

**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS PARA OBTENER
EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

**RESISTENCIA A LA OXIDACIÓN DEL CEMENTO
ASFÁLTICO REFORZADO CON FIBRA
LIGNOCELULÓSICA EN CLIMAS HÚMEDOS DE
AMAZONAS**

**Autores: -Bach. Aguilar Coronel Frank Willy
-Bach. Olivera Gonzales Jerry Ronaldo**

Asesor: Bach. Aguilar Rojas Manuel Eduardo

Registro:-----

CHACHAPOYAS – PERÚ

2024

DEDICATORIA

La presente investigación está dedicada a mis padres, los cuales, con su apoyo incondicional permitieron mi formación y desarrollo profesional.

Jerry Ronaldo Olivera Gonzales.

La presente investigación está dedicada a la memoria de mi querido tío AMILCAR CORONEL YRIGOIN, quien en vida me apoyo para iniciar este sueño. Aunque ya no estés físicamente con nosotros, tu amor, apoyo y sabiduría han sido una fuente inagotable de inspiración. Este logro académico está dedicado a ti, porque sé que desde algún lugar estás sonriendo orgullosamente. Siempre te llevaré en mi corazón, a mis padres, que pese a todas las dificultades que han atravesado, me han ayudado a superar cada reto en mi vida profesional, y también va dedica a mi familia y hermanos los cuales han sido la fuente de fortaleza para continuar las adversidades que la formación profesional conlleva.

Frank Willy Aguilar Coronel.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres, por el apoyo económico que me dieron para poder hacer posible el desarrollo de esta investigación, y también agradezco al laboratorio “HISGEOLAB S.A.C” por no solo permitirme desarrollar nuestra investigación en sus instalaciones, sino también por orientarnos y capacitarnos en el desarrollo de cada ensayo de laboratorio.

Jerry Ronaldo Olivera Gonzales.

Agradezco en primer lugar a Dios, por darme la vida y la salud para poder desarrollar esta investigación, en segundo lugar, a mis padres, quienes me han apoyado económica y emocionalmente, y en último lugar al laboratorio “HISGEOLAB S.A.C” por permitirme desarrollar nuestra investigación en sus instalaciones.

Frank Willy Aguilar Coronel.

**AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ
DE MENDOZA DE AMAZONAS**

**Ph. D. JORGE LUIS MAICELO QUINTANA
RECTOR**

**Dr. OSCAR ANDRÉS GAMARRA TORRES
VICERRECTOR ACADÉMICO**

**Dra. MARÍA NELLY LUJÁN ESPINOZA
VICERRECTORA DE INVESTIGACIÓN**

**Ph. D. RICARDO EDMUNDO CAMPOS RAMOS
DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS



UNTRM

REGLAMENTO GENERAL
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

ANEXO 3-L

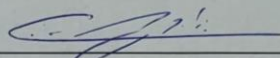
VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

El que suscribe el presente, docente de la UNTRM (X)/Profesional externo (), hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada Resistencia a la Oxidación del Cemento Asfáltico Reforzado con Fibra Lignocelulósica en Climas Húmedos de Amozonas. del egresado Frank Willy Aguilar Coronel de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental Escuela Profesional de Ingeniería Civil de esta Casa Superior de Estudios.



El suscrito da el Visto Bueno a la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de observaciones que formulen en Acta en conjunto, y estar presente en la sustentación.

Chachapoyas, 17 de Junio de 2024


Firma y nombre completo del Asesor

Ing. Manuel Eduardo Aguilar Rojas

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS



UNTRM

REGLAMENTO GENERAL
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

ANEXO 3-L

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

El que suscribe el presente, docente de la UNTRM (X)/Profesional externo (), hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada Resistencia a la Oxidación del Cemento Asfáltico Resortado con fibra lignocelulósica en Climas Húmedos de Amazonas del egresado Olivero Gonzales Jerry RONARDE de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental Escuela Profesional de Ingeniería Civil de esta Casa Superior de Estudios.



El suscrito da el Visto Bueno a la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de observaciones que formulen en Acta en conjunto, y estar presente en la sustentación.

Chachapoyas, 17 de Junio de 2024

Firma y nombre completo del Asesor

Ing. Manuel Eduardo Aguilar Rojas

JURADO EVALUADOR DE LA TESIS



Dr. Edwin Adolfo Díaz Ortiz
PRESIDENTE



Dr. Hugo Alex Bazán Durand
SECRETARIO



Mg. Erik Bazan Trujillo
VOCAL

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS



UNTRM

REGLAMENTO GENERAL
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

ANEXO 3-Q

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

Los suscritos, miembros del Jurado Evaluador de la Tesis titulada:

Resistencia a la Oxidación del Cemento Asfáltico Reforzado
con Fibra Lignocelulósica en Climas Húmedos de Amazonas.

presentada por el estudiante ()/egresado (X) Frank Willy Aguilar Coronel
de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil

con correo electrónico institucional 7757387172@UNTRM.EDU.PE

después de revisar con el software Turnitin el contenido de la citada Tesis, acordamos:

- La citada Tesis tiene 14 % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es menor (X) / igual () al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM.
- La citada Tesis tiene _____ % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es mayor al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM, por lo que el aspirante debe revisar su Tesis para corregir la redacción de acuerdo al Informe Turnitin que se adjunta a la presente. Debe presentar al Presidente del Jurado Evaluador su Tesis corregida para nueva revisión con el software Turnitin.

Chachapoyas, 12 de Julio del 2024

SECRETARIO

PRESIDENTE

VOCAL

OBSERVACIONES: _____

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS



UNTRM

REGLAMENTO GENERAL
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

ANEXO 3-Q

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

Los suscritos, miembros del Jurado Evaluador de la Tesis titulada:

Resistencia a la oxidación del cemento asfáltico recortado con
fibra lignocelulósica en climas húmedos de Amazonas

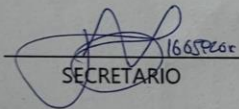
presentada por el estudiante () egresado (X) Jerry Ronaldo Oliveira Gonzales
de la Escuela Profesional de Intendencia Civil

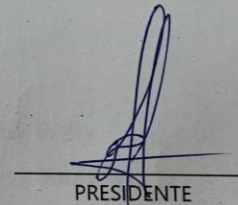
con correo electrónico institucional 7080541381@untrm.edu.pe

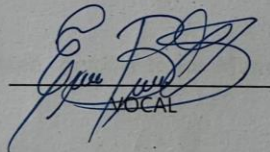
después de revisar con el software Turnitin el contenido de la citada Tesis, acordamos:

- La citada Tesis tiene 14 % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es menor (X) / igual () al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM.
- La citada Tesis tiene _____ % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es mayor al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM, por lo que el aspirante debe revisar su Tesis para corregir la redacción de acuerdo al Informe Turnitin que se adjunta a la presente. Debe presentar al Presidente del Jurado Evaluador su Tesis corregida para nueva revisión con el software Turnitin.

Chachapoyas, 17 de Julio del 2024


SECRETARIO


PRESIDENTE


SOCIAL

OBSERVACIONES:

.....
.....

REPORTE DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS

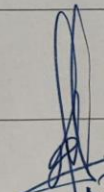
TESIS PARA TURNITIN-16-07-2024.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%	13%	2%	2%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	8%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
3	repositorio.untrm.edu.pe Fuente de Internet	<1%
4	Submitted to Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas Trabajo del estudiante	<1%
5	boletin.imt.mx Fuente de Internet	<1%
6	pdfcookie.com Fuente de Internet	<1%
7	Submitted to Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas Trabajo del estudiante	<1%
8	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1%


Edwin A. Diaz Ortiz
Presidente

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



UNTRM

REGLAMENTO GENERAL
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

ANEXO 3-S

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Chachapoyas, el día 26 de Agosto del año 2024, siendo las 19:00 horas, el aspirante: Aguilar Latorre Frank Willy, asesorado por Ing. Aguilar Rojas Manuel Eduardo defiende en sesión pública presencial () / a distancia () la Tesis titulada: Resistencia a la Oxidación del Cemento Asfáltico Reforzado con Fibra Lignocelulósica en Climas Húmedos de Amazonas, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil, a ser otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas; ante el Jurado Evaluador, constituido por:

Presidente: Dr. Edwin Adolfo Díaz Ortiz
Secretario: Dr. Hugo Alex Bazán Durand
Vocal: Mg. Erik Bazán Trujillo

Procedió el aspirante a hacer la exposición de la Introducción, Material y métodos, Resultados, Discusión y Conclusiones, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la Tesis presentada, los miembros del Jurado Evaluador pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones y objeciones consideraron oportunas, las cuales fueron contestadas por el aspirante.

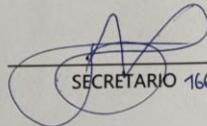
Tras la intervención de los miembros del Jurado Evaluador y las oportunas respuestas del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los presentes en el acto de sustentación, para que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

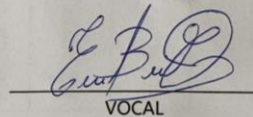
Seguidamente, a puerta cerrada, el Jurado Evaluador determinó la calificación global concedida a la sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional, en términos de:

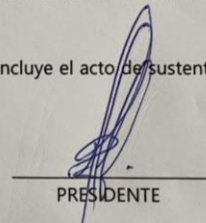
Aprobado () por Unanimidad () / Mayoría () Desaprobado ()

Otorgada la calificación, el Secretario del Jurado Evaluador lee la presente Acta en esta misma sesión pública. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las 19:55 horas del mismo día y fecha, el Jurado Evaluador concluye el acto de sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional.


SECRETARIO 16654260


VOCAL


PRESIDENTE

OBSERVACIONES: _____

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



UNTRM

REGLAMENTO GENERAL
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

ANEXO 3-S

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Chachapoyas, el día 26 de Agosto del año 2024, siendo las 19:00 horas, el aspirante: Olivera Gonzales Terry RONADO, asesorado por Ingr. Aguilar Rojas Manuel Eduardo defiende en sesión pública presencial (X) / a distancia () la Tesis titulada: Resistencia a la Oxidación del Cemento Asfáltico Reforzado con Fibra Lignocelulósica en Climas Húmedos de Amazonas. para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil, a ser otorgado por la Universidad

Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas; ante el Jurado Evaluador, constituido por:

Presidente: Dr. Edwin Adolfo Díaz Ortiz

Secretario: Dr. Hugo Alex Barón Durand

Vocal: Mg. Erik Barón Trujillo

Procedió el aspirante a hacer la exposición de la Introducción, Material y métodos, Resultados, Discusión y Conclusiones, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la Tesis presentada, los miembros del Jurado Evaluador pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones y objeciones consideraron oportunas, las cuales fueron contestadas por el aspirante.

Tras la intervención de los miembros del Jurado Evaluador y las oportunas respuestas del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los presentes en el acto de sustentación, para que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

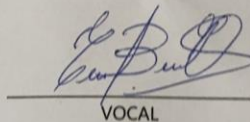
Seguidamente, a puerta cerrada, el Jurado Evaluador determinó la calificación global concedida a la sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional, en términos de:

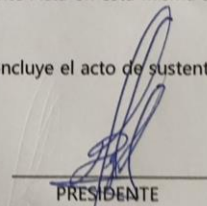
Aprobado (X) por Unanimidad (X)/Mayoría () Desaprobado ()

Otorgada la calificación, el Secretario del Jurado Evaluador lee la presente Acta en esta misma sesión pública. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las 19:55 horas del mismo día y fecha, el Jurado Evaluador concluye el acto de sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional.


SECRETARIO 76559264


VOCAL


PRESIDENTE

OBSERVACIONES: _____

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS	iv
VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS	v
VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS	vi
JURADO EVALUADOR DE LA TESIS	vii
CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS	viii
CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS	ix
REPORTE DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS	x
ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS	xi
ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS	xii
ÍNDICE GENERAL	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xv
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
RESUMEN	xviii
ABSTRACT	xix
I. INTRODUCCIÓN	20
II. MATERIALES Y MÉTODOS	23
II.1. Materiales	23
II.2. Preparación de muestras	24
II.3. Métodos	26
II.3.1. Ensayos de caracterización física	26
II.3.2. Ensayos de caracterización reológica	29
II.3.3. Envejecimiento a corto plazo (RTFOT)	30
II.3.4. Interpolación polinomial	31
II.4. Experimentación	33
II.4.1. Preparación de la fibra lignocelulósica	33
II.4.2. Reforzamiento del Cemento Asfáltico con la fibra lignocelulósica	39
II.4.3. Ensayos de laboratorio	42
III. RESULTADOS	58
III.1. Resultados de caracterización física	58
III.1.1. Resultados del ensayo de punto de ablandamiento	58

III.1.2. Resultados del ensayo de penetración.	59
III.1.3. Resultados del ensayo de ductilidad.	60
III.1.4. Ensayo de viscosidad rotacional.	61
III.2. Resultados de caracterización reológica.	63
III.2.1. Resultado del envejecimiento a corto plazo (RTFOT).	63
III.2.2. Resultados del ensayo de DSR.	64
III.2.3. Resultados de la resistencia oxidativa.	65
III.2.4. Resultados de la simulación numérica.	73
IV. DISCUSIÓN.	76
V. CONCLUSIONES.	79
VI. RECOMENDACIONES.	80
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	81
ANEXOS.	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Pérdida de masa por RTFOT</i>	64
Tabla 2 <i>Resistencia a la oxidación del cemento asfáltico normal</i>	71
Tabla 3 <i>Resistencia a la oxidación del cemento asfáltico reforzado con fibra lignocelulósica</i>	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Cemento asfáltico PEN 85/100.</i>	23
Figura 2	<i>Residuos de poda del café.</i>	24
Figura 3	<i>Fibra lignocelulósica.</i>	25
Figura 4	<i>Alícuotas del cemento asfáltico reforzado.</i>	26
Figura 5	<i>Penetrómetro.</i>	27
Figura 6	<i>Equipo para punto de ablandamiento TBT-2806F.</i>	28
Figura 7	<i>Ductilómetro.</i>	28
Figura 8	<i>Viscosímetro de Brookfield.</i>	29
Figura 9	<i>Equipo de corte dinámico.</i>	30
Figura 10	<i>Horno de película fina y rotatoria.</i>	31
Figura 11	<i>Ejemplo de código ejecutable en MATLAB.</i>	32
Figura 12	<i>Resumen de metodología.</i>	33
Figura 13	<i>Poda del café.</i>	34
Figura 14	<i>Presecado de los residuos de poda del café.</i>	35
Figura 15	<i>Peso total de la poda recolectada.</i>	35
Figura 16	<i>Recorte de longitud de los residuos de poda del café.</i>	36
Figura 17	<i>Determinación del desperdicio de material.</i>	36
Figura 18	<i>Lavado de los residuos de poda del café con agua destilada.</i>	37
Figura 19	<i>Distribución uniforme para el secado.</i>	37
Figura 20	<i>Secado en horno a temperatura constante de 60°C.</i>	38
Figura 21	<i>Residuos de poda del café triturados.</i>	38
Figura 22	<i>Fibra lignocelulósica obtenida.</i>	39
Figura 23	<i>Adición de fibra lignocelulósica al cemento asfáltico normal.</i>	40
Figura 24	<i>Mezclado del cemento asfáltico normal con el aditivo.</i>	40
Figura 25	<i>Muestras reforzadas con fibra lignocelulósica.</i>	41
Figura 26	<i>Moldes para los ensayos de laboratorio.</i>	41
Figura 27	<i>Recipientes de muestras modificadas para el ensayo de penetración.</i>	42
Figura 28	<i>Enfriamiento de las muestras en baño maría.</i>	43
Figura 29	<i>Indicador en cero-Penetrómetro.</i>	43
Figura 30	<i>Molde de anillos para el ensayo de punto de ablandamiento.</i>	45
Figura 31	<i>Ensayo de punto de ablandamiento para la muestra reforzada con 8% de FL.</i>	46
Figura 32	<i>Temperatura del punto de ablandamiento.</i>	46
Figura 33	<i>Moldes para el ensayo de ductilidad.</i>	47

Figura 34	<i>Moldes cargados con las muestras para el ensayo de ductilidad.</i>	48
Figura 35	<i>Determinación de la ductilidad de las muestras-Ductilímetro.</i>	48
Figura 36	<i>Moldes para el ensayo de viscosidad rotacional.</i>	49
Figura 37	<i>Acoplamiento del rotor al viscosímetro.</i>	50
Figura 38	<i>Lectura de los valores de viscosidad.</i>	50
Figura 39	<i>Moldes para el ensayo de DSR.</i>	52
Figura 40	<i>Moldes cargados con las muestras para el ensayo del DSR.</i>	52
Figura 41	<i>Colocación del molde en el equipo de corte dinámico.</i>	53
Figura 42	<i>Determinación del módulo complejo y el ángulo de fase.</i>	54
Figura 43	<i>Contenedores para el ensayo de envejecimiento a corto plazo.</i>	55
Figura 44	<i>Contenedores cargados con las muestras para el ensayo de RTFOT.</i>	55
Figura 45	<i>Envejecimiento de las muestras en el horno de película fina y rotatoria.</i>	56
Figura 46	<i>Muestras envejecidas de cemento asfáltico recolectadas.</i>	57
Figura 47	<i>Preparación de moldes para ensayos de muestras envejecidas.</i>	57
Figura 48	<i>Instalaciones del laboratorio HISGEOLAB S.A.C.</i>	58
Figura 49	<i>Resultados del ensayo de punto de ablandamiento.</i>	59
Figura 50	<i>Resultados del ensayo de penetración.</i>	60
Figura 51	<i>Resultados del ensayo de ductilidad.</i>	61
Figura 52	<i>Resultados del ensayo de viscosidad rotacional a 135°C.</i>	62
Figura 53	<i>Resultados del ensayo de viscosidad rotacional a 145°C.</i>	62
Figura 54	<i>Resultados del ensayo de viscosidad rotacional a 165°C.</i>	63
Figura 55	<i>Resultados del ensayo de DSR (Módulo complejo).</i>	64
Figura 56	<i>Resultados del ensayo de DSR (Ángulo de fase).</i>	65
Figura 57	<i>Resultados del índice del punto de ablandamiento (IPA).</i>	66
Figura 58	<i>Resultados del índice de penetración (IP).</i>	67
Figura 59	<i>Resultados del índice de ductilidad (ID).</i>	68
Figura 60	<i>Resultados del índice de viscosidad a 135°C.</i>	69
Figura 61	<i>Resultados del índice de viscosidad a 145°C.</i>	69
Figura 62	<i>Resultados del índice de viscosidad a 165°C.</i>	70
Figura 63	<i>Resultados de la resistencia a la oxidación.</i>	72
Figura 64	<i>Resultados de la variación de la resistencia a la oxidación.</i>	72
Figura 65	<i>Creación del Script del polinomio de Lagrange.</i>	73
Figura 66	<i>Ecuación resultante de la simulación numérica por MATLAB 2019.</i>	74

RESUMEN

La oxidación es uno de los principales factores que afectan la durabilidad del pavimento flexible. En lugares de climas húmedos de Amazonas, este fenómeno es aún más rápido y severo por la fuerte gradiente térmica que el cemento asfáltico experimentará en el primer día de colocación. En consecuencia, el objetivo del presente estudio fue demostrar que la adición de fibra lignocelulósica obtenida de los residuos de la poda del café reduce el daño oxidativo del cemento asfáltico a baja temperatura al mejorar sus propiedades físicas y reológicas. Se reforzó el cemento asfáltico PEN 85/100 con 6%, 8% y 11% de fibra lignocelulósica y para determinar sus propiedades físicas y reológicas se simuló el envejecimiento acelerado de corto plazo mediante el método de horno rotatorio de película delgada (RTFOT); además, de la realización de ensayos convencionales de laboratorio (penetración, punto de ablandamiento, ductilidad y viscosidad rotacional) y la prueba del reómetro de corte dinámico (DSR). Además, se calcularon índices de envejecimiento con los resultados de la prueba de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad. Los resultados indican que el uso de fibra lignocelulósica incrementa la rigidez del cemento asfáltico, mientras que disminuye su susceptibilidad térmica. Asimismo, mejora sus propiedades elásticas e incrementa la resistencia a la deformación. También se determinó que la muestra reforzada con 8% de fibra lignocelulósica es la que presenta mayor resistencia a la oxidación de las cuatro muestras estudiadas. Finalmente, se demostró mediante simulación numérica que el 9.05% es el óptimo porcentaje de fibra lignocelulósica que mejora la resistencia a la oxidación del cemento asfáltico a baja temperatura.

Palabras clave: Cemento asfáltico reforzado, residuos de poda del café, resistencia a la oxidación, fibra lignocelulósica, índices de resistencia oxidativa.

ABSTRACT

Oxidation is one of the main factors affecting pavement durability flexible. In places with humid climates in Amazonas, this phenomenon is even faster and more severe due to the strong thermal gradient that the asphalt cement will experience on the first day of placement. Consequently, the objective of this study was to demonstrate that the addition of lignocellulosic fiber obtained from coffee pruning residues reduces the oxidative damage of asphalt cement at low temperatures by improving its physical and rheological properties. Asphalt cement PEN 85/100 was reinforced with 6%, 8% and 11% lignocellulosic fiber and to determine its physical and rheological properties, accelerated short-term aging was simulated using the thin film rotary kiln method (RTFOT); in addition to carrying out conventional laboratory tests (penetration, softening point, ductility and rotational viscosity) and the dynamic shear rheometer (DSR) test. In addition, aging indices were calculated with the results of the penetration test, softening point and viscosity. The results indicate that the use of lignocellulosic fiber increases the rigidity of the asphalt cement, while its thermal susceptibility decreases. Likewise, it improves its elastic properties and increases the resistance to deformation. It was also determined that the sample reinforced with 8% lignocellulosic fiber is the one with the highest resistance to oxidation of the four samples studied. Finally, it was demonstrated through numerical simulation that 9.05% is the optimal percentage of lignocellulosic fiber that improves the oxidation resistance of asphalt cement at low temperatures.

Key words: Reinforced asphalt cement, coffee pruning residues, oxidation resistance, lignocellulosic fiber, oxidative resistance indices.

I. INTRODUCCIÓN.

A nivel mundial, se estima que la producción del ligante asfáltico es de 87 millones de toneladas por año, de las cuales alrededor del 85% es utilizado en la construcción de pavimentos asfálticos (Eurobitume and The Asphalt Institute, 2019); principalmente, con la técnica de mezcla asfáltica en caliente. El rápido crecimiento económico conlleva al incremento de tráfico y cargas, así como la necesidad de construir vías pavimentadas en todo tipo de climas que garanticen un desempeño favorable durante su vida útil.

Todo diseñador de pavimentos debe tener como objetivo el control de la fatiga relacionada con la carga, lo cual incluye la formación de surcos en la subrasante y la fatiga del asfalto; sin embargo, el daño de la superficie causado por la exposición a diversos factores ambientales conduce al reemplazo periódico de la superficie del pavimento, incluso sin la presencia de fatiga o deterioro aparente (Abouelsaad & White, 2022). Los productos químicos ambientales como la sal de deshielo, la lluvia ácida, lluvia y humedad constante, tienen efectos negativos sobre el pavimento asfáltico (Zhang, Hoff, & Chen, 2022). El espesor del ligante asfáltico en el pavimento asfáltico es de solo unas cuantas decenas de micras, razón por la cual la humedad es relativamente fácil de penetrar en el ligante asfáltico; lo cual, tiene un efecto adverso en el desempeño del cemento asfáltico, pudiéndose ver afectados su capacidad de cohesión de adherencia con la interfaz del agregado (Zou, y otros, 2021).

Nuestra región de Amazonas, que es precisamente protagonista constante de las consecuencias de su propio clima, húmedo, acelera el deterioro de las vías pavimentadas que conectan cada rincón de la región. Los estudios hechos recientemente por diversos investigadores alrededor del mundo revelaron que la interacción entre las moléculas de oxígeno del agua y el asfalto son la principal causa de la oxidación del mismo y por consiguiente del envejecimiento prematuro del asfalto; como la conclusión a la que se llegó tras experimentar con una muestra de cemento asfáltico que fue sumergida en agua por un intervalo de 9 meses; dicha muestra presentó una reducción del 40% en la resistencia a la tracción, lo que significa que el punto de rotura de la muestra es significativamente más bajo, volviéndolo muy vulnerable a fallas por agrietamiento (Feng, Wang, Tan, Xue, & Höeg, 2020).

A lo largo de los años, los científicos e ingenieros han estado constantemente intentando mitigar las consecuencias de la oxidación, tratando de mejorar el desempeño de los pavimentos de asfalto y aumentar su vida útil, ahorrando gran cantidad de dinero en el

proceso. Se han intentado diversas formas de reforzamiento al cemento asfáltico para aumentar su resistencia a la oxidación, sin embargo, los resultados de esas investigaciones evidenciaban el gran reto que ello conlleva.

La búsqueda constante de aditivos que refuercen al cemento asfáltico desencadenó nuevos estudios, buscando aditivos provenientes de residuos naturales o artificiales; es así, que se estudió la incorporación de residuos cerámicos sanitarios al cemento asfáltico, obteniendo como resultado un pavimento con mayor humectabilidad, y, debido a su afinidad química con el ligante asfáltico, se obtuvo una mayor capacidad de adherencia; sin embargo, dichos resultados son a corto plazo, y aún faltaría estudiar los resultados del pavimento al paso de varios años (Andrzejuk, Szewczak, Fic, & Lagód, 2020). Buscando una alternativa más ecológica y el aprovechamiento de algunos residuos naturales, varios investigadores empezaron a considerar a las fibras de celulosa como un posible aditivo que refuerce al cemento asfáltico. La lignocelulosa, aquella biomasa obtenida de residuos de plantas dulces, contiene celulosa, hemicelulosa y lignina; donde esta última es capaz de impedir el acceso de enzimas a la celulosa y/o absorber las enzimas de celulosa al momento de la interacción con el agua (Wu, y otros, 2022). Conociendo las propiedades antioxidantes de las fibras de celulosa, se realizó un estudio del cemento asfáltico modificado con 0.3% de fibras de celulosa, lo que conllevó al aumento significativo de la resistencia a la fatiga y al agrietamiento; además que mejoró también el módulo de rigidez y la resistencia bruta de la capa de rodadura; lo que se traduce en una alternativa eficiente y ecológica de refuerzo para los pavimentos asfálticos (Fauzi, y otros, 2020).

Ante resultados tan favorables que se obtuvo con el uso de fibras de celulosa, surgió la necesidad de ampliar mucho más el campo de estudio. Los residuos agroforestales son uno de los principales recursos de materias primas lignocelulósicas sin explotar, siendo la mayoría de estos residuos quemados o desechados, lo cual genera un grave incremento en la contaminación ambiental (Eugenio, Martín, Santos, Bernd, & Ibarra, 2021). Sin embargo, de demostrarse la efectividad de la reutilización de dichos desechos para elaborar aditivos que refuercen al cemento asfáltico y así logren incrementar su resistencia a la oxidación, esto significaría la eliminación de la práctica de quemado de dichos desechos.

Por todo ello, y frente a toda la problemática que conlleva, la investigación se planteó la siguiente pregunta: ¿De qué manera varía la resistencia a la oxidación del cemento asfáltico reforzado con fibra lignocelulósica en climas húmedos de Amazonas?

Para dar respuesta a dicha interrogante, la presente investigación tuvo como objetivo principal evaluar la resistencia a la oxidación del cemento asfáltico reforzado con fibra lignocelulósica en climas húmedos de Amazonas, que, para su cumplimiento, en la presente investigación se realizaron ensayos de laboratorio de caracterización física y reológica, los cuales determinaron no solo la resistencia a la oxidación de las muestras modificadas, sino también la variación de la resistencia oxidativa de las muestras modificadas respecto a la muestra original y su efectividad de aplicación real de acuerdo al módulo complejo y el ángulo de fase.

II. MATERIALES Y MÉTODOS.

II.1. Materiales.

Los materiales que se utilizaron en la elaboración del proyecto de tesis, son los siguientes:

✓ **Cemento asfáltico PEN 85/100 (CA):**

Se define como un material cuyas propiedades son casi no volátiles, que es adherente e impermeable y su origen proviene de la derivación del crudo de petróleo, o puede también estar ubicado en los yacimientos naturales. Este material puede ser disuelto en tolueno casi por completo, y, además, presenta una consistencia muy viscosa, casi sólida a temperaturas ambientales normales. (European committee for standarization, 2014). Además, el cemento asfáltico es un material durable, termoplástico, reciclable y modificable; considerándose así en un material ideal para la ingeniería y construcción de carreteras. (Institute, Eurobitumen and the Asphalt, 2015).

Figura 1

Cemento asfáltico PEN 85/100.



✓ **Residuos de poda de café (Coffea Arabica):**

Son los residuos obtenidos de las ramas de las plantas de café que son recolectados de los terrenos de cultivo. Los residuos de poda se obtuvieron de un terreno de cultivo ubicado a 50 minutos del distrito de Lonya Grande, y el tipo de café seleccionado es coloquialmente llamado “café típico”, cuyo nombre científico “Coffea Arabica Borbón-

Typica”. Una vez finalizada la temporada de cosecha, se procedió a la recolección de la poda, debido a que después de cada temporada de cosecha, las plantas de café necesitan ser podadas.

Figura 2

Residuos de poda del café.



II.2. Preparación de muestras.

Los materiales que se utilizaron en la preparación de muestras son los siguientes:

✓ Fibra lignocelulósica:

Las ramas no fértiles de la planta de café se cortaron en trozos pequeños (2-4 cm de largo). Después, se lavaron con agua destilada y se deshidrataron en un horno a una temperatura constante de 60°C por 12 horas. Finalmente, los residuos se trituraron y tamizaron por la malla N°100 de 150 μ m con la que se obtuvo un polvo fino al que se denomina “fibra lignocelulósica”.

Figura 3

Fibra lignocelulósica.

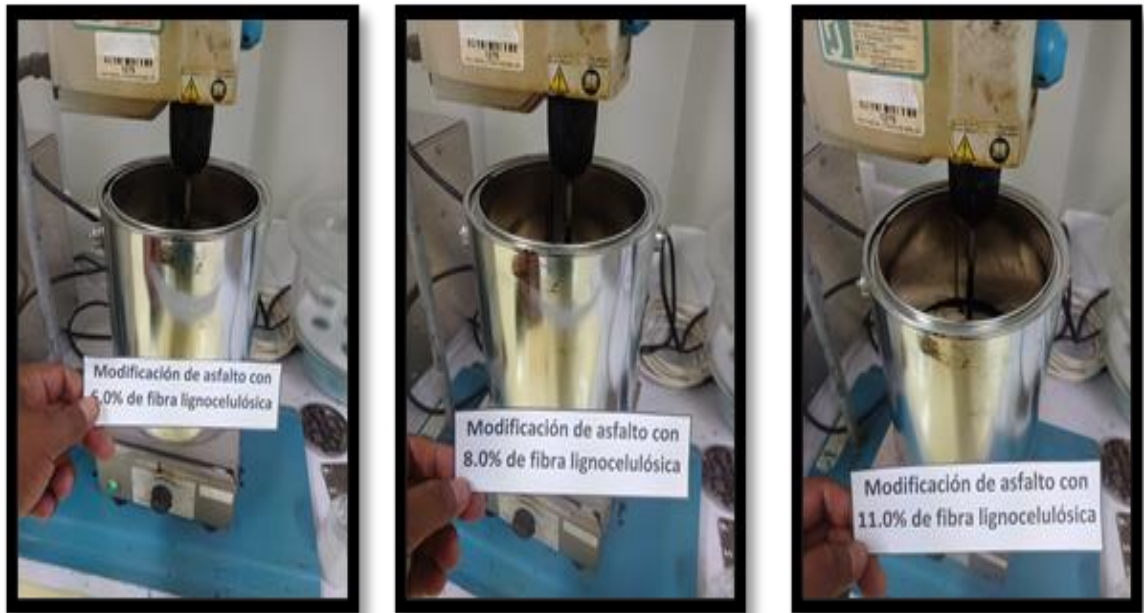


✓ **Reforzamiento del cemento asfáltico:**

Se calentaron tres contenedores de cemento asfáltico a una temperatura de 145°C-165°C, luego, se agregó 6%, 8% y 11% de fibra lignocelulósica a cada una de las 03 muestras de cemento asfáltico puro respectivamente. Los porcentajes de fibra lignocelulósica se agregaron de manera individual, siendo cada muestra independiente de las otras dos. Luego, para que la fibra lignocelulósica se incorpore por completo a la mezcla asfáltica se hizo uso de un agitador mecánico que gira a grandes velocidades, entre 490 y 710 rpm a una temperatura constante de 150°C por un intervalo de tiempo de 40 minutos. Luego, se calentó un cuarto recipiente utilizado como muestra comparativa, el cual tiene en su interior cemento asfáltico normal. Las 04 muestras de estudio terminadas se almacenaron en recipientes herméticos con el fin de conservar sus propiedades físicas y reológicas.

Figura 4

Alícuotas del cemento asfáltico reforzado.



II.3. Métodos.

II.3.1. Ensayos de caracterización física.

Para determinar el comportamiento físico del cemento asfáltico modificado frente a los efectos de la oxidación, se realizaron los siguientes ensayos de laboratorio:

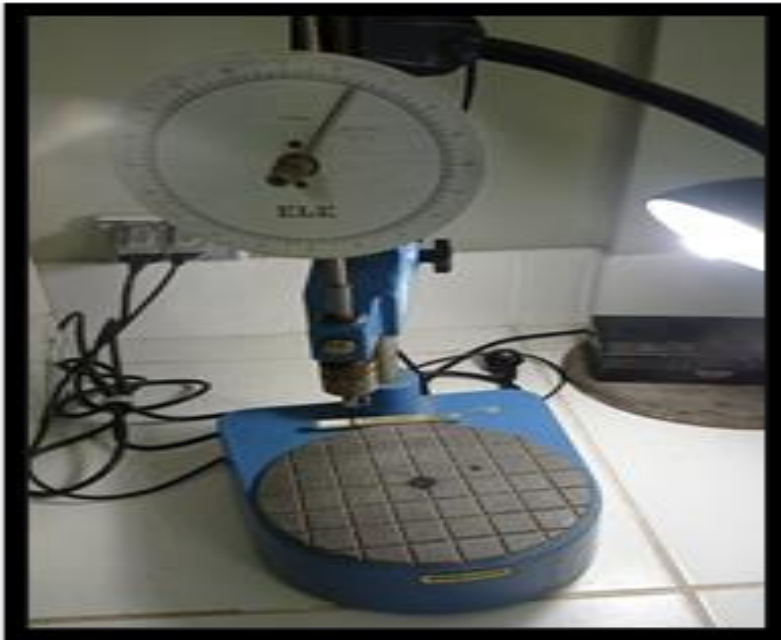
✓ Ensayo de penetración:

Este ensayo nos permitió determinar la consistencia del cemento asfáltico modificado. Si el valor obtenido es alto, implica que la consistencia de la muestra es blanda; en cambio, si el valor obtenido es bajo, implica que dicha consistencia es dura.

Para la realización de este ensayo se introdujo una aguja (de un peso aproximado de 100 g.) en la muestra del cemento asfáltico modificado bajo una temperatura aproximada de 25°C y un tiempo estimado de 5s. La profundidad a la cual dicha aguja penetró a la muestra, es el “valor de penetración” buscado (ASTM D-5).

Figura 5

Penetrómetro.



✓ **Ensayo de punto de ablandamiento:**

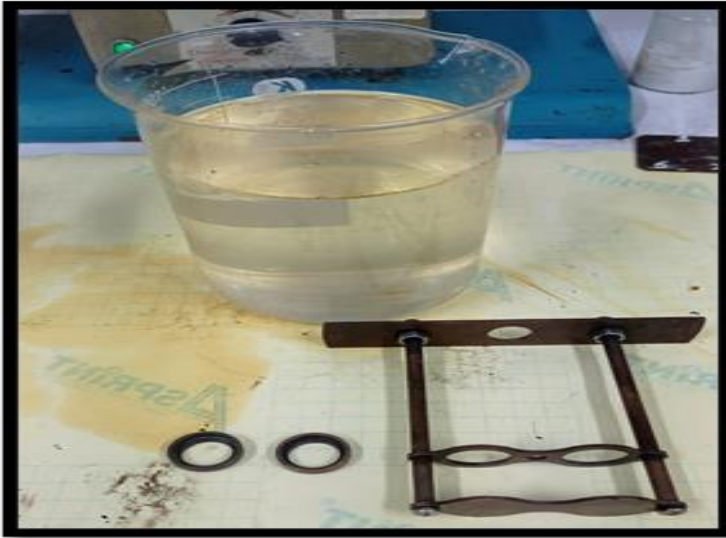
Este ensayo nos permitió estudiar el comportamiento del cemento asfáltico modificado cuando es sometido a altas temperaturas.

Para la realización de este ensayo, se colocó la muestra de cemento asfáltico modificado en un anillo, el cual fue sumergido por completo en agua destilada. Luego, se colocó una bola de acero sobre el anillo y se esperó a que la temperatura de la muestra aumente en un rango de 25°C a 160°C, ya que, al estar sumergido en agua destilada, la temperatura aumenta de manera constante (ASTM D-36).

El punto de ablandamiento estará determinado por la temperatura a la cual la bola de acero atravesó por completo el anillo.

Figura 6

Equipo para punto de ablandamiento TBT-2806F.



✓ **Ensayo de ductilidad:**

Este ensayo nos permitió determinar la consistencia elástica del cemento asfáltico modificado.

Para la realización de este ensayo, se calentó la muestra a una temperatura aproximada de $26^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, e inmediatamente después fue estirada a una velocidad aproximada de $5\text{cm/min} \pm 5\%$ hasta lograr que la muestra elongada se rompa (ASTM D-113).

La ductilidad estará determinada por la máxima elongación que logró la muestra de cemento asfáltico modificado antes de romperse.

Figura 7

Ductilómetro.



✓ **Ensayo de viscosidad rotacional:**

Este ensayo nos permitió estudiar la fluidez del cemento asfáltico modificado cuando es sometido a elevadas temperaturas.

Para la realización de este ensayo, se calentó la muestra de cemento asfáltico modificado en un rango de 135°C a 160°C, e inmediatamente después, la muestra fue vertida en el viscosímetro de Brookfield, el cual nos brindó los resultados buscados (ASTM D-4402). La viscosidad rotacional estará determinada como una relación en la trabajabilidad y bombeo brindados por el viscosímetro de Brookfield.

Figura 8

Viscosímetro de Brookfield.



II.3.2. Ensayos de caracterización reológica.

Para determinar el comportamiento reológico del cemento asfáltico modificado frente a los efectos de la oxidación, se realizaron los siguientes ensayos de laboratorio:

✓ **Ensayo de DSR (Reómetro de corte dinámico):**

Este ensayo nos permitió estimar el endurecimiento oxidativo de las muestras de cemento asfáltico modificado.

Para la realización de este ensayo se hizo uso de un DSR, el cual estuvo bien equipado con un par platos paralelos, los cuales son geométricos, y con una unidad de control de

temperatura en seco. Para las pruebas de barrido de temperatura, estas se realizaron en un rango de 8°C a 80°C, con intervalos cada 5°C, donde se adjudicando valores de deformación idóneos, los cuales garanticen el comportamiento viscoelástico lineal de las muestras de cemento asfáltico modificado a una frecuencia oscilante entre 11 Hz y 0.02 Hz (ASTM D7552-09).

El ensayo del DSR nos brindó: El módulo complejo “G*” y el ángulo de fase (δ). Con dichos parámetros determinamos el endurecimiento oxidativo de la muestra de cemento asfáltico modificado.

Figura 9

Equipo de corte dinámico.



II.3.3. Envejecimiento a corto plazo (RTFOT).

Este ensayo nos permitió simular el envejecimiento del cemento asfáltico modificado para poder predecir en un corto tiempo los efectos de la oxidación que tendrá la muestra asfáltica a lo largo de los años.

Para la realización de este ensayo, la muestra fue sometida a condiciones de calor y aire dentro de un horno rotatorio a una temperatura constante de 162 °C por un aproximado de 85 minutos (ASTM D1754-97).

Figura 10

Horno de película fina y rotatoria.



II.3.4. Interpolación polinomial.

Se utilizó el método de “interpolación polinomial”, que consiste en construir un polinomio que intercepte tres puntos (resistencia a la oxidación de las muestras con 6%, 8% y 11% de fibra lignocelulósica). El polinomio a construir tendrá la siguiente forma:

$$p(x) = ax^2 + bx + c$$

Y deberá pasar por los tres puntos que representan cada muestra modificada de cemento asfáltico:

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_1(6\%) = ax_1^2 + bx_1 + c \\ Y_2(8\%) = ax_2^2 + bx_2 + c \\ Y_3(11\%) = ax_3^2 + bx_3 + c \end{array} \right\}$$

Para procesar dichos parámetros se utilizó el método de “simulación numérica” mediante el uso del software MATLAB 2019, el cual consiste en la creación de un código ejecutable, el cual nos permitió construir el polinomio que intercepte los tres puntos requeridos. A continuación, presento un ejemplo de código ejecutable:

Figura 11

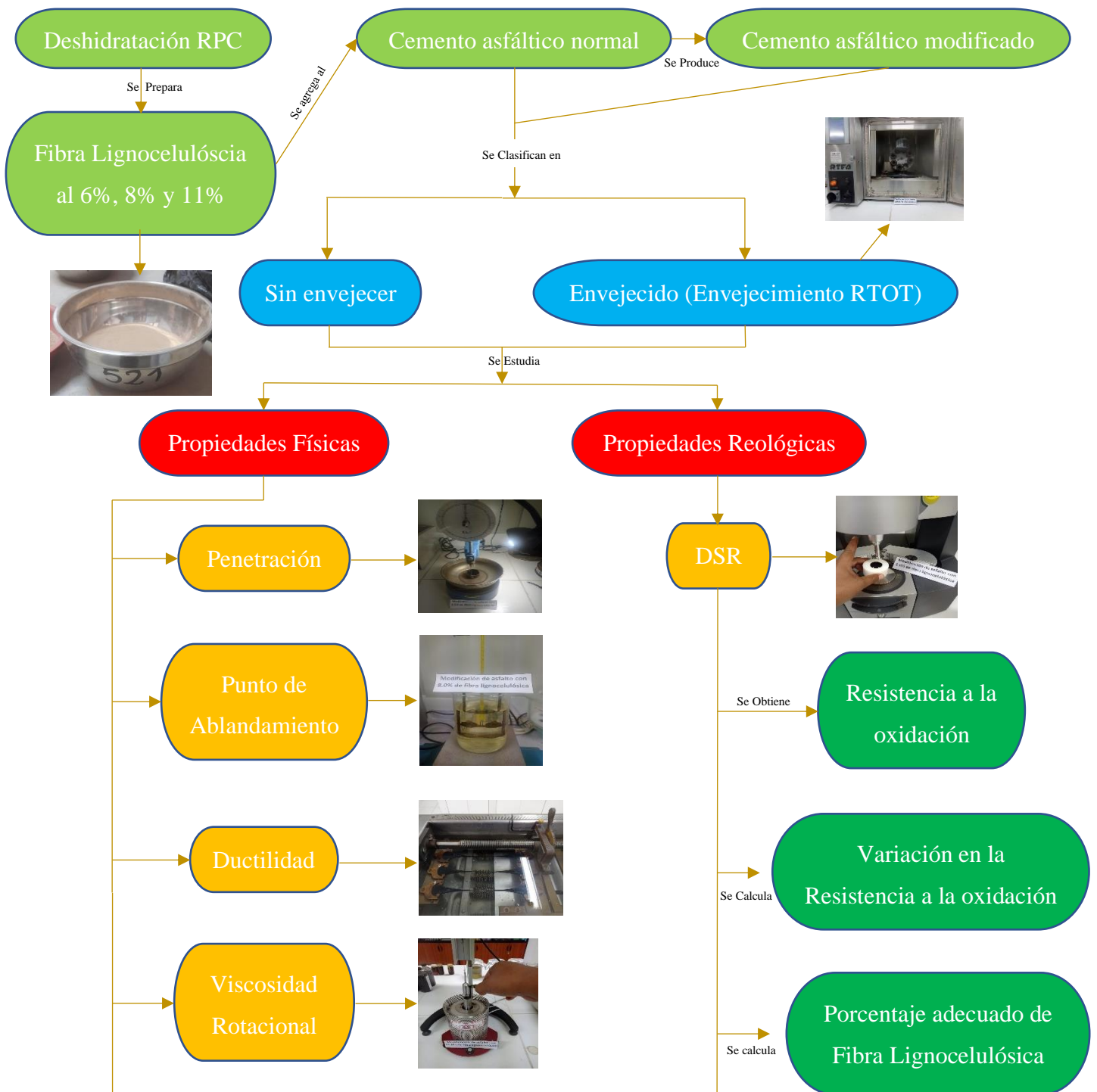
Ejemplo de código ejecutable en MATLAB.

```
function [P,Q]=ajustaSpline(x,y)
    x1=x(1);
    x2=x(2);
    x3=x(3);
    y1=y(1);
    y2=y(2);
    y3=y(3);
    A=[x1^3 x1^2 x1 1 0 0 0 0;
      x2^3 x2^2 x2 1 0 0 0 0;
      0 0 0 0 x2^3 x2^2 x2 1;
      0 0 0 0 x3^3 x3^2 x3 1;
      3*x2^2 2*x2 1 0 -3*x2^2 -2*x2 -1 0;
      6*x2 2 0 0 -6*x2 -2 0 0;
      6*x1 2 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 6*x3 2 0 0];
    b=[y1;y2;y2;y3;0;0;0;0];
    pq=transpose(A\b);
    P=pq(1:4);
    Q=pq(5:8);
end %function
```

II.3.5. Resumen de metodología.

Figura 12

Resumen de metodología



II.4. Experimentación.

II.4.1. Preparación de la fibra lignocelulósica.

- 1) Se recolectó los residuos de poda del café, donde se cortó las ramas infértiles y/o dañadas de la planta luego de ser cosechadas.

Figura 13

Poda del café.



- 2) Se realizó el pre-secado de los residuos de poda del café, extendiéndolos en el terrado de una vivienda, dónde los residuos de poda estuvieron durante 3 días bajo la exposición indirecta del sol.

Figura 14

Presecado de los residuos de poda del café.



- 3) Se procedió a trasladar los residuos de poda del café al laboratorio de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, en el cual, primero pesamos toda la poda recolectada con la finalidad de saber el “desperdicio” que obtendríamos. El peso total de la poda recolectada fue de **1422.40 g**.

Figura 15

Peso total de la poda recolectada.



- 4) Después se procedió a cortar la longitud de cada residuo de poda hasta obtener una longitud de entre 2cm a 4cm. En nuestro caso lo hicimos de manera manual, sin la necesidad del uso de tijeras, debido a que los residuos se encontraban parcialmente secos después del pre-secado.

Figura 16

Recorte de longitud de los residuos de poda del café.



- 5) Después de finalizar el recorte de longitud de los residuos de poda, el peso total de la poda recortada fue de **1224.8 g**. Lo que significa que el desperdicio que obtuvimos fue de solo **197.6 g**.

Figura 17

Determinación del desperdicio de material.



- 6) Después se procedió a recolectar agua destilada, haciendo uso de una destiladora. La cantidad de agua destilada que recolectamos fue de un recipiente lleno. Después procedimos a lavar los residuos de poda del café haciendo uso del agua destilada que recolectamos.

Figura 18

Lavado de los residuos de poda del café con agua destilada.



- 7) Una vez terminado el lavado de todos los residuos de poda del café, se procedió a colocar las muestras en 3 recipientes rectangulares, esto con la finalidad que los residuos de poda se sequen de manera uniforme.

Figura 19

Distribución uniforme para el secado.



- 8) Después de tener a los residuos de poda listos para el secado, se dio paso a colocarlos en el horno a una temperatura de constante de 60°C por un intervalo de tiempo de 12 horas.

Figura 20

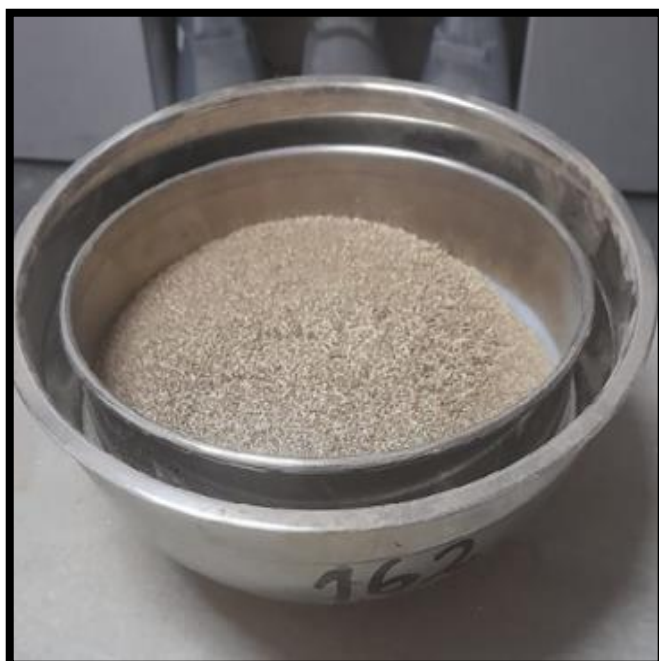
Secado en horno a temperatura constante de 60°C.



- 9) Después se realizó la trituración de los residuos de poda del café secos, de lo cual se obtuvieron unos residuos mucho más finos.

Figura 21

Residuos de poda del café triturados.



- 10) Se realizó el tamizado de las muestras trituradas mediante la malla N°100 de 150 um, mediante la cual finalmente se obtuvo la **fibra lignocelulósica**.

Figura 22

Fibra lignocelulósica obtenida.

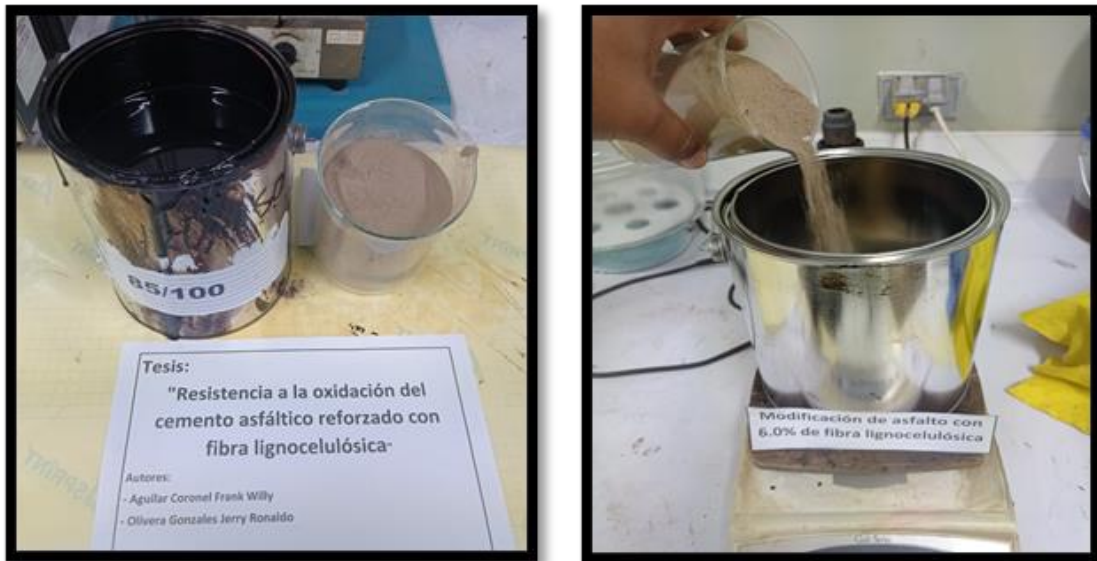


II.4.2. Reforzamiento del Cemento Asfáltico con la fibra lignocelulósica.

- 1) Para asegurar la veracidad del estudio se realizó cuatro muestras, las cuales se describen a continuación:
 - Cemento asfáltico normal PEN 85/100 (sin reforzamiento).
 - 6%FL: Muestra de cemento asfáltico reforzado con 6% de fibra lignocelulósica.
 - 8%FL: Muestra de cemento asfáltico reforzado con 8% de fibra lignocelulósica.
 - 11%FL: Muestra de cemento asfáltico reforzado con 11% de fibra lignocelulósica.
- 2) Para incorporar el aditivo lignocelulósico al cemento asfáltico, inicialmente las tres muestras a reforzar se calentaron a una temperatura constante de 160°C y luego se incorporó el porcentaje de fibra lignocelulósica que corresponde a la muestra.

Figura 23

Adición de fibra lignocelulósica al cemento asfáltico normal.



- 3) Luego se hizo uso de un agitador mecánico para incorporar el aditivo de fibra lignocelulósica con el cemento asfáltico normal por un intervalo de tiempo de 25 a 40 minutos, manteniendo la temperatura de 160°C durante todo el proceso.

Figura 24

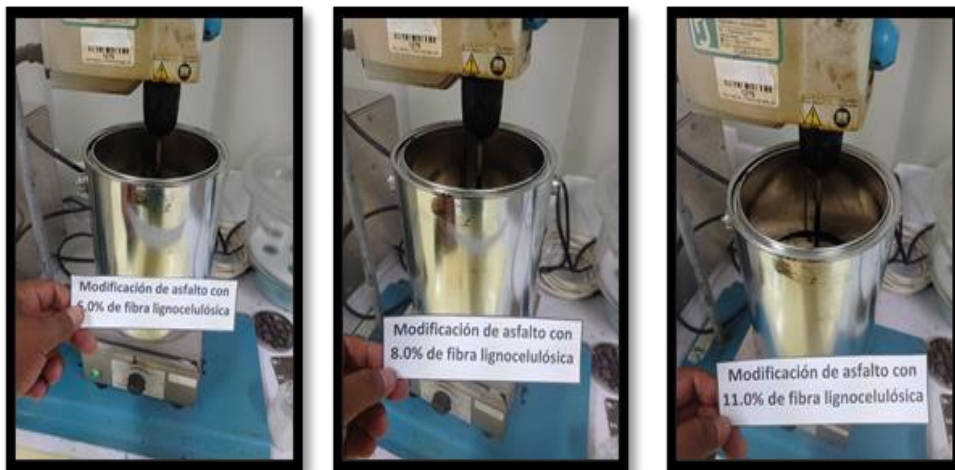
Mezclado del cemento asfáltico normal con el aditivo.



- 4) La muestra con cemento asfáltico normal también fue sometida al agitador mecánico y a la misma temperatura de 160° por el intervalo de tiempo de 25 a 40 minutos. Esto se realizó para que la muestra normal experimente las mismas condiciones que las muestras modificadas, aumentando así la veracidad del estudio.
- 5) Las muestras se almacenaron en un ambiente con una temperatura de entre 23 a 25°C, esto para asegurar la preservación de su morfología.

Figura 25

Muestras reforzadas con fibra lignocelulósica.



- 6) Finalmente se realizó los moldes para los distintos tipos de ensayos.

Figura 26

Moldes para los ensayos de laboratorio.



II.4.3. Ensayos de laboratorio.

II.4.3.1. Ensayos de caracterización física.

✓ Penetración:

Este ensayo nos permitió obtener la consistencia de las muestras estudiadas mediante la medición de la profundidad a la cual una aguja puede penetrar las muestras, teniendo las siguientes características:

- Peso: 100 gramos.
- Tiempo: 5 segundos.
- Temperatura: 25°C.

El proceso utilizado para la realización de este ensayo está acorde con la norma ASTM-D5, y se describe a continuación:

- 1) Se calentaron las cuatro muestras de cemento asfáltico y mediante el uso de un agitador mecánico, se incorporaron los porcentajes de aditivo a las muestras calentadas; el agitador mecánico se usó también en la muestra sin modificar, para que esta experimente las mismas condiciones que las muestras modificadas. Al cabo de un tiempo de 35 minutos, las muestras sometidas al agitador mecánico alcanzaron la fluidez y consistencia deseada, y estas se vertieron en recipientes cilíndricos de un diámetro de 55 mm y una altura de 35 mm.

Figura 27

Recipientes de muestras modificadas para el ensayo de penetración.



- 2) Se dejaron enfriar las muestras a temperatura ambiente por un tiempo aproximado de 2 horas. Después, se colocó las muestras en baño maría con el objetivo de mantenerlas a una temperatura constante de 25°C, tal como se indica en la norma ASTM-D5.

Figura 28

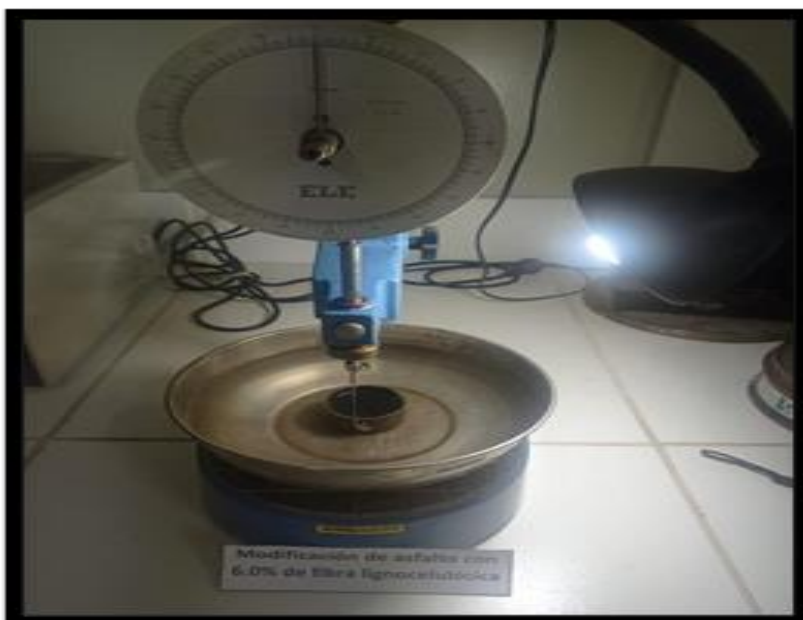
Enfriamiento de las muestras en baño maría.



- 3) Finalizado el tiempo de 2 horas, se colocaron las muestras enfriadas con todo y recipiente del baño maría en el penetrómetro. Luego, una vez verificado que la muestra esté en total reposo, se procedió a bajar lentamente la aguja de penetración, parando exactamente en el instante en que la aguja rozó la superficie de las muestras.

Figura 29

Indicador en cero-Penetrómetro.



- 4) Con la aguja perfectamente colocada sobre la superficie de las muestras, se colocó antes un peso de 100 g. ± 0.2 g. sobre la aguja, e inmediatamente, el sistema fue liberado, penetrando la aguja en la muestra por un tiempo de 5 segundos.
- 5) Este procedimiento se repitió 3 veces por cada una de las muestras de estudio, registrando la profundidad a la que penetró la aguja en décimas de milímetro (dmm). En total se obtuvieron 12 valores de penetración para las muestras analizadas sin envejecer, los cuales se promediaron para obtener un valor de penetración único por cada una de las muestras.

✓ **Punto de ablandamiento:**

Este ensayo nos permitió identificar el comportamiento del cemento asfáltico cuando es sometido a grandes temperaturas; además, también es posible determinar la calidad del suministro de cemento asfáltico, esto debido a que la fluidez del mismo indica su uniformidad para ser transportado.

El ensayo de punto de ablandamiento fue desarrollado siguiendo lo estipulado en la Norma ASTM-D36, cuyo procedimiento se detalla a continuación:

- 1) Las muestras reforzadas y la muestra original fueron calentadas a una temperatura que pasó desde los 25°C hasta alcanzar una temperatura máxima de 160°C, manteniendo dicha temperatura hasta que las muestras alcance la suficiente fluidez como para colocadas en los moldes correspondientes. Las burbujas que se formaron en el proceso, fueron eliminadas mediante agitación manual.
- 2) Se recubrió una placa de bronce con glicerina, con capacidad para soportar a los moldes con forma de anillos propios del ensayo. Estos anillos fueron calentados a una temperatura constante de 60°C por un tiempo de 10 minutos, para inmediatamente después verter las muestras de cemento asfáltico hasta rellenar por completo los anillos. Teniendo los anillos completamente llenos de las muestras, se procedió a dejarlos enfriar por un tiempo de 40 minutos sometidos a una baja temperatura de solo 10°C.

Figura 30

Molde de anillos para el ensayo de punto de ablandamiento.



- 3) El exceso de material de las muestras fue retirado mediante la ayuda de una espátula previamente calentada, la cual sirvió para que la superficie de las muestras coincidiera con la forma cilíndrica de los moldes.
- 4) Se procedió a montar el equipo para el punto de ablandamiento, para ello se llenó con agua destilada helada (a una temperatura de entre 0.6°C a 3°C) un contenedor cilíndrico, en el cual fueron puestos los dos anillos que contienen la misma muestra. Estos anillos se acoplan junto con unas guías para sostenerlos y en el centro del mecanismo se afirma un termómetro con el cual se registrará la temperatura del punto de ablandamiento. Una vez los anillos que contienen la muestra ingresan al interior del recipiente cilíndrico lleno de agua destilada helada, se procedió a dejar reposar el sistema por un tiempo de 20 minutos.
- 5) Luego, se colocaron las bolas de acero propias del ensayo, las cuales, para ser centradas, fueron colocadas en ambas guías, una a cada extremo, apuntando directamente a las muestras contenidas en los moldes cilíndricos.
- 6) Se procedió a incrementar de manera constante la temperatura del contenedor cilíndrico, específicamente a 10°C por minuto, dicho incremento de temperatura continuo de manera constante hasta que las muestras de cemento asfáltico estuvieron lo suficientemente calientes como para comenzar a ser atravesadas por las bolas de acero, permitiendo su paso a través de los moldes cilíndricos.

Figura 31

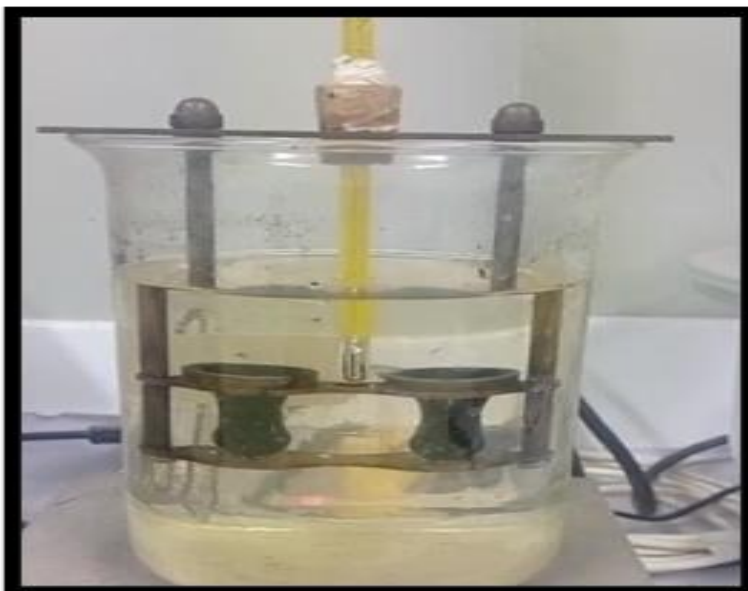
Ensayo de punto de ablandamiento para la muestra reforzada con 8% de FL.



- 7) Finalmente se registró la temperatura en la cual las bolas de acero rozan la parte inferior del contenedor cilíndrico, siendo dicha temperatura el “punto de ablandamiento”. Este procedimiento se realiza para cada una de las muestras de estudio, obteniendo en total 04 valores de punto de ablandamiento para las muestras analizadas sin envejecer.

Figura 32

Temperatura del punto de ablandamiento.



✓ **Ductilidad.**

Este ensayo nos permitió determinar la consistencia elástica de las muestras de cemento asfáltico. La ductilidad estará determinada por la máxima elongación lograda por la muestra de cemento asfáltico antes de romperse debido a la separación de los extremos de la muestra partiendo desde un único punto central, dicha elongación se produce a una temperatura y velocidad constante de 25°C y 5cm/min respectivamente.

El ensayo de ductilidad fue desarrollado siguiendo lo estipulado en la Norma ASTM-D113, cuyo procedimiento se detalla a continuación:

- 1) Se procedió a preparar los moldes, para los cual se ensambló un pequeño contenedor sobre una placa de bronce, e inmediatamente se vertió glicerina sobre la pieza armada, esto con la finalidad de que las muestras de cemento asfáltico no se adhieran al molde.

Figura 33

Moldes para el ensayo de ductilidad.



- 2) Luego se calentó las muestras de cemento asfáltico a una temperatura que oscila entre 75°C a 105°C, deteniendo el suministro de calor una vez que las muestras obtuvieron la consistencia necesaria como para poder ser vertida en los moldes. Para colocar las muestras en los moldes, se utilizó la malla de tamizaje N°50 para retener las partículas gruesas y llenar los moldes solo de muestra asfáltica pura.
- 3) Se sumergió las muestras de cemento asfáltico en un recipiente lleno de baño María por 35 minutos, esto con la finalidad de lograr y mantener la temperatura de 25°C exigida por la Norma ASTM-D113. Después, se utilizó una espátula para retirar el exceso de material de las muestras y adaptar la superficie de las mismas a la forma de los moldes.

Figura 34

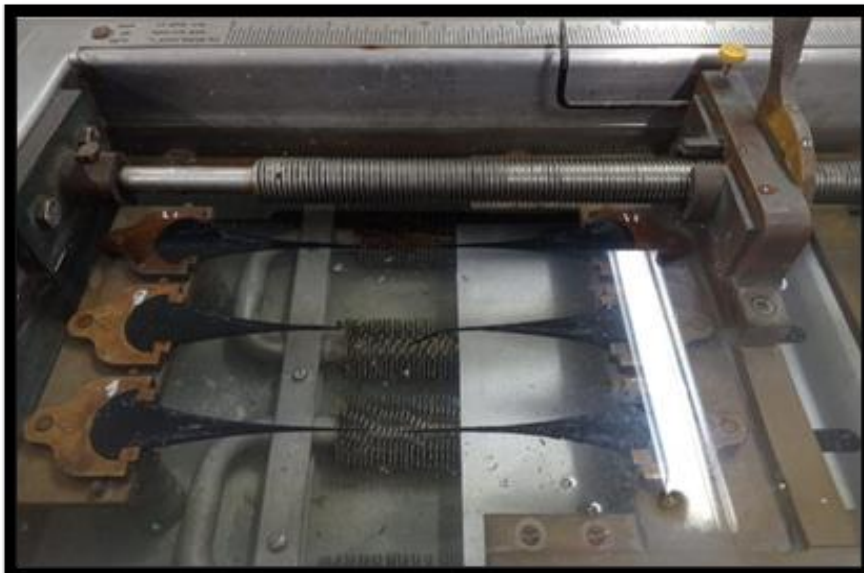
Moldes cargados con las muestras para el ensayo de ductilidad.



- 4) Luego, los moldes finales se vuelven a sumergir en baño María, esta vez por 90 minutos, e inmediatamente después de transcurrido ese tiempo, se colocaron en el ductilímetro.
- 5) Se enganchó cada extremo del molde a los anillos del ductilímetro, y se comienza a elongar la muestra a la velocidad de 5cm/min exigido por la Norma ASTM-D113. Finalmente se determina la máxima elongación que tuvo la muestra midiendo la distancia desde uno de los extremos del molde hacia el punto en el que se dio la rotura. En total se obtuvieron 04 valores de ductilidad para las muestras sin envejecer, obteniendo un valor por cada muestra analizada.

Figura 35

Determinación de la ductilidad de las muestras-Ductilímetro.



✓ **Viscosidad rotacional:**

Este ensayo nos permitió estudiar la fluidez de las muestras de cemento asfáltico cuando son sometidas a elevadas temperaturas.

El ensayo de viscosidad rotacional fue desarrollado haciendo uso de un Viscosímetro de Brookfield, configurándolo para dos temperaturas de estudio, la primera se realizará a 135°C y la segunda a 160°C; siguiendo lo estipulado en la Norma ASTM-D4402, cuyo procedimiento se detalla a continuación:

- 1) Se calentó las muestras de cemento asfáltico a una temperatura que oscila entre 75°C a 105°C, deteniendo el suministro de calor una vez que las muestras obtuvieron la consistencia necesaria para poder ser vertidas en sus respectivos moldes.

Figura 36

Moldes para el ensayo de viscosidad rotacional.



- 2) Se precalentaron los contenedores de las muestras a una temperatura que osciló entre los 40°C a 60°C por un tiempo de 20 minutos. Después se procedió a configurar la temperatura de estudio en el Viscosímetro de Brookfield, siendo ingresado primero la menor temperatura (135°C).
- 3) Luego, se colocaron las muestras (ya preparadas a una temperatura de 135°C) en el Viscosímetro de Brookfield.
- 4) Se colocó el rotor en el viscosímetro, el cual fue bajando de manera lenta y constante hasta que logró penetrar las muestras de estudio, deteniéndose en el instante en que las muestras hayan cubierto la parte superior del rotor.

Figura 37

Acoplamiento del rotor al viscosímetro.



- 5) Se configuró en el viscosímetro la velocidad rotacional de 20 rpm (tal como se muestra en la figura 38) y se pone en marcha el equipo. Finalmente se registran los resultados obtenidos por el viscosímetro de Brookfield, siendo el valor de viscosidad rotacional expresado en centipoise (cP).

Figura 38

Lectura de los valores de viscosidad.



- 6) Se repite el mismo procedimiento para la segunda y tercera temperatura de estudio, la cuales son de 145°C y 165°C respectivamente; por lo que, al finalizar, se obtuvieron en total 12 valores de viscosidad rotacional para las muestras sin envejecer, siendo 03 valores por cada muestra de cemento asfáltico.

II.4.3.2. Ensayo de caracterización reológica.

Este ensayo nos permitió estimar el endurecimiento oxidativo de las muestras de cemento asfáltico normal y reforzado con fibra lignocelulósica.

Este ensayo se realizó mediante el uso del equipo “Reómetro de Corte Dinámico” (DSR), dando como resultado el módulo complejo “G*” y el ángulo de fase (δ). El módulo complejo proporciona los valores de “firmeza” de las muestras de cemento asfáltico, es decir, mide su resistencia ante fuerzas de deformación cortantes; y el ángulo de fase proporciona los valores de disipación energética en cada ciclo de deformación.

El ensayo mediante DSR fue desarrollado siguiendo lo estipulado en la Norma AASHTO-T350, cuyo procedimiento se detalla a continuación:

- 1) Las muestras de cemento asfáltico se calentaron en un rango de temperatura aproximada de 75°C a 105°C por un tiempo de 20 minutos; e inmediatamente después se hizo uso de un agitador mecánico para eliminar las burbujas de aire que se generaron en el proceso.
- 2) Se prepararon los moldes de silicona que contendrán a las muestras de cemento asfáltico, teniendo en la parte superior (la zona en la cual se verterá las muestras) unas dimensiones de 30mm de diámetro y un espesor de 1.5mm. Estos moldes de silicona (sin cargar) se guardaron a una temperatura de 0°C, 24 horas antes de la realización del ensayo.

Figura 39

Moldes para el ensayo de DSR.



- 3) Se vertieron las muestras de cemento asfáltico (precalentadas según lo explicado en el ítem 1) en los moldes de silicona, y se dejaron reposar por un periodo de tiempo de 15 minutos.

Figura 40

Moldes cargados con las muestras para el ensayo del DSR.



- 4) Luego, se colocó el molde cargado con la muestra en el equipo de DSR. Seguidamente, se niveló el molde cargado en la dirección del gap del DSR, dejando la distancia de separación entre ambas superficies de solo 0.05mm; con

lo anterior realizado, se procedió a determinar la separación entre los platos del equipo.

Figura 41

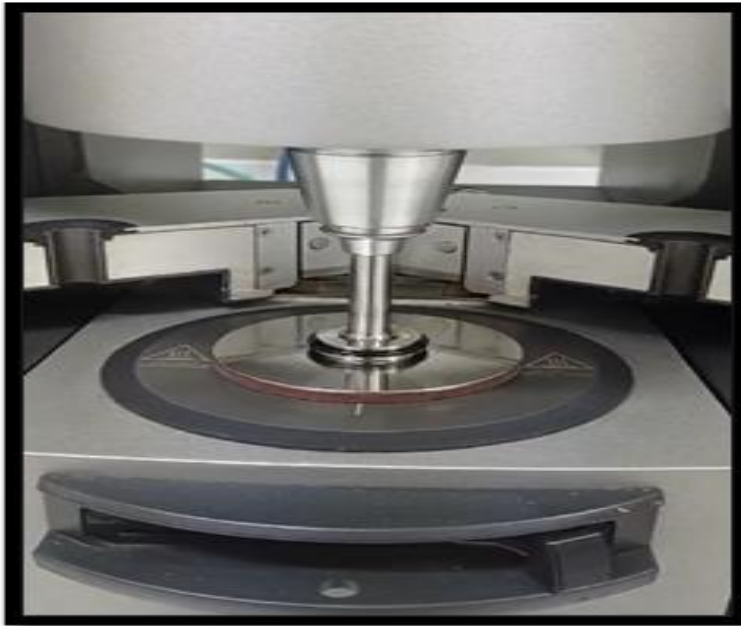
Colocación del molde en el equipo de corte dinámico.



- 5) Se inició el ensayo, para el cual los platos paralelos comenzaron a girar a una velocidad angular de 10 rad/s o a una frecuencia de 1.60 Hz. Cuando comienza el ensayo, uno de los platos paralelos oscila en relación al otro a una frecuencia de 10 rad/s (1.59 Hz). Este ensayo se calibró de manera distinta para ambos estados de las muestras, siendo las muestras sin envejecer configuradas con una amplitud de deformación del 12% y una falla mínima de 1.0 kPa; mientras que, para las muestras envejecidas la amplitud de deformación fue del 10% y la falla mínima de 2kPa. En ambos casos, la temperatura del ensayo osciló entre 58°C y 88°C, aumentando 6°C en cada prueba.

Figura 42

Determinación del módulo complejo y el ángulo de fase.



- 6) Finalmente se registraron los valores del ensayo para cada una de las temperaturas de estudio. Se repitió 3 veces por cada una de las muestras analizadas sin envejecer, obteniendo en total 12 valores de Corte Dinámico y 12 valores de Ángulo de Fase; siendo los valores finales de ambos parámetros el promedio de las 3 mediciones por cada muestra analizada.

II.4.3.3. Ensayo de envejecimiento a corto plazo (RTFOT).

Para estudiar el impacto que nuestro aditivo de fibra lignocelulósica tiene en el cemento asfáltico y en su resistencia oxidativa mediante la alteración de sus propiedades físicas y reológicas producto del paso del tiempo, se procedió a simular el envejecimiento haciendo uso del ensayo de “Envejecimiento a corto plazo por película delgada RTFOT”, para lo cual se utilizó un horno de película fina y rotatoria. Este ensayo, además, nos otorga los valores de pérdida de masa producto del envejecimiento, siendo valores importantes para determinar las consecuencias del paso de tiempo en la muestra de cemento asfáltico original y las muestras de cemento asfáltico reforzados con fibra lignocelulósica.

El ensayo envejecimiento a corto plazo RTFOT fue desarrollado siguiendo lo estipulado en la Norma ASTM D-2872, cuyo procedimiento se detalla a continuación:

- 1) Se calentó las muestras de cemento asfáltico en un rango de temperatura de 75°C a 105°C por un periodo de tiempo de 20 minutos o hasta que la consistencia de

las muestras sean lo suficientemente fluidas como para ser vertidas en los moldes. Inmediatamente después se hace uso de un agitador mecánico para eliminar las burbujas de aire que se formaron durante el proceso.

- 2) Se registró el peso de los moldes para RTFOT vacíos, esto con la finalidad de obtener el peso propio de la muestra analizadas.

Figura 43

Contenedores para el ensayo de envejecimiento a corto plazo.



- 3) Se vertieron 40 g de muestra en cada molde, abasteciendo a 06 moldes en total, siendo uno por cada muestra de cemento asfáltico (normal y reforzado) y dos moldes con muestra base para reforzar el estudio.

Figura 44

Contenedores cargados con las muestras para el ensayo de RTFOT.



- 4) Se dejaron enfriar los moldes a temperatura ambiente por un periodo de tiempo de 70 minutos.
- 5) Con los moldes completamente enfriados, se registró el peso de los moldes cargados de muestra asfáltica.
- 6) Se colocaron los moldes en el carrito del horno de película fina y rotatoria, configurando una temperatura de 163°C por un periodo de tiempo de 85 minutos.

Figura 45

Envejecimiento de las muestras en el horno de película fina y rotatoria.



- 7) Finalizado el ensayo de envejecimiento a corto plazo, se retira los moldes ensayados y se trasfiere su contenido a otros moldes. Los residuos adheridos a los moldes también fueron recolectados raspando su superficie, esto con la finalidad de obtener la mayor cantidad de muestra envejecida posible. Las muestras ya transferidas tienen un tiempo límite de 72 horas antes de perder sus propiedades físicas y reológicas ideales para realizar nuevamente los ensayos post envejecimiento.

Figura 46

Muestras envejecidas de cemento asfáltico recolectadas.



- 8) Finalmente se dejó reposar los moldes con la muestra envejecida por un periodo de tiempo de 70 minutos, para inmediatamente después ser pesados y determinar el valor de la pérdida de masa producto del envejecimiento a corto plazo RTFOT.
- 9) Las muestras de cemento asfáltico normal y reforzado post envejecimiento son distribuidas en los moldes para cada uno de los ensayos de caracterización física y reológica descritos anteriormente, realizando nuevamente dichos ensayos y obteniendo la misma cantidad de parámetros que los ensayos realizados con las muestras sin envejecer.

Figura 47

Preparación de moldes para ensayos de muestras envejecidas.



III. RESULTADOS.

III.1. Resultados de caracterización física.

Se analizó de manera empírica las propiedades físicas del cemento asfáltico normal y el cemento asfáltico reforzado con fibra lignocelulósica haciendo uso de equipos especializados para cada ensayo en el laboratorio “HISGEOLAB S.A.C”, cuyos resultados por cada uno de los ensayos de caracterización física se describen a continuación:

Figura 48

Instalaciones del laboratorio HISGEOLAB S.A.C.

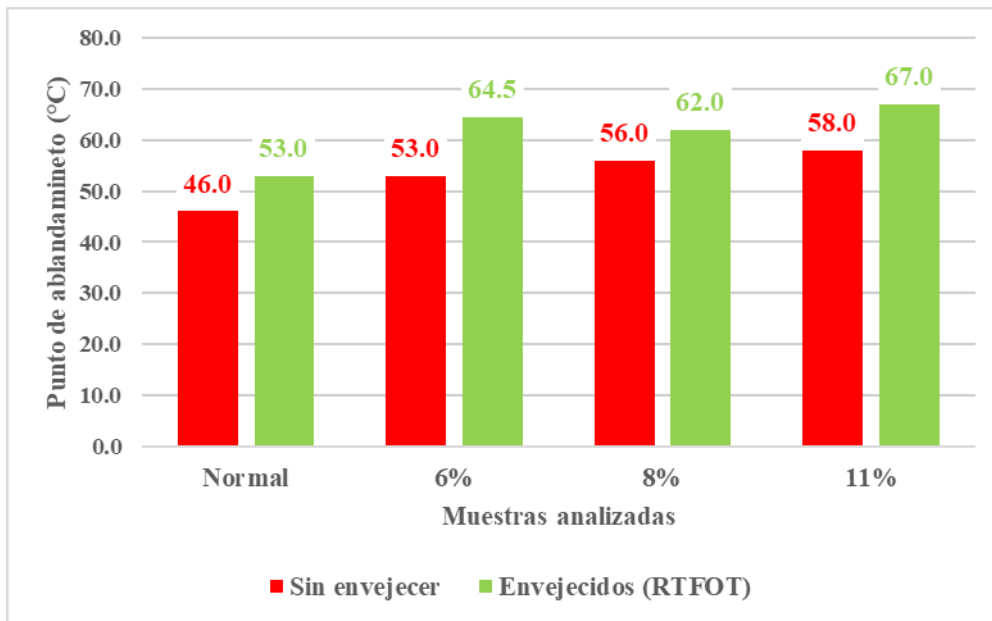


III.1.1. Resultados del ensayo de punto de ablandamiento.

Los resultados del ensayo de punto de ablandamiento se aprecian en la figura 49.

Figura 49

Resultados del ensayo de punto de ablandamiento.



El reforzamiento del cemento asfáltico mediante el uso de fibra lignocelulósica en 6%, 8% y 11% aumentaron los valores de punto de ablandamiento en 15.22%, 21.74% y 26.09% respectivamente. Luego del envejecimiento a corto plazo por RTFOT, los valores del punto de ablandamiento incrementaron para todas las muestras analizadas, y el incremento del valor de punto de ablandamiento de cada muestra modificada envejecida respecto a la muestra original es de 21.70%, 16.98% y 26.42% respectivamente. Estos valores indican que las muestras de cemento asfáltico modificado presentaron menor susceptibilidad térmica, especialmente a elevadas temperaturas.

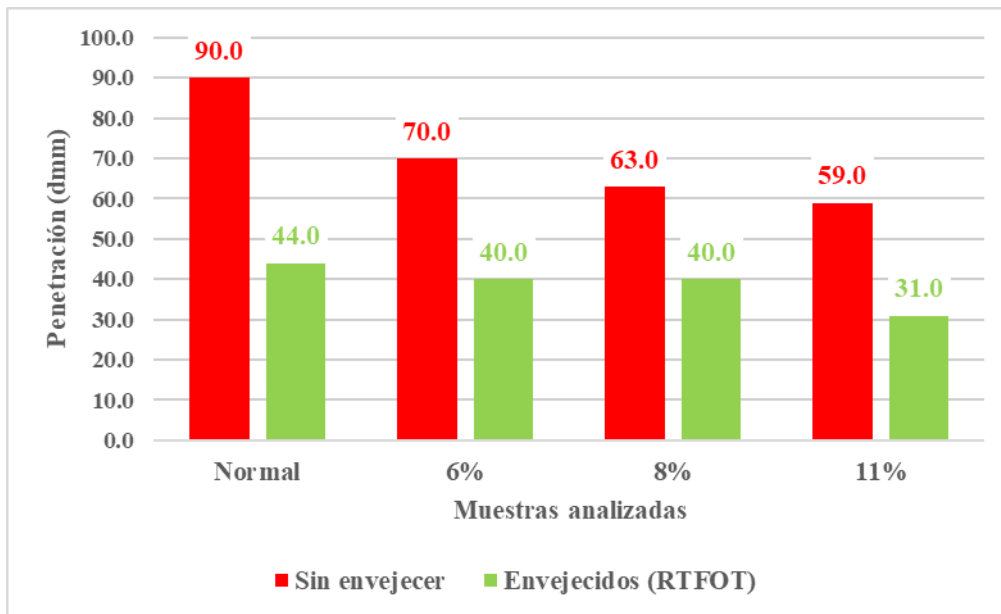
El incremento de los valores de punto de ablandamiento mencionados anteriormente es fácil de evidenciar en la figura 49.

III.1.2. Resultados del ensayo de penetración.

Los resultados del ensayo de penetración se aprecian en la figura 50.

Figura 50

Resultados del ensayo de penetración.



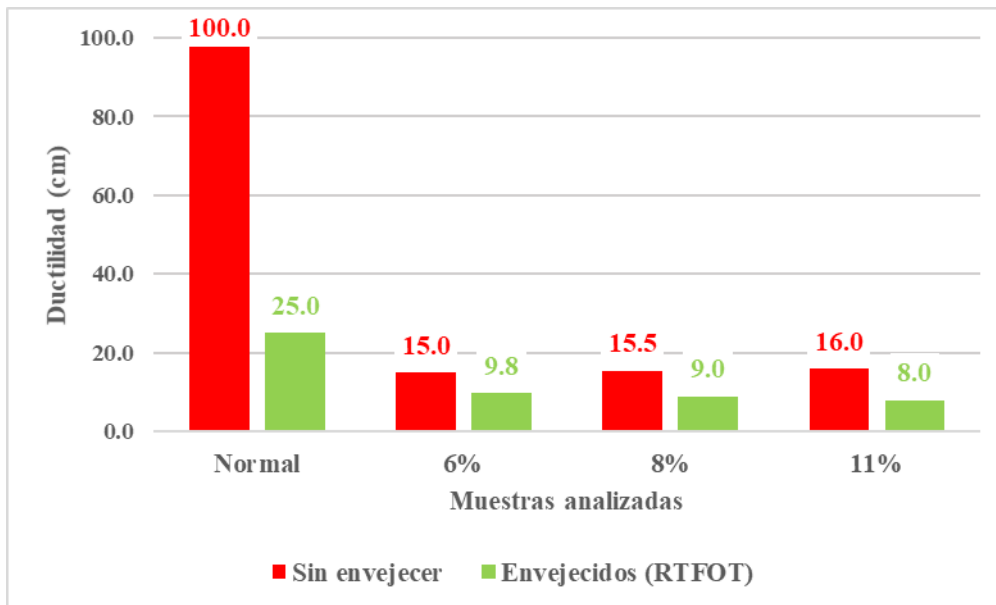
El reforzamiento del cemento asfáltico mediante el uso de fibra lignocelulósica en 6%, 8% y 11% reduce significativamente su valor de penetración en 22.22%, 30% y 34.44% respectivamente. Después del envejecimiento a corto plazo de las muestras reforzadas y la muestra original, los valores de penetración decrecen aún más, y la reducción de los valores de penetración de las muestras analizadas cambian a 9.09%, 9.09% y 29.55% respectivamente. Los resultados demuestran el incremento de rigidez de las muestras reforzadas con fibra lignocelulósica y la pérdida de fluidez producto del envejecimiento a corto plazo RTFOT.

III.1.3. Resultados del ensayo de ductilidad.

Los resultados del ensayo de ductilidad se aprecian en la figura 51.

Figura 51

Resultados del ensayo de ductilidad.



El reforzamiento del cemento asfáltico mediante el uso de fibra lignocelulósica en 6%, 8% y 11% reduce drásticamente sus valores de ductilidad en 85%, 84.5% y 84% respectivamente. Después del envejecimiento a corto plazo de las muestras modificadas y la muestra original, los valores de ductilidad decrecen aún más, y la reducción de los valores de ductilidad de las muestras analizadas cambian a 60.80%, 64% y 68% respectivamente. Estos resultados indican que la muestra original y las muestras reforzadas tras ser envejecidas, son más propensas a “romperse”.

III.1.4. Ensayo de viscosidad rotacional.

Los resultados del ensayo de viscosidad rotacional se parecían en las figuras 52, 53 y 54.

Figura 52

Resultados del ensayo de viscosidad rotacional a 135°C.

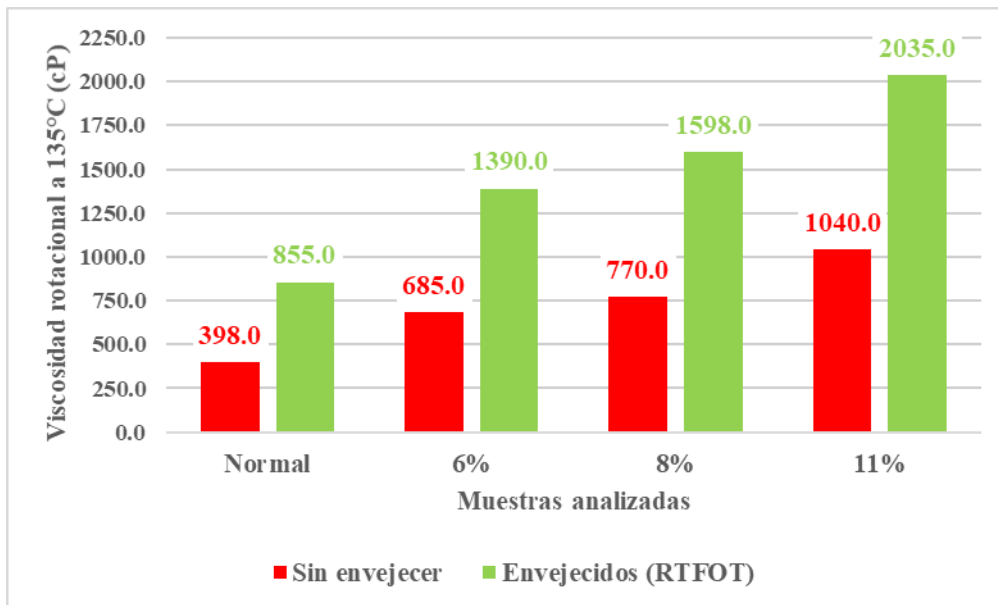


Figura 53

Resultados del ensayo de viscosidad rotacional a 145°C.

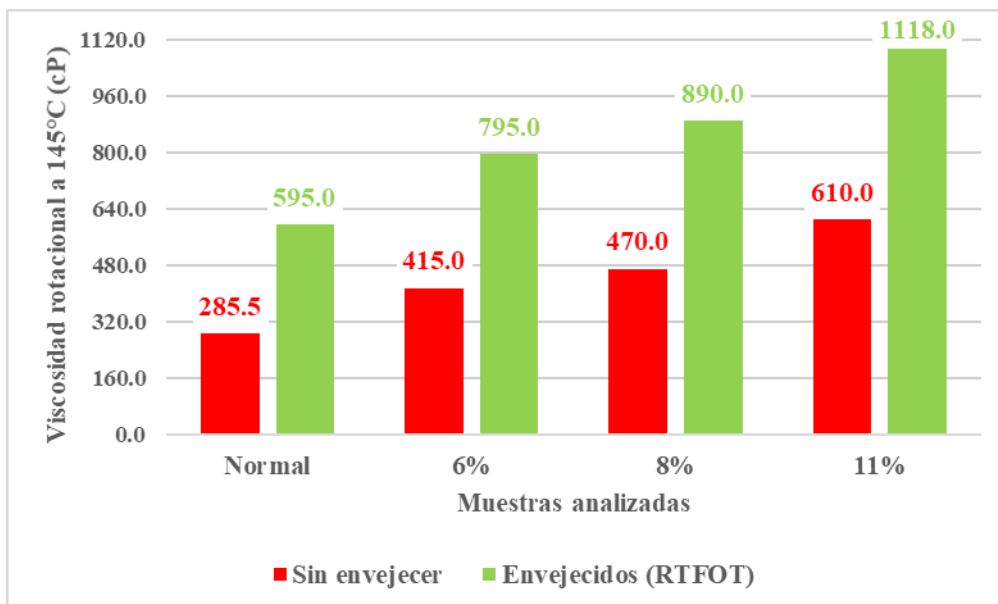
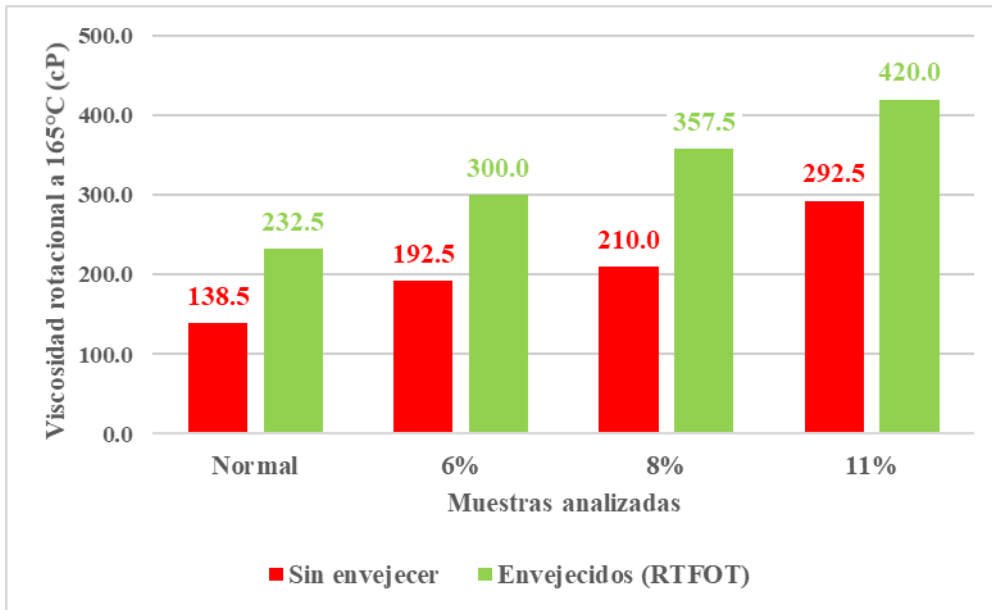


Figura 54

Resultados del ensayo de viscosidad rotacional a 165°C.



El reforzamiento del cemento asfáltico mediante el uso de fibra lignocelulósica en 6%, 8% y 11% incrementa drásticamente su valor de viscosidad, a 135°C en 72.11%, 93.47% y 161.31%; a 145°C en 45.36%, 64.62% y 113.66%; y a 165°C en 38.99%, 51.62% y 111.19% respectivamente. Estos resultados demuestran que a medida que las muestras son expuestas a temperaturas más elevadas, se vuelven menos viscosas.

Además, después del envejecimiento a corto plazo de las muestras reforzadas y la muestra original, el incremento en los valores de viscosidad de las muestras reforzadas respecto a la muestra original a 135°C cambia a 62.57%, 86.90% y 138.01%; a 145°C cambian a 33.61%, 49.58% y 87.90%; y a 165°C cambian a 29.03%, 53.76% y 80.65% respectivamente. Estos resultados indican que la muestra original y las muestras reforzadas tras ser envejecidas, su viscosidad aumenta, sin embargo, esto depende específicamente de la temperatura a la que está siendo envejecida, puesto que, a temperaturas elevadas, la viscosidad tiende a reducirse, contrario a lo que sucede a temperaturas normales.

III.2. Resultados de caracterización reológica.

III.2.1. Resultado del envejecimiento a corto plazo (RTFOT).

Como resultado de someter a elevadas temperaturas a las muestras de cemento asfáltico normal y reforzadas dentro de un horno rotatorio, se presenta una reducción de la masa

de las muestras antes y después del envejecimiento. Dicha pérdida de masa está explicada en la tabla 1.

Tabla 1

Pérdida de masa por RTFOT.

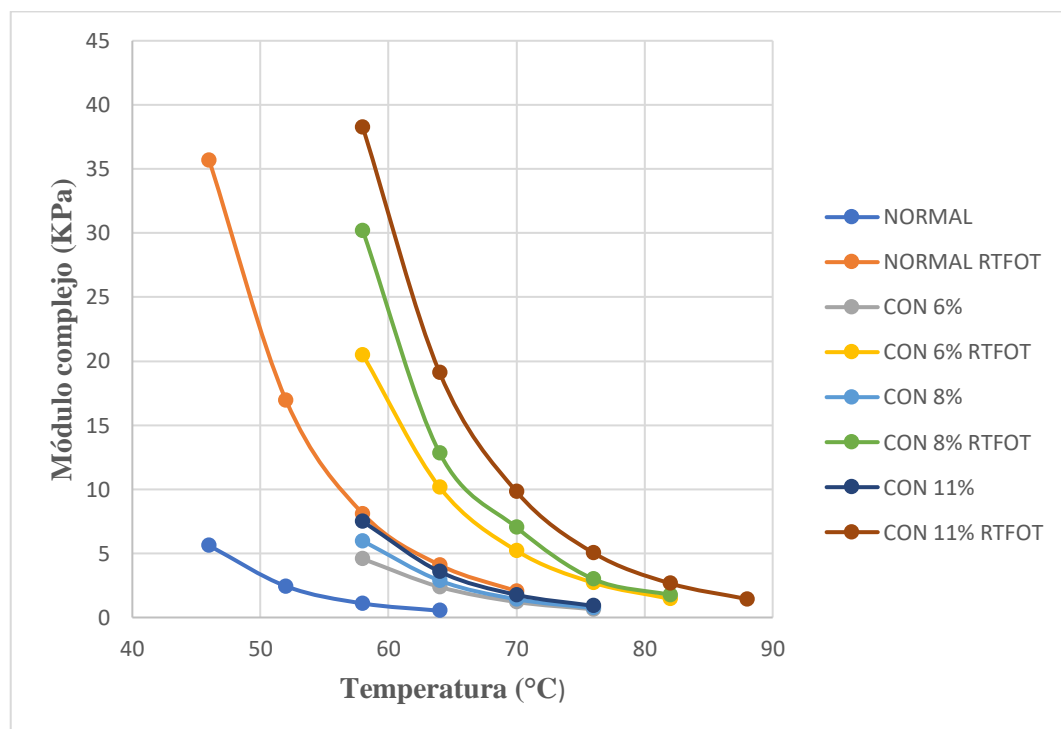
PÉRDIDA DE MASA POR RTFOT				
Normal	6%	8%	11%	Unid
0.369	0.282	0.242	0.199	%

III.2.2. Resultados del ensayo de DSR.

Se analizó el impacto del aditivo de fibra lignocelulósica en el cemento asfáltico a través del estudio de sus características reológicas a bajas y elevadas temperaturas mediante el uso del equipo de Reómetro de Corte Dinámico (DSR). Aplicando a los platos paralelos la velocidad angular estipulada para el ensayo de 10 rad/s se obtuvieron los valores de los parámetros buscados, siendo estos el módulo complejo G^* y el ángulo de fase δ . En la figura N°55 se detallan los resultados del módulo complejo (G^*) y en la figura N°56 se detallan los resultados del ángulo de fase (δ) de las muestras en estado original y envejecido a diferentes temperaturas.

Figura 55

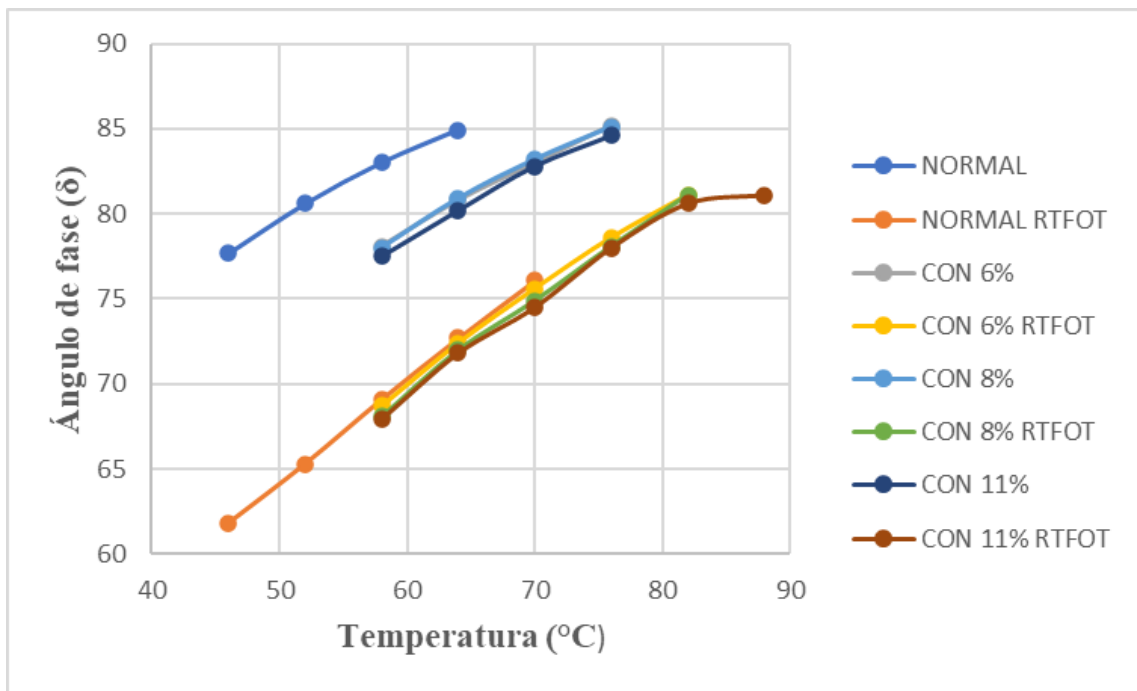
Resultados del ensayo de DSR (Módulo complejo).



En la figura N°55 Se evidencia el incremento del módulo complejo G^* debido al reforzamiento del cemento asfáltico con fibra lignocelulósica tanto para las muestras en estado original como envejecidas, en los intervalos de temperatura estudiados. La muestra de cemento asfáltico normal junto con las muestras reforzadas con 8% y 11% de FL son las que presentan considerablemente una mayor resistencia a la deformación a bajas temperaturas.

Figura 56

Resultados del ensayo de DSR (Ángulo de fase).



En la figura N°56 se evidencia que el reforzamiento del cemento asfáltico mediante el uso de fibra lignocelulósica conlleva a una pequeña reducción en los valores del ángulo de fase, demostrando así, que el cemento asfáltico en general se comporta como un sólido elástico. Las muestras reforzadas con 8% y 11% de FL tienen un mayor comportamiento elástico estudiado a bajas y altas temperaturas; además, este aumento en la resistencia elástica conlleva a una disminución de los valores de deformación permanente. Si el material bituminoso presenta un comportamiento más elástico, aumenta la resistencia a la oxidación.

III.2.3. Resultados de la resistencia oxidativa.

III.2.3.1. Resultados de los índices de resistencia oxidativa.

- ✓ Índice del punto de ablandamiento (IPA):

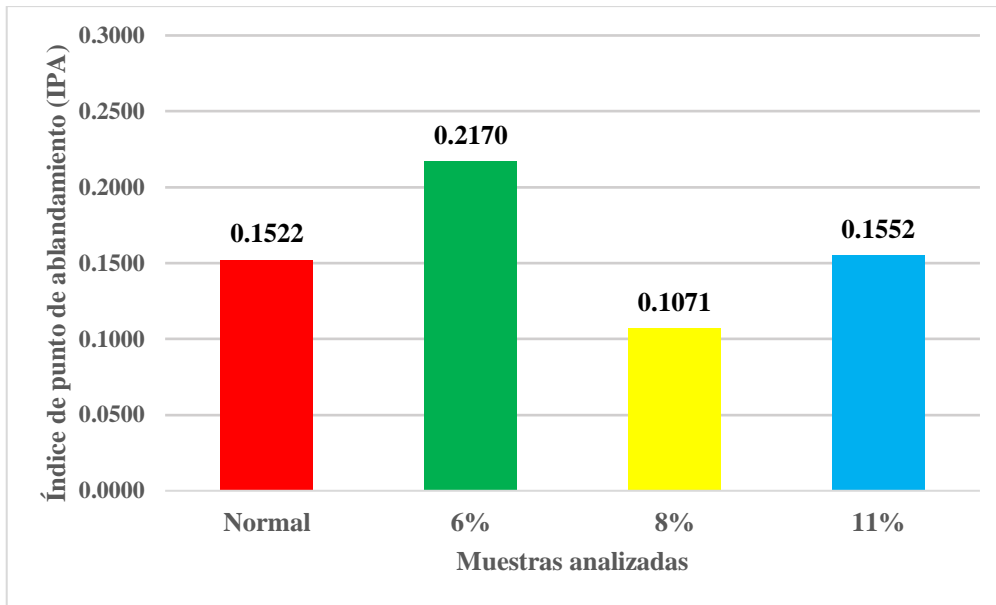
Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$IPA = \frac{ABLADAMIENTO_{ORIGINAL} - ABLANDAMIENTO_{RTFOT}}{ABLADAMIENTO_{ORIGINAL}}$$

Los valores del IPA se muestran a continuación en la figura 57.

Figura 57

Resultados del índice del punto de ablandamiento (IPA).



En la figura 57 se evidencian tendencias crecientes y decrecientes en los valores del IPA con la adición de fibra lignocelulósica. Esto indica que las muestras de cemento asfáltico reforzado con 8% de FL presenta mejor resistencia al envejecimiento que la muestra de cemento asfáltico normal.

✓ **Índice de penetración (IP):**

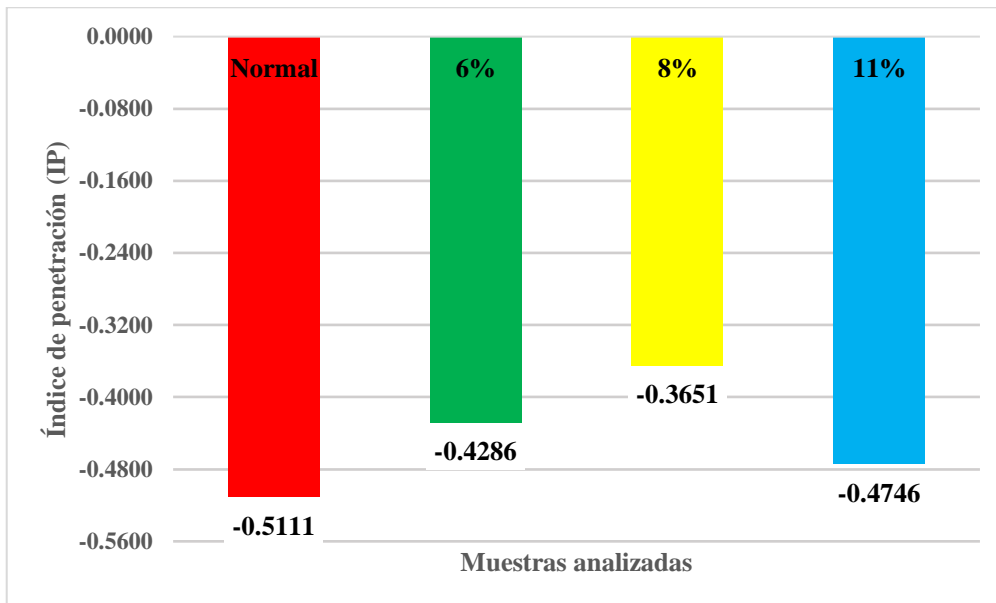
Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$IP = \frac{PENETRACIÓN_{ORIGINAL} - PENETRACIÓN_{RTFOT}}{PENETRACIÓN_{ORIGINAL}}$$

Los valores del IP se muestran a continuación en la figura 58:

Figura 58

Resultados del índice de penetración (IP).



En la figura 58 se observa la susceptibilidad térmica de las muestras. Las muestras con valores de IP más bajos son las que tienen una mayor susceptibilidad térmica. Por el contrario, las muestras que contienen valores de IP más elevados son las que tienen una mayor resistencia al agrietamiento a bajas temperaturas y a la deformación permanente (Geckil et al., 2018). Además, se evidencia el incremento de los valores del IP a medida que se incrementa el porcentaje de fibra lignocelulósica añadido. En consecuencia, el reforzamiento del cemento asfáltico mediante el uso de fibra lignocelulósica incrementa su resistencia al agrietamiento y ahuellamiento a bajas temperaturas.

✓ **Índice de ductilidad:**

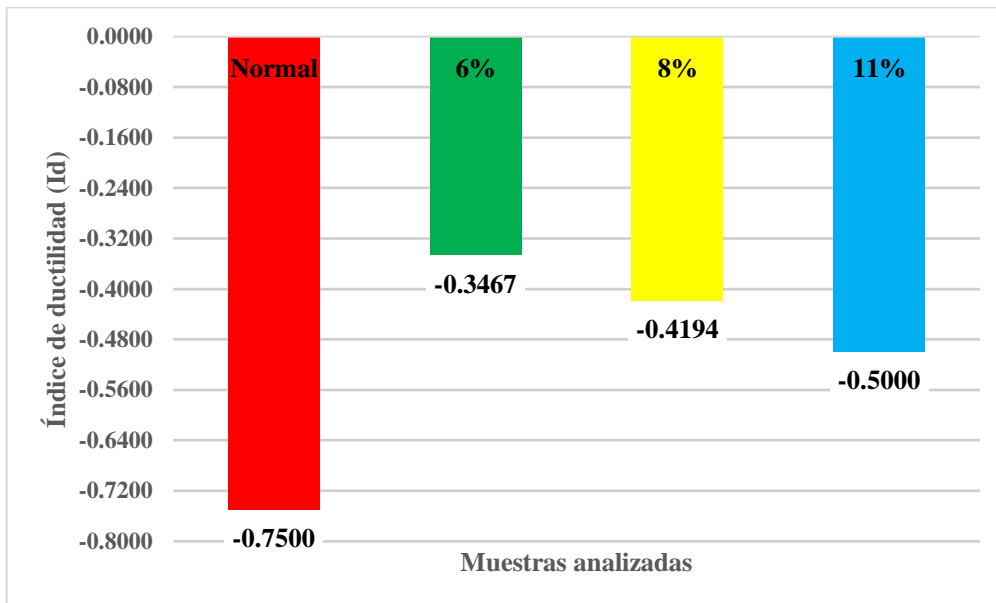
Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$ID = \frac{DUCTILIDAD_{ORIGINAL} - DUCTILIDAD_{RTFOT}}{DUCTILIDAD_{ORIGINAL}}$$

Los valores del ID se muestran a continuación en la figura 59:

Figura 59

Resultados del índice de ductilidad (ID).



En la figura 59 se observa el comportamiento elástico de las muestras. Las muestras con valores altos de ID son las que tienen mayor resistencia elástica. Por el contrario, los cementos asfálticos que presentan un menor ID tienen menor resistencia elástica.

El comportamiento elástico de un material bituminoso es muy importante para poder determinar su resistencia al envejecimiento acelerado, siendo los cementos asfálticos con valores altos del ID, aquellos que tienen un mayor valor de punto de rotura y de falla por elongación permanente.

Además, se observa que a medida que se incrementa el contenido de FL, el cemento asfáltico presenta mayor ID. Por lo tanto, el reforzamiento con fibra lignocelulósica mejora la elasticidad a bajas temperaturas del cemento asfáltico.

✓ **Índice de viscosidad:**

Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$IV = \frac{VISCOSIDAD_{ORIGINAL} - VISCOSIDAD_{RTFOT}}{VISCOSIDAD_{ORIGINAL}}$$

Los valores del IV se muestran a continuación en las figuras 60, 61 y 62:

Figura 60

Resultados del índice de viscosidad a 135°C.

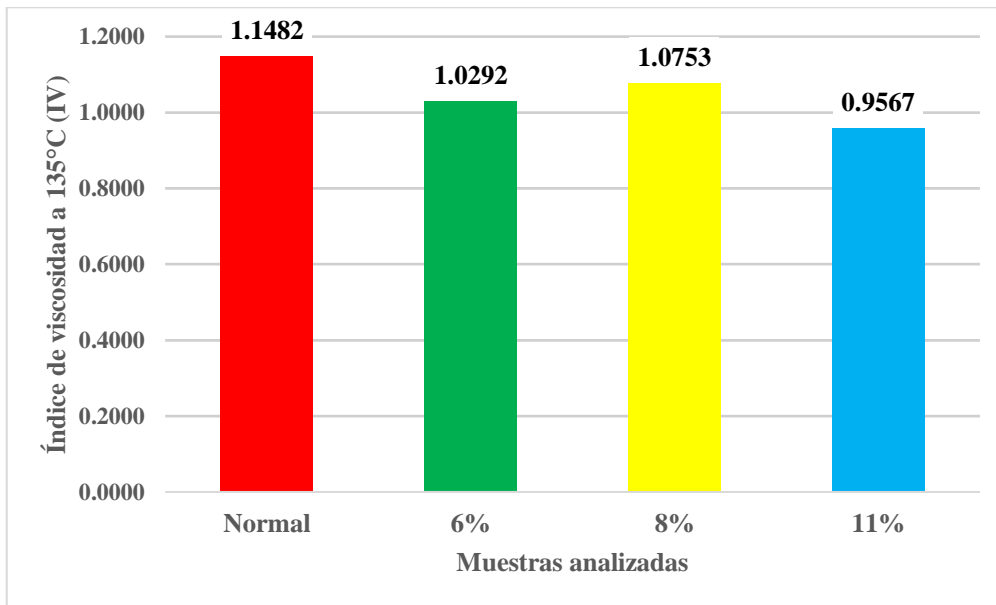


Figura 61

Resultados del índice de viscosidad a 145°C.

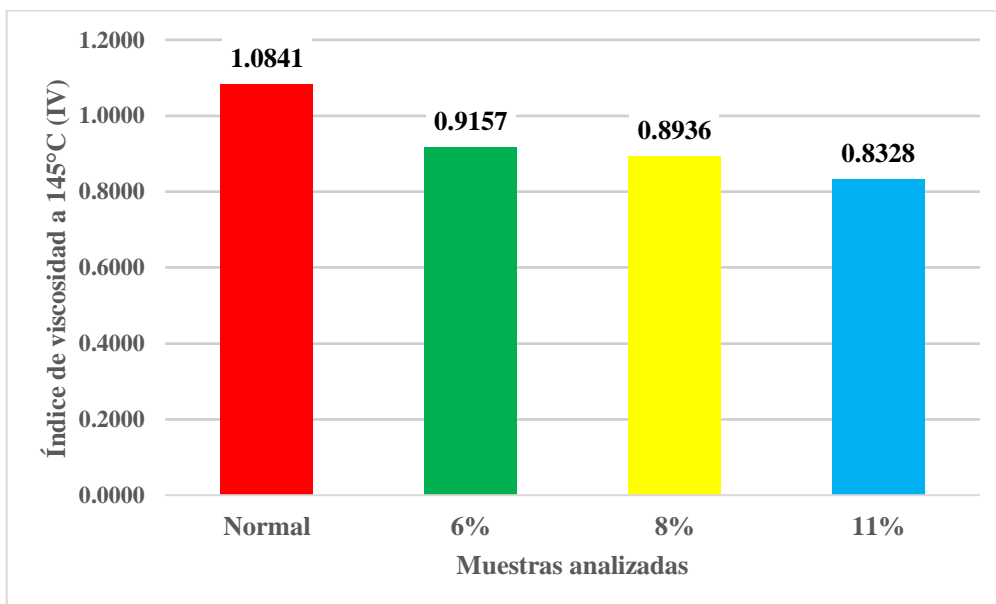
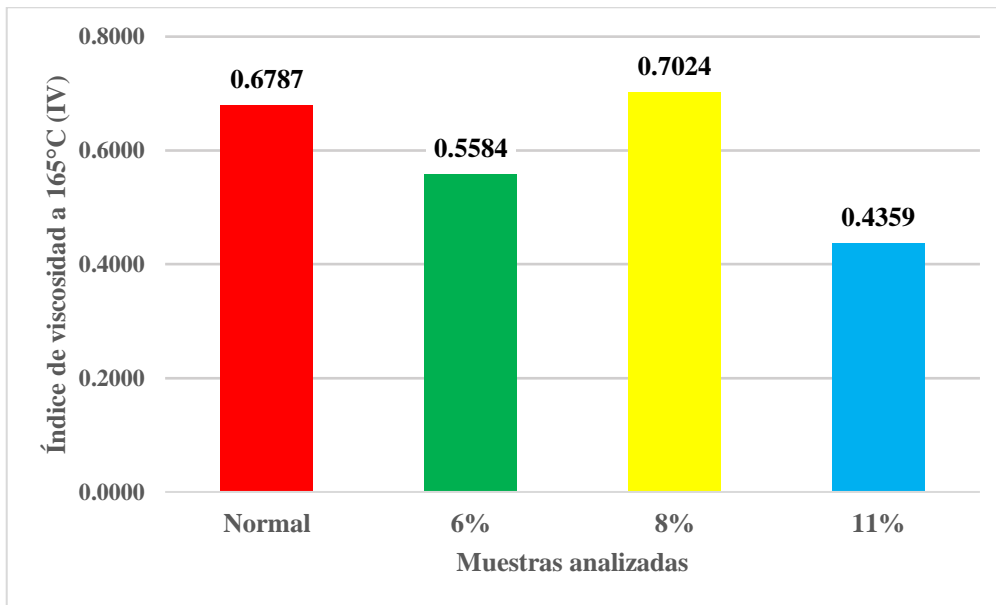


Figura 62

Resultados del índice de viscosidad a 165°C.



Las muestras que presenten valores altos del IV tienen una consistencia más dura, lo cual aumenta su fragilidad ante eventos de degradación. Por el contrario, las muestras que tienen valores pequeños de IV son más resistentes al envejecimiento, esto debido a que no ha aumentado considerablemente su fragilidad, manteniendo una consistencia ideal para su funcionamiento.

En la figura 60 y 61, se observa que los valores del IV de las muestras reforzadas con FL son menores que las del cemento asfáltico normal, presentándose la única excepción en la figura 62, en la cual el valor de IV de la muestra reforzada con 8% de FL supera al valor de IV de la muestra de cemento asfáltico original.

En las figuras 60, 61 y 62 se observa que la muestra reforzada con 11% de FL presenta un menor valor de IV y por ende una mayor resistencia al envejecimiento. En la figura 61 se observa que a medida que se incrementa el porcentaje de FL al cemento asfáltico, el valor del IV va disminuyendo, lo que significa que a mayor porcentaje de FL mayor será la resistencia al envejecimiento.

En la figura 62, cuando las muestras son sometidas a temperaturas de 165°C, el valor de IV disminuye a medida que se va aumentando el porcentaje de FL, a excepción de la muestra reforzada con 8% de FL, la cual extrañamente aumentó el valor de IV incluso superando al de la muestra sin reforzar, dando a entender que la resistencia al

envejecimiento de la muestra reforzada con 6% y 11% de FL es mayor a la del cemento asfáltico normal y al de la muestra reforzada con 8% de FL.

III.2.3.2. Resistencia oxidativa del cemento asfáltico normal.

La resistencia oxidativa del cemento asfáltico normal es la siguiente:

Tabla 2

Resistencia a la oxidación del cemento asfáltico normal.

RESISTENCIA OXIDATIVA DE LA MUESTRA ORIGINAL	
Índice	Valor (1-4)
IPA	3.0000
IP	1.0000
ID	1.0000
IV	1.0000
DSR (G*)	3.0000
DSR (δ)	2.0000
RO	11.0000

III.2.3.3. Resistencia oxidativa del cemento asfáltico reforzado con fibra lignocelulósica.

La resistencia oxidativa del cemento asfáltico reforzado con fibra lignocelulósica es la siguiente:

Tabla 3

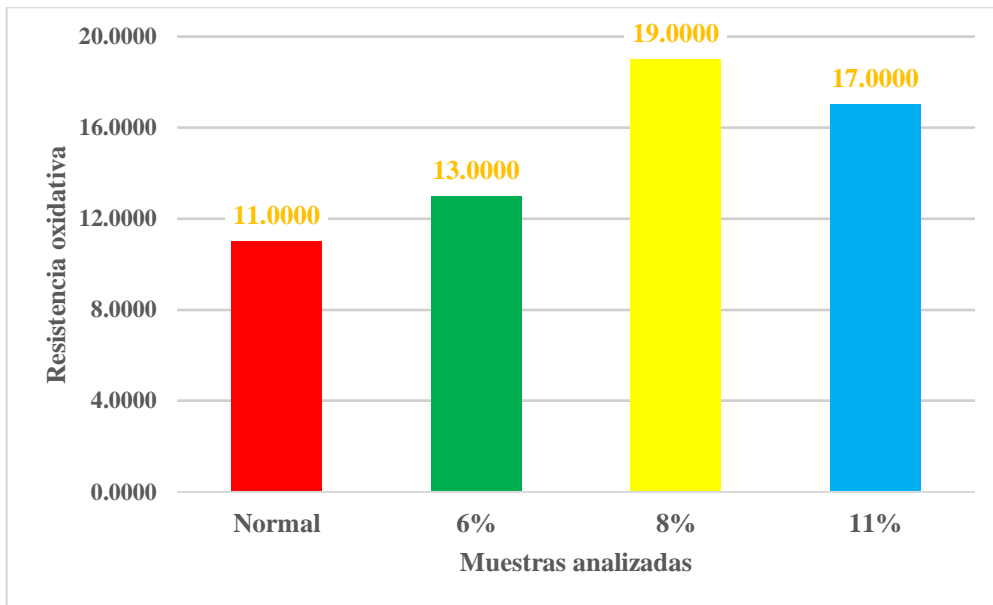
Resistencia a la oxidación del cemento asfáltico reforzado con fibra lignocelulósica.

RESISTENCIA OXIDATIVA DE LAS MUESTRAS REFORZADAS			
Índice/Muestra	6%	8%	11%
IPA	1.0000	4.0000	2.0000
IP	3.0000	4.0000	2.0000
ID	4.0000	3.0000	2.0000
IV	3.0000	2.0000	4.0000
DSR (G*)	1.0000	2.0000	4.0000
DSR (δ)	1.0000	4.0000	3.0000
RO	13.0000	19.0000	17.0000

III.2.3.4. Resistencia oxidativa agrupada.

Figura 63

Resultados de la resistencia a la oxidación.

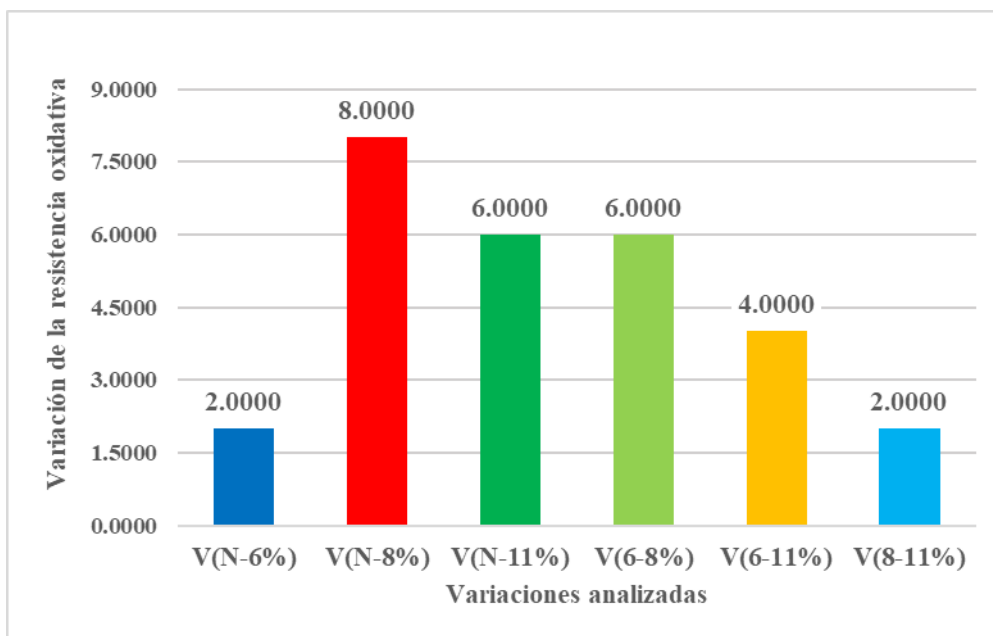


III.2.3.5. Variación de la resistencia oxidativa.

La variación de la resistencia oxidativa de la muestra original y las muestras modificadas es la siguiente.

Figura 64

Resultados de la variación de la resistencia a la oxidación.



III.2.4. Resultados de la simulación numérica.

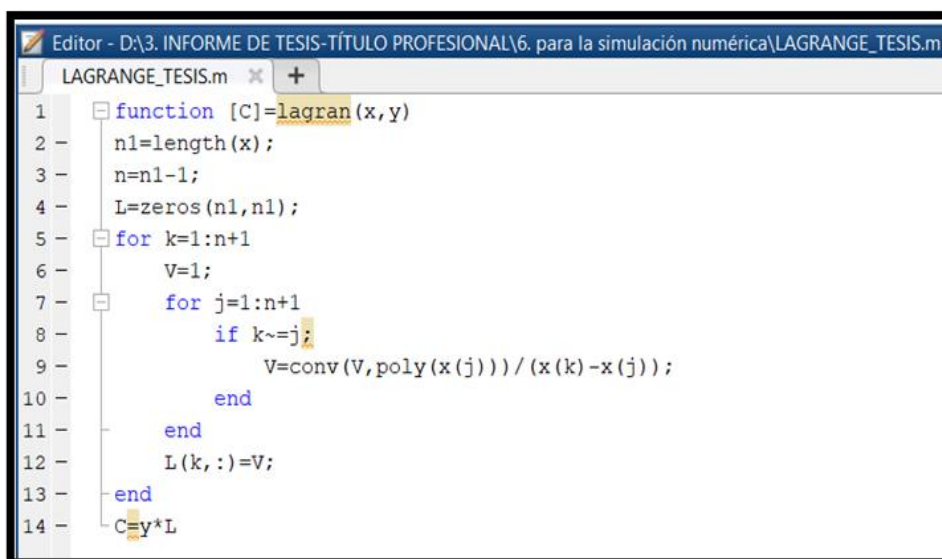
Si bien, de los porcentajes de fibra lignocelulósica estudiados, la muestra con 8% de FL es la que presentó el valor más alto de resistencia oxidativa, se pudo observar que el valor de la resistencia oxidativa de la muestra con 11% de FL es ligeramente inferior a la ya mencionada, pero mayor que la muestra reforzada con 6% de FL. Lo que demuestra que a medida que se incrementa el porcentaje de fibra lignocelulósica la resistencia oxidativa va aumentando, hasta llegar a un porcentaje específico en el cual se maximiza el valor de la resistencia oxidativa, y a partir de allí, porcentajes de FL mayores empiezan a reducir dicha resistencia.

Para determinar la ecuación del porcentaje de fibra lignocelulósica que maximiza el valor de resistencia oxidativa se utilizó el software MATLAB 2019.

Debido a que tenemos 03 valores de porcentaje estudiados y 03 valores de resistencia oxidativa, en el software, se digitó el Script correspondiente aplicado al polinomio de “Lagrange”, el cual sirvió para encontrar la ecuación que relacione los 06 valores antes mencionados.

Figura 65

Creación del Script del polinomio de Lagrange.



```
Editor - D:\3. INFORME DE TESIS-TÍTULO PROFESIONAL\6. para la simulación numérica\LAGRANGE_TESIS.m
LAGRANGE_TESIS.m x +
1 function [C]=lagran(x,y)
2     n1=length(x);
3     n=n1-1;
4     L=zeros(n1,n1);
5     for k=1:n+1
6         V=1;
7         for j=1:n+1
8             if k~=j;
9                 V=conv(V,poly(x(j)))/(x(k)-x(j));
10            end
11        end
12        L(k,:)=V;
13    end
14    C=y*L
```

Luego se procedió a ejecutar el Script creado, ingresando los valores de los porcentajes de fibra lignocelulósica con sus respectivos valores de resistencia oxidativa, brindándonos el siguiente resultado:

Figura 66

Ecuación resultante de la simulación numérica por MATLAB 2019.

```
Command Window
>> x=[6 8 11]

x =

     6     8    11

>> y=[13 19 17]

y =

    13    19    17

>> lagran(x,y)

C =

 -0.7333    13.2667   -40.2000

ans =

 -0.7333    13.2667   -40.2000
```

Ordenando lo brindado por el software MATLAB 2019, la ecuación correspondiente al porcentaje de fibra lignocelulósica que maximiza el valor de la resistencia oxidativa es la que se presenta a continuación:

$$F(x) = -0.7333x^2 + 13.2667x - 40.20$$

Luego, se procedió a derivar la ecuación brindada por Matlab, esto para encontrar el valor máximo de la función:

$$F'(x) = -1.4666x + 13.2667$$

Después, para encontrar el valor “x” (porcentaje de fibra lignocelulósica) que maximiza el valor de resistencia oxidativa, se igualó a “0” la ecuación derivada:

$$\begin{aligned} F'(x) &= 0 \\ -1.4666x + 13.2667 &= 0 \\ x &= \frac{13.2667}{1.4666} \\ x &= 9.05 \end{aligned}$$

Finalmente, para encontrar el valor de la resistencia oxidativa para el porcentaje encontrado, se reemplaza el valor “x” en la ecuación brindada por el software MATLAB 2019:

$$F(x) = -0.7333x^2 + 13.2667x - 40.20$$
$$F(x) = -0.7333(9.05)^2 + 13.2667(9.05) - 40.20$$
$$F(x) = \mathbf{19.80}$$

Con la ayuda del software MATLAB 2019, se obtuvieron como resultado que el mejor porcentaje de fibra lignocelulósica y el máximo valor de resistencia oxidativa son **9.05%** y **19.80**.

IV. DISCUSIÓN.

Los resultados del ensayo de Penetración alcanzaron valores de 70dmm, 63dmm y 59dmm para las muestras de cemento asfáltico reforzadas con 6%, 8% y 11% de fibra lignocelulósica respectivamente, evidenciando el incremento moderado en la rigidez de las muestras reforzadas; que es consistente con las investigaciones de Fauzi M. , y otros (2020) y Arévalo Cardoza & Figueroa Alegre (2022); sin embargo, nuestros resultados discrepan totalmente con los valores de penetración obtenidos por la investigación de Andrzejuk, Szewczak, Fic, & Lagód (2020), que son 2.59dmm, 2.312dmm y 2.17dmm para las muestras de cemento asfáltico reforzadas con arcilla; y con la investigación de Hasan Al-Jumaili (2016), que son 40dmm, 23dmm y 18dmm para las muestras de cemento asfáltico reforzadas con fibra de celulosa.

Los resultados del ensayo de Punto de Ablandamiento alcanzaron valores de 53°C, 56°C y 58°C para las muestras reforzadas con 6%, 8% y 11% de fibra lignocelulósica, incrementando moderadamente su resistencia a la susceptibilidad térmica, ya que, los valores ideales para el punto de ablandamiento son valores intermedios respecto al valor de la muestra original; valores muy elevados significa mayor resistencia a la susceptibilidad térmica pero menor resistencia a la deformación, mientras que valores muy pequeños significa menor resistencia a la susceptibilidad pero mayor resistencia a la deformación; que es consistente con las investigaciones de Andrzejuk, Szewczak, Fic, & Lagód (2020), Hasan Al-Jumaili (2016), Fauzi M. , y otros (2020) y Arévalo Cardoza & Figueroa Alegre (2022).

Los resultados del ensayo de Ductilidad alcanzaron valores de 15cm, 15.5cm y 16cm para las muestras reforzadas con 6%, 8% y 11% de fibra lignocelulósica respectivamente, evidenciando la reducción moderada en sus propiedades elásticas; que es consistente con la investigación de Fauzi M. , y otros (2020); sin embargo, nuestros resultados discrepan con los valores de ductilidad obtenidos por la investigación de Hasan Al-Jumaili (2016), que son 110cm, 90cm y 30cm para las muestras de cemento asfáltico reforzadas con fibra de celulosa; y con la investigación de Arévalo Cardoza & Figueroa Alegre (2022), que son 47cm, 25cm y 18.5cm para las muestra reforzada con poda de arándanos.

Los resultados del ensayo de Viscosidad Rotacional alcanzaron valores de 685cP, 770cP, y 1040cP para las muestras reforzadas con 6%, 8% y 11% de fibra lignocelulósica

respectivamente, evidenciando el incremento de la viscosidad a medida que se aumenta el porcentaje de aditivo que se incorpora al cemento asfáltico, que es consistente con la investigación de Arévalo Cardoza & Figueroa Alegre (2022); sin embargo, nuestros resultados discrepan con los valores de viscosidad rotacional obtenidos por la investigación de Hasan Al-Jumaili (2016), que son 1800cP, 2300cP y 1900cP para las muestras de cemento asfáltico reforzadas con fibra de celulosa; y con la investigación de Andrzejuk, Szewczak, Fic, & Lagód (2020), que son 360cP, 240cP y 160cP para las muestras de cemento asfáltico reforzadas con arcilla. Además, la disminución de las propiedades viscosas del cemento asfáltico reforzado no implica la reducción de sus demás propiedades, lo que coincide con la investigación de Russo, Eskandarsefat, Venturini, & Viscione (2022).

Los resultados del ensayo de DSR demostraron que a medida que se incrementa el porcentaje de fibra lignocelulósica al cemento asfáltico, también se incrementa el módulo complejo, siendo el mayor valor en estado normal (sin envejecer) el que presenta la muestra reforzada con 11% de fibra lignocelulósica, e inmediatamente después, está el valor obtenido por la muestra reforzada con 8% de fibra lignocelulósica. Además, a medida que la temperatura de estudio se incrementa, los valores del módulo complejo disminuyen, sin embargo, a medida que la temperatura de estudio disminuye, los valores del módulo complejo aumentan considerablemente, que es consistente con las investigaciones de Hasan Al-Jumaili (2016), Arévalo Cardoza & Figueroa Alegre (2022), Muniandy, Mahdi, Yunus, Hasham, & Aburkaba (2013) y Apostolidis, Liu, Erkens, & Scarpas (2020), que comprueba la efectividad de nuestro aditivo, siendo mucho más eficaz en temperaturas bajas, que es el tema central de nuestra investigación. Russo, Eskandarsefat, Venturini, & Viscione (2022).

Los resultados de la Resistencia a la Oxidación determinaron que la muestra reforzada con 8% de fibra lignocelulósica es la que mejor incrementa los valores de las propiedades físicas y reológicas del cemento asfáltico; sin embargo, dicho resultado se obtuvo mediante el estudio completo en condiciones normales y de envejecimiento simulado, además que se emplearon porcentajes considerables de 6%, 8% y 11% de fibra lignocelulósica; sin embargo, nuestros resultados discrepan con el porcentaje óptimo de aditivo obtenido por la investigación de que discrepa con la investigación de Fauzi M. , y otros (2020), que es del 0.2% de celulosa; con la investigación de Arévalo Cardoza &

Figuroa Alegre (2022), que es del 6% de poda de arándanos; con la investigación de Hasan Al-Jumaili (2016), que es del 5% de celulosa; con la investigación de Aryngazin, Zhulasheva, Abisheva, Takirova, & Aligozhina (2022), que es del 15% de cenizas de combustible. La discrepancia entre los distintos valores de porcentajes de aditivo ideal de nuestra investigación y de las investigaciones citadas se debe al tipo de estudio realizado, las cuales no realizaron el envejecimiento RTFOT; dicho ensayo es de vital importancia para realiar el enevjecimiento simulado y confirmar la efectividad del aditivo de estudio, definición que coincidimos con la investigación de Sirin, Paul, & Kassem (2018).

V. CONCLUSIONES.

1. La resistencia a la oxidación del cemento asfáltico normal fue determinada por los resultados obtenidos mediante la realización de los ensayos de caracterización físicas y reológicas, obteniendo un total de 11 puntos.
2. El uso de fibra lignocelulósica de 6%, 8% y 11% incorporada al cemento asfáltico normal incrementó los valores del punto de ablandamiento, viscosidad y módulo complejo, pero disminuyó los valores de penetración, ductilidad y ángulo de fase; obteniendo una resistencia a la oxidación de 13, 19 y 17 puntos respectivamente.
3. La comparación de los valores de la resistencia a la oxidación alcanzados por la muestra de cemento asfáltico normal y las muestras de cemento asfáltico reforzado con 6%, 8% y 11% de fibra lignocelulósica determinó la variación de la resistencia a la oxidación, que fue de 2, 8, 6, 6, 4 y 2 puntos para las comparaciones: Normal-6%, Normal-8%, Normal-11%, 6%-8%, 6%-11% y 8%-11% respectivamente.
4. La muestra de cemento asfáltico reforzada con **8%** de fibra lignocelulósica, es la que presenta mayor resistencia a la oxidación, incrementando significativamente algunas características del cemento asfáltico, y disminuyendo otras, compensando así que el incremento sea eficiente a bajas temperaturas.
5. El porcentaje óptimo de fibra lignocelulósica para reforzar al cemento asfáltico normal, aumentando su resistencia a la oxidación sin comprometer sus propiedades bituminosas, es el **9.05%**, y el valor máximo de resistencia oxidativa que este alcanza es de 19.80; determinado mediante el proceso de simulación numérica.

VI. RECOMENDACIONES.

1. Para incrementar los resultados obtenidos en este estudio, a las próximas investigaciones basadas en esta investigación, se recomienda la aplicación de métodos químicos, puesto que, este estudio fue netamente experimental, probando la efectividad de la fibra lignocelulósica como aditivo de reforzamiento del cemento asfáltico, sin embargo, todo esto se realizó sin conocer el comportamiento químico que hace posible el incremento de la resistencia oxidativa.
2. Pese a la obtención de resultados favorables en esta investigación sobre el estudio de la resistencia a la oxidación del cemento asfáltico reforzado con fibra lignocelulósica, se recomienda analizar otros aditivos alternativos, tales como: la cascarilla del arroz, la poda guayaba, etc, y si bien, la fibra lignocelulósica es la que presenta los valores más favorables, el uso de esta en combinación con otros residuos puede incrementar aún más la resistencia a la oxidación del cemento asfáltico.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Abouelsaad, A., & White, G. (2022). Comparación del efecto de la oxidación térmica y la fotooxidación de mezclas asfálticas sobre las propiedades químicas y reológicas del ligante bituminoso extraído. *Materiales*, 15(19). doi: <http://dx.doi.org/10.3390/ma15196793>
- Al-Khateeb, G., Ghuzlan, K., Ismail, M., Shabib, A., Naeem, M., & Eibaz, Y. (2022). Propiedades reológicas del aglomerante asfáltico modificado con cemento. *Frontiers*, 7-8.
- Alzagameem, A., Hansen, B., Buchner, D., Larkins, M., Kamm, B., Witzleben, S., & Schulze, M. (2018). Biomasa lignocelulósica como fuente de antioxidantes ambientalmente benignos a base de lignina. (Q. y. Lignina para Energía, Ed.) *moleculas*, 23(10). doi:<https://doi.org/10.3390/moleculas23102664>
- Andrzejuk, W., Szewczak, A., Fic, S., & Lagód, G. (2020). Mojabilidad del hormigón asfáltico natural y con áridos reciclados de cerámica sanitaria. *Materials*, 13(17), 14-15. doi:<https://doi.org/10.3390/ma13173799>
- Apostolidis, P., Liu, X., Erkens, S., & Scarpas, T. (2020). Envejecimiento oxidativo del asfalto epoxi. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(5), 1471-1481. doi:<https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1806278>
- Arévalo Cardoza, M., & Figueroa Alegre, C. (2022). *Uso de residuos de poda de arándanos para mitigar la oxidación del cemento asfáltico en climas fríos de La Libertad [Tesis de titulación, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10757/660443>
- Aryngazin, K., Zhulasheva, M., Abisheva, A., Takirova, A., & Aligozhina, D. (2022). Características de la producción de hormigón asfáltico de cemento utilizando cenizas de combustible. *Technobius*, 2(1), 2-7. doi:<https://doi.org/10.54355/tbus/2.1.2022.0012>
- Camargo, I., Hofko, B., Mirwald, J., & Grothe, H. (2020). Efecto del envejecimiento térmico y oxidativo sobre la reología y composición química de los ligantes asfálticos. *Materiales*, 13(19). doi:<http://dx.doi.org/10.3390/ma13194438>
- Erkens, S., Scarpas, T., & Liu, X. (2022). Envejecimiento oxidativo del asfalto epoxi. *Revista internacional de ingeniería de pavimentos*, 23(5), 1471-1481. doi:<https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1806278>


- Eskandarsefat, S., Venturini, L., Ciarlitti, A., Sogno, E., & Ottonelli, I. (2022). Modificación del hormigón asfáltico con plastómeros: Un estudio de caso realizado 7 años después de la construcción. *Infrastructures*, 15-16.
- Eugenio, M., Martín, R., Santos, J., Bernd, W., & Ibarra, D. (2021). "Propiedades químicas, térmicas y antioxidantes de las ligninas solubilizadas durante el despulpado con soda/AQ de residuos de poda de naranja y olivo". *Molecules*, 26(13), 13. doi:<http://dx.doi.org/10.3390/molecules26133819>
- Fauzi, M., Masri, A., Ramadhansyah, J., Samsudin, S., Ismail, A., Arshad, k., . . . Hainin, R. (2020). Propiedades volumétricas y módulo resiliente del asfalto masillado con fibra de celulosa. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 7(12), 1-4. doi:[10.1088/1757-899X/712/1/012028](https://doi.org/10.1088/1757-899X/712/1/012028)
- Feng, S., Wang, W., Tan, H., Xue, M., & Höeg, K. (2020). Efectos del agua ácida sobre las propiedades hidromecánicas del hormigón asfáltico. *Elsevier*, 12-13.
- Górecki, M., & Hallmann, E. (2020). El contenido de antioxidantes del café y su actividad in vitro como efecto de su método de producción y tiempo de tostado y preparación. (M. AG, Ed.) *Antioxidantes*, 9(4). doi:<https://doi.org/10.3390/antiox9040308>
- Górecki, M., & Hallmann, E. (2020). El contenido de antioxidantes del café y su actividad in vitro como efecto de su método de producción y tiempo de tostado y preparación. *Antioxidants*, 7-8.
- Hasan Al-Jumaili, M. (2016). Modificación de las propiedades químicas de los materiales asfálticos mediante aditivos de polipropileno y celulosa. *International Journal of Materials Chemistry and Physics*, 2(1), 33-39. doi:<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.28498.86722>
- He, R., Liang, Y., Gao, L., Chen, H., Yang, B., Guo, F., & Geng, J. (2020). Preparación y evaluación del rendimiento de la emulsión de asfalto modificada por el látex SBS fabricado. *Hindawi*, 10-11.
- Hend , A., Nur, Y., Muhammad, M., & Halil, C. (2020). Efectos del daño por humedad en las mezclas asfálticas. *Elsevier*, 7(5), 600-628. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.07.001>
- Jalkh, R., El-Rassy, H., & Chehab, G. (2018). Evaluación de las propiedades físico-químicas del aceite de cocina de desecho y el aceite de poso de café gastado para su uso potencial como rejuvenecedores de aglomerantes asfálticos. *Residuos de biomasa*, 9, 2125–2132. doi:<https://doi.org/10.1007/s12649-017-9984-z>

- Ma, L., Varveri, A., Jing, R., & Erkens, S. (2021). Revisión exhaustiva sobre el transporte y la reacción del oxígeno y la humedad hacia el envejecimiento oxidativo acoplado y al daño por humedad del betún. *Elsevier*, 19-20.
- Macedo, G., & Faxina, L. (2021). Mezclas de concreto asfáltico modificadas con residuos poliméricos por los procesos húmedo y seco: Una revisión de la literatura. (Elsevier, Ed.) *Construcción y Materiales de Construcción*, 312(125408). doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125408>
- Muniandy, R., Mahdi, L., Yunus, R., Hasham, S., & Aburkaba, E. (2013). Caracterización de aglutinantes de asfalto modificados con nanoarcilla de montmorillonita orgánica utilizando un reómetro de cizallamiento dinámico (Dsr). *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(14), 300-310. Obtenido de <https://www.ajbasweb.com/old/ajbas/2013/December/300-310.pdf>
- Rossi, C., Ashimova, s., Fabozzi, A., D'Errico, G., & Angelico, R. (2018). Effects of Natural Antioxidant Agents on the Bitumen Aging Proces. (A. Sciences, Ed.) *An EPR and Rheological Investigation*, 8(8). doi:<https://doi.org/10.3390/app8081405>
- Russo, F., Eskandarsefat, S., Venturini, L., & Viscione, N. (2022). Estudio completo sobre un hormigón asfáltico modificado con grafeno y plásticos duros reciclados: un caso de estudio. *Case Studies in Construction Materials*, 17, 2-9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01437>
- Sirin, O., Paul, D., & Kassem, E. (2018). Estudio de vanguardia sobre el envejecimiento de mezclas asfálticas y el uso de aditivos antioxidantes. *Advances in Civil Engineering*, 18, 5-13. doi:<https://doi.org/10.1155/2018/3428961>
- Tessema, T. A., Wolelaw, N. M., & Alene, G. A. (2022). Evaluación experimental de ceniza de cáscara de café como relleno en producciones de concreto asfáltico en caliente. *Hindawi*, 10-11.
- Wu, Z., Peng, K., Zhang, Y., Wang, M., Yong, C., Chen, L., . . . Pan, M. (2022). Disociación de lignocelulosa con pretratamiento biológico hacia la plataforma bioquímica: Una revisión. *Elsevier*, 1-2.
- Zhang, H., Chen, Z., Zhu, C., & Wei, C. (2020). Un material de construcción de carreteras innovador e inteligente: Ligante asfáltico termocrómico. *Elsevier*, 2-3.
- Zhang, L., Zhang, X., Wu, S., Ye, Y., & Li, Y. (2018). Influencia de la exposición a solutos de agua sobre la evolución química y las propiedades reológicas del asfalto. *Materiales*, 11(6). doi: <http://dx.doi.org/10.3390/ma11060983>

- Zhang, X., Hoff, I., & Chen, H. (2022). Caracterización de varios betunes expuestos a químicos ambientales. (Elsevier, Ed.) *Revista de producción más limpia*, 33. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130610>
- Zhihao, Y. (2021). Investigación sobre enfermedades del pavimento asfáltico y control de calidad de la construcción bajo el trasfondo de Big Data. *Journal of Physics: Serie de conferencias*, 1744 . doi:10.1088/1742-6596/1744/4/042139
- Zou, Y., Amirkhanian, S., Xu, S., Li, Y., Wang, Y., & Zhang, J. (2021). Efecto de diferentes soluciones acuosas sobre las propiedades fisicoquímicas del ligante asfáltico. (Elsevier, Ed.) *Construcción y Materiales de Construcción*, 286. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122810>

ANEXOS.

VIII.1. Resultados de laboratorio de la muestra de cemento asfáltico original.

 HISGEO LAB S.A.C.	INFORME	Código	IF-TA-ACFWIOGJR-PN
	CONTROL DE CALIDAD DE ASFALTOS	Versión	01
		Fecha	03-01-2023
		Página	1 de 3
DATOS GENERALES			
Solicitante : Aguilar Coronel Frank Willy / Olivera Gonzales Jerry Ronaldo Universidad : Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza Especialidad : Ingeniería Civil Tema de tesis : "Resistencia a la oxidación del cemento asfáltico reforzado con fibra lignocelulósica" Ubicación : Chachapoyas Fecha de emisión : 13/06/2023			
DATOS GENERALES			
Muestra : Asfalto 85/100			

ANÁLISIS DE ASFALTO 85/100

1.0 CONTROL DE CALIDAD

1.1 Método para determinar punto de ablandamiento (Anillo y bola ASTM D-36).

Punto de ablandamiento	46	°C
------------------------	----	----

1.2 Método para determinar penetración (ASTM D-5).

Penetración (5s; 25°C)	90	dmm
------------------------	----	-----

1.3 Método para determinar ductilidad de los materiales bituminosos (Ductilómetro ASTM D-113)

Ductilidad (25°C, 5cm/min)	+100	cm
----------------------------	------	----

1.4 Método para determinar viscosidad rotacional (Viscosímetro Brookfield ASTM D-4402).

Viscosidad brookfield (135°C)	398.0	cP
-------------------------------	-------	----

Viscosidad brookfield (145°C)	285.5	cP
-------------------------------	-------	----

Viscosidad brookfield (165°C)	138.5	cP
-------------------------------	-------	----

1.4 Método para determinar película fina rotatoria 163°C, 85 min (RTFOT ASTM D-2872).

1.4.1 Pruebas sobre la muestra de película fina rotatoria.

Pérdida de masa	0.369	%
-----------------	-------	---

Punto de ablandamiento	53	°C
------------------------	----	----

Penetración (5s; 25°C)	44	dmm
------------------------	----	-----

Ductilidad (25°C, 5cm/min)	25	cm
----------------------------	----	----

Viscosidad brookfield (135°C)	855.0	cP
-------------------------------	-------	----

Viscosidad brookfield (145°C)	595.0	cP
-------------------------------	-------	----

Viscosidad brookfield (165°C)	232.5	cP
-------------------------------	-------	----

Observaciones:

Los resultados corresponden a la muestra entregada por el cliente.

Elaborado por:
Miguel Angel Alfaro Huayanay
Técnico de Laboratorio de Suelos, Concreto y Asfalto
HISGEO LAB S.A.C.


Firma:



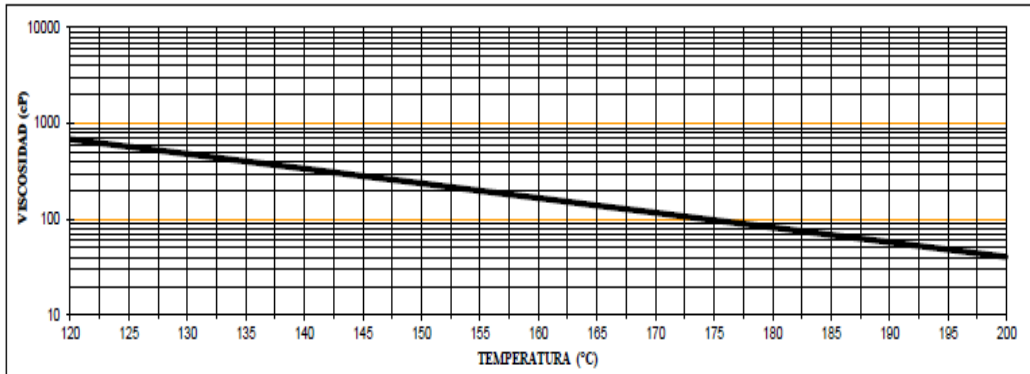
Revisado por:
Juan Carlos Zapata Silva
Ing. Civil CIP 56346
HISGEO LAB S.A.C.

Firma:



 HISGEOLAB S.A.C	INFORME	Código	IF-TA-ACFWOGJR-PN
	CONTROL DE CALIDAD DE ASFALTOS	Versión	01
		Fecha	03-01-2023
		Página	2 de 3

**GRÁFICO DE TEMPERATURAS DE MEZCLA Y COMPACTACIÓN
(ASFALTO 85/100)**




RANGO DE TEMPERATURA DE MEZCLA
RANGO DE TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN MEZCLA CONVENCIONAL

135.1	A	143.2
123.6	A	135.1

ESPECIFICACIÓN

RANGO DE TEMPERATURA DE MEZCLA CON VISCOSIDADES ENTRE 300 A 400 cP
RANGO DE TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN MEZCLA CONVENCIONAL CON VISCOSIDADES ENTRE 400 A 600 cP

Esta información es de exclusiva responsabilidad del solicitante. Prohibida su reproducción parcial o total sin la autorización de HISGEOLAB S.A.C.

 HISGEO LAB S.A.C.	INFORME	Código	IF-TA-ACFW / OGJR-PN
	CONTROL DE CALIDAD DE ASFALTOS	Versión	01
		Fecha	03-01-2023
		Página	3 de 3

DATOS GENERALES	
Solicitante	: Agullar Coronel Frank Willy / Olivera Gonzales Jerry Ronaldo
Universidad	: Universidad Nacional Toriblo Rodríguez de Mendoza
Especialidad	: Ingeniería Civil
Tema de tesis	: "Resistencia a la oxidación del cemento asfáltico reforzado con fibra lignocelulósica"
Ubicación	: Chachapoyas
Fecha de emisión	: 13/06/2023
DATOS GENERALES	
Muestra	: Asfalto 85/100

ANÁLISIS DE ASFALTO 85/100

2.0- MEDICIÓN DE PROPIEDADES REOLÓGICAS MEDIANTE REÓMETRO DE CORTE DINÁMICO (DSR).

2.1 Clasificación Ligante original (AASHTO T-315)

Muestra	N°- 1						N°- 2						Promedio de las lecturas N°-1 / N°-2						Falla 1.0 kPa (mín)						
Temperatura de corte dinámico °C	46	52	58	64	70	76	46	52	58	64	70	76	46	52	58	64	70	76							
Corte dinámico G*/senδ, 10rad/s kPa	5.804	2.481	1.101	0.542	--	--	5.406	2.390	1.066	0.510	--	--	5.605	2.436	1.094	0.526	--	--							
Ángulo de fase δ, °	77.8	80.7	83.1	85.0	--	--	77.6	80.5	82.8	84.8	--	--	77.7	80.6	83.0	84.9	--	--							
Amplitud de deformación %	12	12	12	12			12	12	12	12			12	12	12	12									

2.2 Clasificación después de envejecimiento RTFOT 163°C, 85 min (AASHTO T-240)

Muestra	N°- 1						N°- 2						Promedio de las lecturas N°-1 / N°-2						Falla 2.2 kPa (mín)						
Temperatura de corte dinámico °C	46	52	58	64	70	76	46	52	58	64	70	76	46	52	58	64	70	76							
Corte dinámico G*/senδ, 10rad/s kPa	35.940	16.990	8.050	4.170	2.070	--	35.420	16.911	8.139	4.015	2.019	--	35.680	16.951	8.095	4.093	2.045	--							
Ángulo de fase δ, °	61.6	65.0	68.8	72.5	75.9	--	62.0	65.6	69.4	72.8	76.3	--	61.8	65.3	69.1	72.7	76.1	--							
Amplitud de deformación %	10	10	10	10	10		10	10	10	10	10		10	10	10	10	10								

Observaciones:

Los resultados corresponden a la muestra entregada por el cliente.

Elaborado por:
Miguel Angel Alfaro Huayanay
Técnico de Laboratorio de Suelos, Concreto y Asfalto
HISGEO LAB S.A.C.

Firma:




Revisado por:
Juan Carlos Zapata Silva
Ing. Civil CIP 55346
HISGEO LAB S.A.C.

Firma:



VIII.2. Resultados de laboratorio de la muestra de cemento asfáltico reforzada con 6% de fibra lignocelulósica.

 HISGEOLAB S.A.C	INFORME	Código	IF-TA-ACFW/OGJR-PN
	CONTROL DE CALIDAD DE ASFALTOS	Versión	01
		Fecha	03-01-2023
		Página	1 de 3
DATOS GENERALES			
Solicitante	: Aguilar Coronel Frank Willy / Olivera Gonzales Jerry Ronaldo		
Universidad	: Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza		
Especialidad	: Ingeniería Civil		
Tema de tesis	: "Resistencia a la oxidación del cemento asfáltico reforzado con fibra lignocelulósica"		
Ubicación	: Chachapoyas		
Fecha de emisión	: 13/06/2023		
DATOS GENERALES			
Muestra	: Modificación de asfalto 85/100 con Fibra Lignocelulósica		

ANÁLISIS DE ASFALTO 85/100 ADICIONANDO 6.0 % DE FIBRA LIGNOCELULÓSICA

1.0 CONTROL DE CALIDAD

1.1 Método para determinar punto de ablandamiento (Anillo y bola ASTM D-36).

Punto de ablandamiento	53	°C
------------------------	----	----

1.2 Método para determinar penetración (ASTM D-5).

Penetración (5s; 25°C)	70	dmm
------------------------	----	-----

1.3 Método para determinar ductilidad de los materiales bituminosos (Ductilómetro ASTM D-113)

Ductilidad (25°C, 5cm/min)	15	cm
----------------------------	----	----

1.4 Método para determinar viscosidad rotacional (Viscosímetro Brookfield ASTM D-4402).

Viscosidad brookfield (135°C)	665.0	cP
-------------------------------	-------	----

Viscosidad brookfield (145°C)	415.0	cP
-------------------------------	-------	----

Viscosidad brookfield (165°C)	192.5	cP
-------------------------------	-------	----

1.4 Método para determinar película fina rotatoria 163°C, 85 min (RTFOT ASTM D-2872).

1.4.1 Pruebas sobre la muestra de película fina rotatoria.

Pérdida de masa	0.282	%
-----------------	-------	---

Punto de ablandamiento	64.5	°C
------------------------	------	----

Penetración (5s; 25°C)	40	dmm
------------------------	----	-----

Ductilidad (25°C, 5cm/min)	9.8	cm
----------------------------	-----	----

Viscosidad brookfield (135°C)	1390.0	cP
-------------------------------	--------	----

Viscosidad brookfield (145°C)	795.0	cP
-------------------------------	-------	----

Viscosidad brookfield (165°C)	300.0	cP
-------------------------------	-------	----

Observaciones:

Los resultados corresponden a la muestra entregada por el cliente.

Elaborado por:
Miguel Angel Alfaro Huayanay
Técnico de Laboratorio de Suelos, Concreto y Asfalto
HISGEOLAB S.A.C.

Firma:




Revisado por:
Juan Carlos Zapata Silva
Ing. Civil CIP 56346
HISGEOLAB S.A.C.

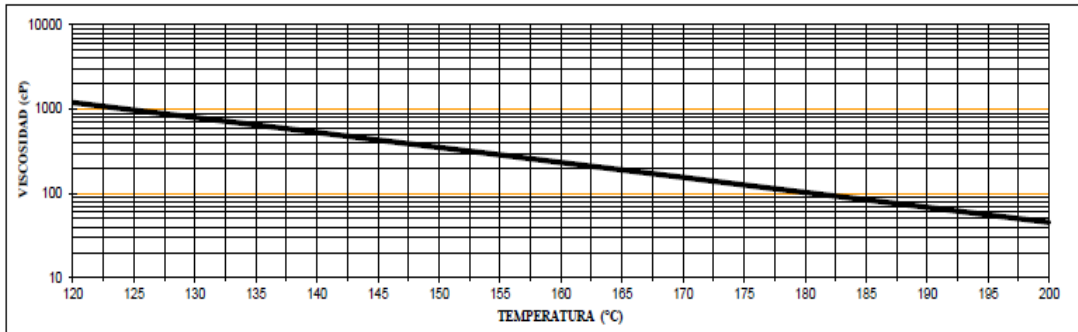
Firma:



Esta información es de exclusiva responsabilidad del solicitante. Prohibida su reproducción parcial o total sin la autorización de HISGEOLAB S.A.C.

 HISGEOLAB S.A.C	INFORME	Código	IF-TA-ACFW/OGJR-PN
	CONTROL DE CALIDAD DE ASFALTOS	Versión	01
		Fecha	03-01-2023
		Página	2 de 3

**GRÁFICO DE TEMPERATURAS DE MEZCLA Y COMPACTACIÓN
(6.0% FIBRA LIGNOCELULÓSICA)**



RANGO DE TEMPERATURA DE MEZCLA

146.8	A	153.8
136.9	A	146.8


RANGO DE TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN MEZCLA CONVENCIONAL

ESPECIFICACIÓN

RANGO DE TEMPERATURA DE MEZCLA CON VISCOSIDADES ENTRE 300 A 400 cP

RANGO DE TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN MEZCLA CONVENCIONAL CON VISCOSIDADES ENTRE 400 A 600 cP

Esta información es de exclusiva responsabilidad del solicitante. Prohibida su reproducción parcial o total sin la autorización de HISGEOLAB S.A.C.

	INFORME	Código	IF-TA-ACFW / OGJR-PN
	CONTROL DE CALIDAD DE ASFALTOS	Versión	01
		Fecha	03-01-2023
		Página	3 de 3

DATOS GENERALES	
Solicitante	: Agullar Coronel Frank Willy / Olivera Gonzales Jerry Ronaldo
Universidad	: Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza
Especialidad	: Ingeniería Civil
Tema de tesis	: "Resistencia a la oxidación del cemento asfáltico reforzado con fibra lignocelulósica"
Ubicación	: Chachapoyas
Fecha de emisión	: 13/06/2023

DATOS GENERALES	
Muestra	: Modificación de asfalto 85/100 con Fibra Lignocelulósica

**ANÁLISIS DE ASFALTO 85/100
ADICIONANDO 6.0 % DE FIBRA LIGNOCELULÓSICA**

2.0- MEDICIÓN DE PROPIEDADES REOLÓGICAS MEDIANTE REÓMETRO DE CORTE DINÁMICO (DSR).

2.1 Clasificación Ligante original (AASHTO T-315)

Muestra	N°- 1							
Temperatura de corte dinámico °C	58	64	70	76	82	88		
Corte dinámico G"/sen0, 10rad/s kPa	4.561	2.361	1.203	0.625	--	--		
Ángulo de fase δ,°	78.1	80.9	83.2	85.1	--	--		
Amplitud de deformación %	12	12	12	12				

Muestra	N°- 2							
Temperatura de corte dinámico °C	58	64	70	76	82	88		
Corte dinámico G"/sen0, 10rad/s kPa	4.578	2.409	1.216	0.657	--	--		
Ángulo de fase δ,°	78.2	80.7	82.9	85.4	--	--		
Amplitud de deformación %	12	12	12	12				

Muestra	Promedio de las lecturas N°-1 / N°-2							
Temperatura de corte dinámico °C	58	64	70	76	82	88		
Corte dinámico G"/sen0, 10rad/s kPa	4.570	2.385	1.210	0.641	--	--		Falla 1.0 kPa (mín)
Ángulo de fase δ,°	78.1	80.8	83.0	85.2	--	--		
Amplitud de deformación %	12	12	12	12				

2.2 Clasificación después de envejecimiento RTPOT 163°C, 85 min (AASHTO T-240)

Muestra	N°- 1							
Temperatura de corte dinámico °C	58	64	70	76	82	88		
Corte dinámico G"/sen0, 10rad/s kPa	20.465	10.291	5.213	2.717	1.451	--		
Ángulo de fase δ,°	68.8	72.3	75.7	78.7	81.3	--		
Amplitud de deformación %	10	10	10	10	10			

Muestra	N°- 2							
Temperatura de corte dinámico °C	58	64	70	76	82	88		
Corte dinámico G"/sen0, 10rad/s kPa	20.502	10.012	5.201	2.698	1.467	--		
Ángulo de fase δ,°	68.5	72.5	75.6	78.5	80.9	--		
Amplitud de deformación %	10	10	10	10	10			

Muestra	Promedio de las lecturas N°-1 / N°-2							
Temperatura de corte dinámico °C	58	64	70	76	82	88		
Corte dinámico G"/sen0, 10rad/s kPa	20.484	10.152	5.207	2.708	1.459	--		Falla 2.2 kPa (mín)
Ángulo de fase δ,°	68.7	72.4	75.6	78.6	81.1	--		
Amplitud de deformación %	10	10	10	10	10			

Observaciones:

Los resultados corresponden a la muestra entregada por el cliente.

Elaborado por:
Miguel Angel Afaro Huayanay
Técnico de Laboratorio de Suelos, Concreto y Asfalto
HISGEOLAB S.A.C.

Firma:




Revisado por:
Juan Carlos Zapata Silva
Ing. CIVIL CIP 55348
HISGEOLAB S.A.C.

Firma:



VIII.3. Resultados de laboratorio de la muestra de cemento asfáltico reforzada con 8% de fibra lignocelulósica.

 HISGEO LAB S.A.C	INFORME	Código	IF-TA-ACFW/00JR-PN
	CONTROL DE CALIDAD DE ASFALTOS	Versión	01
		Fecha	03-01-2023
		Página	1 de 3
DATOS GENERALES			
Solicitante	: Aguilár Coronel Frank Willy / Olivera Gonzales Jerry Ronaldo		
Universidad	: Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza		
Especialidad	: Ingeniería Civil		
Tema de tests	: "Resistencia a la oxidación del cemento asfáltico reforzado con fibra lignocelulósica"		
Ubicación	: Chachapoyas		
Fecha de emisión	: 13/06/2023		
DATOS GENERALES			
Muestra	: Modificación de asfalto 85/100 con Fibra Lignocelulósica		

ANÁLISIS DE ASFALTO 85/100 ADICIONANDO 8.0 % DE FIBRA LIGNOCELULÓSICA

1.0 CONTROL DE CALIDAD

1.1 Método para determinar punto de ablandamiento (Anillo y bola ASTM D-36).

Punto de ablandamiento	56	°C
------------------------	----	----

1.2 Método para determinar penetración (ASTM D-5).

Penetración (5s; 25°C)	63	dmm
------------------------	----	-----

1.3 Método para determinar ductilidad de los materiales bituminosos (Ductilómetro ASTM D-113)

Ductilidad (25°C, 5cm/min)	15.5	cm
----------------------------	------	----

1.4 Método para determinar viscosidad rotacional (Viscosímetro Brookfield ASTM D-4402).

Viscosidad brookfield (135°C)	770.0	cP
-------------------------------	-------	----

Viscosidad brookfield (145°C)	470.0	cP
-------------------------------	-------	----

Viscosidad brookfield (165°C)	210.0	cP
-------------------------------	-------	----

1.4 Método para determinar película fina rotatoria 163°C, 85 min (RTFOT ASTM D-2872).

1.4.1 Pruebas sobre la muestra de película fina rotatoria.

Pérdida de masa	0.242	%
-----------------	-------	---

Punto de ablandamiento	62	°C
------------------------	----	----

Penetración (5s; 25°C)	40	dmm
------------------------	----	-----

Ductilidad (25°C, 5cm/min)	9.0	cm
----------------------------	-----	----

Viscosidad brookfield (135°C)	1598.0	cP
-------------------------------	--------	----

Viscosidad brookfield (145°C)	890.0	
-------------------------------	-------	--

Viscosidad brookfield (165°C)	357.5	cP
-------------------------------	-------	----

Observaciones:

Los resultados corresponden a la muestra entregada por el cliente.

Elaborado por:
Miguel Angel Alfaro Huayanay
Técnico de Laboratorio de Suelos, Concreto y Asfalto
HISGEO LAB S.A.C.

Firma:




Revisado por:
Juan Carlos Zapata Silva
Ing. Civil CIP 56346
HISGEO LAB S.A.C.

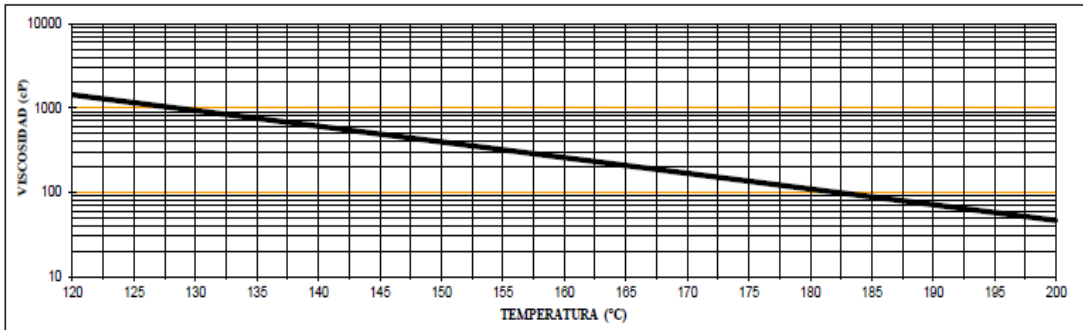
Firma:



Esta información es de exclusiva responsabilidad del solicitante. Prohibida su reproducción parcial o total sin la autorización de HISGEO LAB S.A.C.

 HISGEOLAB S.A.C	INFORME	Código	IF-TA-ACFW/OGJR-PN
	CONTROL DE CALIDAD DE ASFALTOS	Versión	01
		Fecha	03-01-2023
		Página	2 de 3

**GRÁFICO DE TEMPERATURAS DE MEZCLA Y COMPACTACIÓN
(8.0% FIBRA LIGNOCELULÓSICA)**




RANGO DE TEMPERATURA DE MEZCLA
RANGO DE TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN MEZCLA CONVENCIONAL

149.7	A	156.4
140.2	A	149.7

ESPECIFICACIÓN

RANGO DE TEMPERATURA DE MEZCLA CON VISCOSIDADES ENTRE 300 A 400 cP
RANGO DE TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN MEZCLA CONVENCIONAL CON VISCOSIDADES ENTRE 400 A 600 cP

Esta información es de exclusiva responsabilidad del solicitante. Prohibida su reproducción parcial o total sin la autorización de HISGEOLAB S.A.C.

	INFORME	Código	IF-TA-ACFW / OGJR-PN
	CONTROL DE CALIDAD DE ASFALTOS	Versión	01
		Fecha	03-01-2023
		Página	3 de 3

DATOS GENERALES	
Solicitante	: Agullar Coronel Frank Willy / Olivera Gonzales Jerry Ronaldo
Universidad	: Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza
Especialidad	: Ingeniería Civil
Tema de tesis	: "Resistencia a la oxidación del cemento asfáltico reforzado con fibra lignocelulósica"
Ubicación	: Chachapoyas
Fecha de emisión	: 13/06/2023

DATOS GENERALES	
Muestra	: Modificación de asfalto 85/100 con Fibra Lignocelulósica

**ANÁLISIS DE ASFALTO 85/100
ADICIONANDO 8.0 % DE FIBRA LIGNOCELULÓSICA**

2.0- MEDICIÓN DE PROPIEDADES REOLÓGICAS MEDIANTE REÓMETRO DE CORTE DINÁMICO (DSR).

2.1 Clasificación Ligante original (AASHTO T-315)

Muestra	N°- 1								
Temperatura de corte dinámico °C	58	64	70	76	82	88			
Corte dinámico G*/senθ, 10rad/s kPa	5.991	2.871	1.421	0.725	-	-			
Ángulo de fase δ, °	77.9	80.8	83.1	85.0	-	-			
Amplitud de deformación %	12	12	12	12					

Muestra	N°- 2								
Temperatura de corte dinámico °C	58	64	70	76	82	88			
Corte dinámico G*/senθ, 10rad/s kPa	5.944	2.886	1.432	0.749	-	-			
Ángulo de fase δ, °	78.2	81.0	83.3	85.2	-	-			
Amplitud de deformación %	12	12	12	12					

Muestra	Promedio de las lecturas N°-1 / N°-2								
Temperatura de corte dinámico °C	58	64	70	76	82	88			
Corte dinámico G*/senθ, 10rad/s kPa	5.968	2.879	1.427	0.737	-	-			Falla 1.0 kPa (mín)
Ángulo de fase δ, °	78.0	80.9	83.2	85.1	-	-			
Amplitud de deformación %	12	12	12	12					

2.2 Clasificación después de envejecimiento RTFOT 163°C, 85 min (AASHTO T-240)

Muestra	N°- 1								
Temperatura de corte dinámico °C	58	64	70	76	82	88			
Corte dinámico G*/senθ, 10rad/s kPa	30.211	12.890	7.015	3.021	1.763	-			
Ángulo de fase δ, °	68.2	72.1	75.0	78.2	81.0	-			
Amplitud de deformación %	10	10	10	10	10				

Muestra	N°- 2								
Temperatura de corte dinámico °C	58	64	70	76	82	88			
Corte dinámico G*/senθ, 10rad/s kPa	30.119	12.766	7.033	2.974	1.755	-			
Ángulo de fase δ, °	68.0	72.0	74.8	78.0	81.2	-			
Amplitud de deformación %	10	10	10	10	10				

Muestra	Promedio de las lecturas N°-1 / N°-2								
Temperatura de corte dinámico °C	58	64	70	76	82	88			
Corte dinámico G*/senθ, 10rad/s kPa	30.165	12.828	7.024	2.998	1.759	-			Falla 2.2 kPa (mín)
Ángulo de fase δ, °	68.1	72.0	74.9	78.1	81.1	-			
Amplitud de deformación %	10	10	10	10	10				

Observaciones:

Los resultados corresponden a la muestra entregada por el cliente.

Elaborado por:
Miguel Angel Alfaro Huayanay
Técnico de Laboratorio de Suelos, Concreto y Asfalto
HISGEO LAB S.A.C.

Firma:




Revisado por:
Juan Carlos Zapata Silva
Ing. Civil CIP 55346
HISGEO LAB S.A.C.

Firma:



VIII.4. Resultados de laboratorio de la muestra de cemento asfáltico reforzada con 11% de fibra lignocelulósica.

	INFORME	Código	IF-TA-ACFW/OGJR-PN
	CONTROL DE CALIDAD DE ASFALTOS	Versión	01
		Fecha	03-01-2023
		Página	1 de 3
DATOS GENERALES			
Solicitante	: Aguilar Coronel Frank Willy / Olivera Gonzales Jerry Ronaldo		
Universidad	: Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza		
Especialidad	: Ingeniería Civil		
Tema de tesis	: "Resistencia a la oxidación del cemento asfáltico reforzado con fibra lignocelulósica"		
Ubicación	: Chachapoyas		
Fecha de emisión	: 13/06/2023		
DATOS GENERALES			
Muestra	: Modificación de asfalto 85/100 con Fibra Lignocelulósica		

ANÁLISIS DE ASFALTO 85/100 ADICIONANDO 11.0 % DE FIBRA LIGNOCELULÓSICA

1.0 CONTROL DE CALIDAD

1.1 Método para determinar punto de ablandamiento (Anillo y bola ASTM D-36).

Punto de ablandamiento	58	°C
------------------------	----	----

1.2 Método para determinar penetración (ASTM D-5).

Penetración (5s; 25°C)	59	dmm
------------------------	----	-----

1.3 Método para determinar ductilidad de los materiales bituminosos (Ductilómetro ASTM D-113)

Ductilidad (25°C, 5cm/min)	16	cm
----------------------------	----	----

1.4 Método para determinar viscosidad rotacional (Viscosímetro Brookfield ASTM D-4402).

Viscosidad brookfield (135°C)	1040.0	cP
-------------------------------	--------	----

Viscosidad brookfield (145°C)	610.0	cP
-------------------------------	-------	----

Viscosidad brookfield (165°C)	292.5	cP
-------------------------------	-------	----

1.4 Método para determinar película fina rotatoria 163°C, 85 min (RTFOT ASTM D-2872).

1.4.1 Pruebas sobre la muestra de película fina rotatoria.

Pérdida de masa	0.199	%
-----------------	-------	---

Punto de ablandamiento	67	°C
------------------------	----	----

Penetración (5s; 25°C)	31	dmm
------------------------	----	-----

Ductilidad (25°C, 5cm/min)	8.0	cm
----------------------------	-----	----

Viscosidad brookfield (135°C)	2035.0	cP
-------------------------------	--------	----

Viscosidad brookfield (145°C)	1118.0	cP
-------------------------------	--------	----

Viscosidad brookfield (165°C)	420.0	cP
-------------------------------	-------	----

Observaciones:

Los resultados corresponden a la muestra entregada por el cliente.

Elaborado por:
Miguel Angel Afaro Huayanay
Técnico de Laboratorio de Suelos, Concreto y Asfalto
HISGEOLAB S.A.C.


Firma:



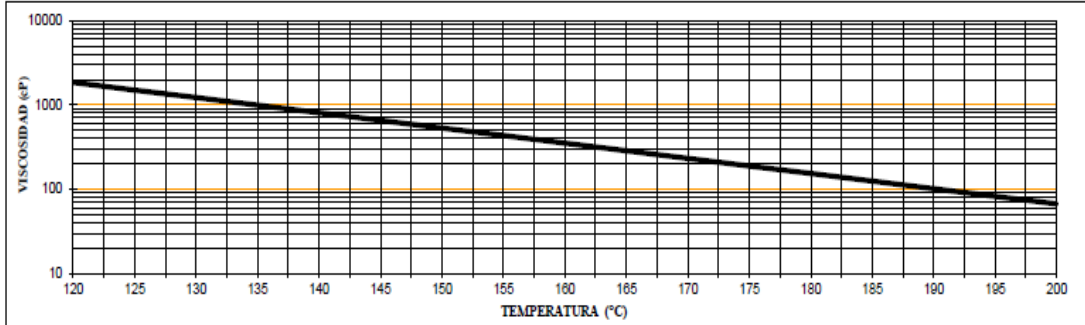
Revisado por:
Juan Carlos Zapata Silva
Ing. Civil CIP 56346
HISGEOLAB S.A.C.

Firma:



 HISGEOLAB S.A.C	INFORME	Código	IF-TA-ACFWIOGJR-PN
	CONTROL DE CALIDAD DE ASFALTOS	Versión	01
		Fecha	03-01-2023
		Página	2 de 3

**GRÁFICO DE TEMPERATURAS DE MEZCLA Y COMPACTACIÓN
(11.0% FIBRA LIGNOCELULÓSICA)**



RANGO DE TEMPERATURA DE MEZCLA

156.9	A	163.8
147.1	A	156.9


RANGO DE TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN MEZCLA CONVENCIONAL

ESPECIFICACIÓN

RANGO DE TEMPERATURA DE MEZCLA CON VISCOSIDADES ENTRE 300 A 400 cP

RANGO DE TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN MEZCLA CONVENCIONAL CON VISCOSIDADES ENTRE 400 A 600 cP

Esta información es de exclusiva responsabilidad del solicitante. Prohibida su reproducción parcial o total sin la autorización de HISGEOLAB S.A.C.

	INFORME	Código	IF-TA-ACFW / OGJR-PN
	CONTROL DE CALIDAD DE ASFALTOS	Versión	01
		Fecha	03-01-2023
		Página	3 de 3

DATOS GENERALES	
Solicitante	: Aguiar Coronel Frank Willy / Olivera Gonzales Jerry Ronaldo
Universidad	: Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza
Especialidad	: Ingeniería Civil
Tema de tesis	: "Resistencia a la oxidación del cemento asfáltico reforzado con fibra lignocelulósica"
Ubicación	: Chachapoyas
Fecha de emisión	: 13/06/2023

DATOS GENERALES	
Muestra	: Modificación de asfalto 85/100 con Fibra Lignocelulósica

**ANÁLISIS DE ASFALTO 85/100
ADICIONANDO 11.0 % DE FIBRA LIGNOCELULÓSICA**

2.0- MEDICIÓN DE PROPIEDADES REOLÓGICAS MEDIANTE REÓMETRO DE CORTE DINÁMICO (DSR).

2.1 Clasificación Ligante original (AASHTO T-315)

Muestra	N°- 1						N°- 2						Promedio de las lecturas N°-1 / N°-2						
Temperatura de corte dinámico °C	58	64	70	76	82	88	58	64	70	76	82	88	58	64	70	76	82	88	Falla 1.0 kPa (mín)
Corte dinámico G*/senδ, 10rad/s	7.484	3.579	1.771	0.903	--	--	7.492	3.567	1.763	0.911	--	--	7.488	3.573	1.767	0.907	--	--	
Ángulo de fase δ, °	77.3	80.2	82.7	84.7	--	--	77.7	80.1	82.9	84.4	--	--	77.5	80.2	82.8	84.6	--	--	
Amplitud de deformación %	12	12	12	12			12	12	12	12			12	12	12	12			

2.2 Clasificación después de envejecimiento RTPOT 163°C, 85 min (AASHTO T-240)

Muestra	N°- 1						N°- 2						Promedio de las lecturas N°-1 / N°-2						
Temperatura de corte dinámico °C	58	64	70	76	82	88	58	64	70	76	82	88	58	64	70	76	82	88	Falla 2.2 kPa (mín)
Corte dinámico G*/senδ, 10rad/s	38.227	19.079	9.805	5.051	2.664	1.434	38.241	19.1	9.82	5.034	2.655	1.443	38.234	19.090	9.814	5.043	2.660	1.439	
Ángulo de fase δ, °	68.0	71.9	74.7	78.0	80.9	81.2	67.8	71.7	74.4	78.1	80.4	81.0	67.9	71.8	74.5	78.0	80.6	81.1	
Amplitud de deformación %	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	11	

Observaciones:

Los resultados corresponden a la muestra entregada por el cliente.

Elaborado por:
Miguel Angel Afaro Huayanay
Técnico de Laboratorio de Suelos, Concreto y Asfalto
HISGEO LAB S.A.C.

Firma:



Revisado por:
Juan Carlos Zapata Silva
Ing. Civil CIP 55346
HISGEO LAB S.A.C.

Firma:

