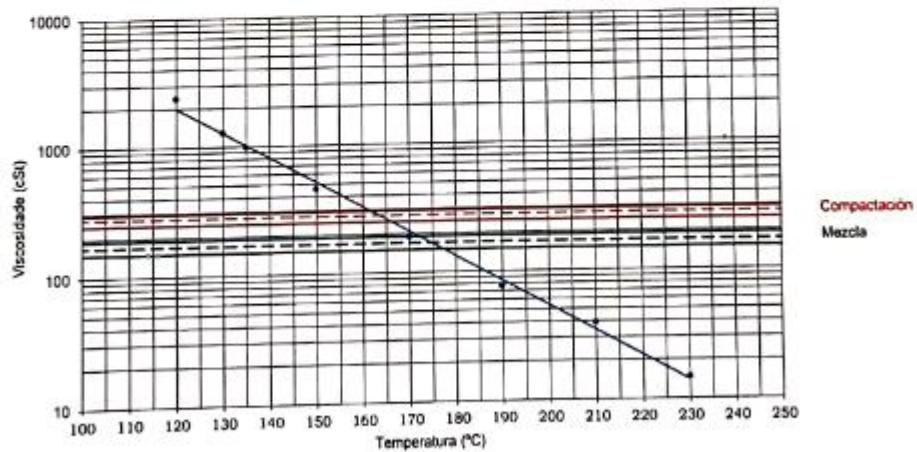
Fecha de inicio de ensayo: 31/01/2022

Fecha de fin de ensayo: 2/02/2022

Tipo de Cemento Asfáltico
PEN 60/70
T _{AMB} (°C)
64.4
Masa Volumétrica (g/cm ³)
1.021
Spindle N.º
21
R.P.M.
20

Temperatura (°C)	Viscosidad Dinámica (cP)	Viscosidad Cinemática (cSt)
120	2460	2409.4
130	1317	1289.9
135	1009	988.2
150	467.5	457.9
170	192.5	188.5
190	78	76.4
210	40	39.2
230	15	14.7

Este informe de ensayo sólo es válido si es parte integral de un informe de ensayo emitido por el LABMEP



Temperatura de Mezcla (°C)	175
Temperatura de Compactación (°C)	163

Observaciones:
 ... muestra anularizada (después del ensayo RTFOT - 0079.22).


REPORTE DE ENSAYO 000093

Muestra N.º
A0022/22

Reporte N.º
0085.22

Página
1/1

Fecha
2/Feb/22

 03.17 - Índice de Penetración
RBL / UNE-EN 12591

DATOS DE LOS ENSAYOS PREVIOS

Penetración de Materiales Bituminosos - ASTM D5		
Penetración (P)	x0.1 mm	38

Punto de Ablandamiento - ASTM D36		
Temperatura (T _{Ab})	°C	64.4

CÁLCULO DE f

$f = \frac{50 \log \left(\frac{800}{P} \right)}{T_{Ab} - 25}$	1.679
--	-------

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE PENETRACIÓN

$IP = \frac{20 - 10f}{1 + f}$	1.197
-------------------------------	-------

Observaciones:

Ensayo realizado a la muestra envejecida (después del ensayo RTFOT - 0079.22).

 MOTAENGL	000094 REPORTE DE ENSAYO		
	Muestra N.° A0022/22	Reporte N.° 0086.22	Página 1/1
03.02 - Punto de Ablandamiento usando Anillo y Bola ASTM D36			

Fecha de inicio de ensayo: 31/01/2022

Fecha de fin de ensayo: 2/02/2022

CONDICIONES DEL ENSAYO

Temperatura inicial del ensayo	°C	5
Tipo de Baño		Agua Destilada

Determinación N.°	1	2	Promedio
Temperatura A&B (0.2 °C)	64.3	64.6	64.4
Temperatura A&B (0.5 °C)	—	—	—

Este informe de ensayo es propiedad de LABMEX por el LABMEX

Observaciones:

Ensayo realizado a la muestra envejecida (después del ensayo RTFOT - 0079.22).



REPORTE DE ENSAYO

Muestra N.º
A0022/22

Reporte N.º
0087.22

Página
1/1

Fecha
2-Feb-22

03.06 - Peso Específico de Materiales Bituminosos (Método Picnómetro)
ASTM D70

Fecha de inicio de ensayo: 31/01/2022

Fecha de fin de ensayo: 2/02/2022

Tipo de Cemento Asfáltico: PEN 60/70

Picnómetro N.º			5	6
Masa del Picnómetro Vacío	A	0.01 g	33.94	32.17
Masa del Picnómetro lleno de Agua Destilada	B	0.01 g	59.97	58.81
Masa del Picnómetro con Cemento Asfáltico	C	0.01 g	50.00	49.06
Masa del Picnómetro con Cemento Asfáltico y Agua Destilada	D	0.01 g	60.31	59.14
Volumen del Picnómetro	$V_p = B - A$	0.01 cm ³	26.03	26.64
Masa del Cemento Asfáltico	$P_b = C - A$	0.01 g	16.06	16.89
Volumen del Picnómetro menos el Volumen ocupado por el Cemento Asfáltico	$V_p = D - C$	0.01 cm ³	10.31	10.08
Volumen ocupado por el Cemento Asfáltico	$V_b = V_p - V_p$	0.01 cm ³	15.72	16.56
Peso Específico del Cemento Asfáltico	$G = P_b / V_b$	0.001 g/cm ³	1.022	1.020
Peso Específico promedio del Cemento Asfáltico		0.001 g/cm ³	1.021	

Este reporte de ensayo es válido si es parte integral de un informe de ensayo emitido por el LABEMEP

Observaciones:

Ensayo realizado a la muestra envejecida (después del ensayo RTFOT - 0079.22).

ANEXO 8 CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE MWNTC

多壁碳纳米管 (MWCNT)



检验报告

Certificate of Analysis

产品名称 Product Name	Multi-Walled Carbon Nanotube	
颜色 Color	黑色 Black	合格 Conform
粒径大小 Particle Size	8-20nm	合格 Conform
长度 Length	5-20um	合格 Conform
含量 Content	>=99%	合格 Conform
PH 值	7-8	合格 Conform
H2O	0.4%	合格 Conform
Cu	<0.8 ppm	合格 Conform
Fe	<1 ppm	合格 Conform
Mo	<0.090%	合格 Conform
Mg	<0.92 ppm	合格 Conform
Ni	<0.085%	合格 Conform
电阻率 Resistivity	948.7uΩ · m	合格 Conform
结论 Conclusion	检验指标符合企业标准 The specifications conform with enterprise standard	
检验人 Main Inspect	何卫 He Wei	
审核人 Verifier	吕清振 Lv Qingzhen	

Tel: (86) 20-87226359, (86) 20-87748917 Fax: (86) 20-66622682
 Website: www.xuzhounano.com E-mail: hwnano@xuzhounano.com

ANEXO 9: IMPORTACIÓN DE NANOTUBOS

HONGWU INTERNATIONAL GROUP LTD

Add: Rm307 Chuangkegu No.43 Tangdong Road East Tianhe Guangzhou GD China

Bill to	: Mr. Alfredo Loo	P/I No.	: PIN220110
Attention to	: Mr. Alfredo Loo	Date	: 2022/Jan/10
Shipment From	: China	P/O No.	:
Destination	: Lima Peru	Terms	: CPT Lima Peru
Shipping Method	: By International Express	Page	: 1 of 1
Delivery Time	: 3-5 days		

PROFORMA INVOICE

CODE	PRODUCT	PRODUCT DESCRIPTIONS	QUANTITY(KG)	RMB/KG	AMOUNT(RMB)
1	MWCNT Powder	Diameter 8-20nm,Length 5-20um 99%	0.25	7200	1800
Shipping Charge					620.00
SAY TOTAL CHINA YUAN (RMB): TWO THOUSAND FOUR HUNDRED AND TWENTY ONLY.					2420.00
PAYMENT TERM	100% ADVANCE T/T BEFORE SHIPMENT TO OUR BANK ACCOUNT (DETAILS AS FOLLOWS) . All the bank transference commision should be paid separately, and the actual arrival amount should be the same to PI!				
BENEFICIARY BANK NAME	Agricultural Bank of China Guangzhou Tian Lang Ming Ju Branch				
BENEFICIARY ACCOUNT NAME	中国农业银行广州天朗明居支行				
BENEFICIARY ACCOUNT NUMBER	SUN XU DONG 孙旭冬 622848 0089764912971				

HONGWU INTERNATIONAL GROUP LTD
HONGWU NANOMETER
XUZHOU JIECHUANG NEW MATERIAL TECHNOLOGY CO., LTD

Alice Liu *For and on behalf of*
HONGWU INTERNATIONAL GROUP LTD
宏武國際集團有限公司


.....
Authorized Signature(s)