

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL ASFALTO MODIFICADO
CON CENIZAS DE CASCARILLA DE ARROZ**

**MARIA CAMILA PARRA BECHARA
JULIÁN CAMILO GALLO ORTIZ**



**UNIVERSIDAD DE IBAGUÉ
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
IBAGUÉ
2018**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL ASFALTO MODIFICADO
CON CENIZAS DE CASCARILLA DE ARROZ**

**MARIA CAMILA PARRA BECHARA
JULIÁN CAMILO GALLO ORTIZ**

**DIRECTOR DE PROYECTO
MARIA PAULA SALAZAR SUSUNAGA
ING. CIVIL**



**UNIVERSIDAD DE IBAGUÉ
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
IBAGUÉ
2018**

AGRADECIMIENTOS

Principalmente agradecer a Dios y a nuestras familias, por sus bendiciones y privilegiarnos con tener la posibilidad de hacer nuestra carrera universitaria, además de darnos la fortaleza para poder culminar con éxito este reto universitario.

También reconocer el gran apoyo y acompañamiento de nuestra tutora la ingeniera María Paula Salazar Susunaga, porque nos brindó un excelente asesoramiento y orientación para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto de investigación. Así mismo agradecerle a los

Miembros del laboratorio de suelos y concretos de la universidad, porque nos asesoraron en cada momento que se presentaron dudas en el transcurso de la ejecución de las pruebas de laboratorio.

DEDICATORIA

Este gran momento lo dedico principalmente a Dios, mi madre, mi padre y mi hermano, porque sin ellos este sueño no podría haber sido realidad, con su apoyo incondicional crearon cada uno de los peldaños de esta escalera para poder superar cada una de las barreras y alcanzar esta meta.

A mi abuela Gabriela Quintana que siempre me mantuvo en sus oraciones y ahora desde el cielo me bendice cada día.

Julián Camilo Gallo Ortiz

DEDICATORIA

Principalmente a Dios por su maravillosa guía y enseñanza.

A mis padres por estar constantemente apoyándome y dándome sus valiosos consejos,
siendo quienes me dan el empuje para seguir adelante con empeño.

A mis hermanos por su gran compañía, demostrando siempre estar en los momentos que
más los necesito.

María Camila Parra Bechara

NOTA DE ACEPTACIÓN

JURADO

FIRMA DEL PRESIDENTE DEL

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

IBAGUÉ _____

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	14
1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	15
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.2 FORMULACION DEL PROBLEMA	17
2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	17
2.1 GRAN PRODUCCIÓN DE ARROZ EN COLOMBIA	17
2.2 AUSENCIA DE ESTUDIOS EN LA MODIFICACION DE ASFALTOS CON CENIZAS DE CASCARILLA DE ARROZ	18
2.3 MALLA VIAL EN COLOMBIA	19
3. OBJETIVOS.....	21
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	21
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
4. MARCO DE REFERENCIA	22
4.1 MARCO TEORICO	22
4.1.1 Asfalto.....	22
4.1.2 Asfalto modificado.....	22
4.1.3 Penetrometro de asfalto.....	23
4.1.4 Punto de ablandamiento	23
4.1.5 Peso Específico.	23
4.1.6 Viscosímetro Rotacional.....	23

4.1.7	Picnómetro.....	23
4.1.8	Adherencia en bandeja.....	23
4.1.9	Stripping.....	24
4.1.10	Cascarilla de arroz.....	24
4.2	MARCO TEXTUAL.....	24
4.2.1	Antecedentes de estudios realizados a asfaltos modificados con cenizas de cascarilla de arroz.....	24
4.2.2	Impactos del asfalto modificado con cenizas de cascarilla de arroz en Colombia. 25	
5	METODOLOGÍA.....	26
5.2	ESTRATEGIA METODOLOGICA.....	26
	5.2. ENSAYOS DE LABORATORIO.....	27
5.2.1.	ENSAYOS DE CARACTERIZACION DEL ASFALTO.....	27
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	29
6.1.	ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA.....	29
6.2.	PUNTO DE ABLANDAMIENTO.....	33
6.3.	ADHERENCIA EN BANDEJA.....	35
6.4.	ENSAYO DE PENETRACIÓN.....	37
6.5.	ENSAYO DE STRIPPING.....	42
6.6.	VISCOSIMETRO ROTACIONAL.....	43
7.	CONCLUSIONES.....	47
8.	RECOMENDACIONES.....	48
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	49
10.	ANEXOS.....	52
	ANEXO A: RESULTADOS PUNTO DE ABLANDAMIENTO.....	52

ANEXO B: RESULTADOS ADHERENCIA EN BANDEJA	60
ANEXO C: TABLA 410-01 ESPECIFICACIONES DEL CEMENTO	61
ANEXO D. RESULTADOS VISCOSIMENTRO ROTACIONAL	62

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 RESULTADOS GRAVEDAD ESPECÍFICA (A. CONVENCIONAL)	30
TABLA 2 RESULTADOS GRAVEDAD ESPECÍFICA (A. MODIFICADO 4%)	30
TABLA 3 RESULTADOS GRAVEDAD ESPECÍFICA (A. MODIFICADO 4.5%)	31
TABLA 4 RESULTADOS GRAVEDAD ESPECÍFICA (A. MODIFICADO 5%)	31
TABLA 5 RESULTADOS GRAVEDAD ESPECÍFICA (A. MODIFICADO 5.5%)	32
TABLA 6 RESULTADOS GRAVEDAD ESPECÍFICA (A. MODIFICADO 6%)	32
TABLA 7 RESULTADOS DE PENETRACIÓN (A. CONVENCIONAL)	38
TABLA 8 RESULTADOS DE PENETRACIÓN (A. MODIFICADO 4%)	38
TABLA 9 RESULTADOS DE PENETRACIÓN (A. MODIFICADO 4.5%)	39
TABLA 10 RESULTADOS DE PENETRACIÓN (A. MODIFICADO 5%)	39
TABLA 11 RESULTADOS DE PENETRACIÓN (A. MODIFICADO 5.5%)	40
TABLA 12 RESULTADOS DE PENETRACIÓN (A. MODIFICADO 6%)	40
TABLA 13 RESULTADOS ENSAYO STRIPPING	43

TABLA DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1: ESTRUCTURA DE LA CADENA PRODUCTIVA DE ARROZ	16
ILUSTRACIÓN 2 PRODUCCIÓN DE ARROZ SECO EN COLOMBIA POR SEMESTRES DESDE 2000 HASTA 2018 (TONELADAS).....	18
ILUSTRACIÓN 3 ESTADO MALLA VIAL DE COLOMBIA AÑO 2018	20
ILUSTRACIÓN 4 ENSAYOS DE GRAVEDAD ESPECIFICA ASFALTO CONVENCIONAL	29
ILUSTRACIÓN 5 ENSAYO DE PUNTO DE ABLANDAMIENTO	33
ILUSTRACIÓN 6 ENSAYO DE ADHERENCIA EN BANDEJA	35
ILUSTRACIÓN 7 ENSAYO DE PENETRACIÓN	37
ILUSTRACIÓN 8 MARGEN DE ERROR DE RESULTADOS ENSAYO DE PENETRACIÓN.....	41
ILUSTRACIÓN 9 ENSAYO STRIPPING DEL ASFALTO CONVENCIONAL.....	42
ILUSTRACIÓN 10 ENSAYO DE VISCOSÍMETRO ROTACIONAL	43
ILUSTRACIÓN 11 ANEXO A. TABLA DE ESPECIFICACIONES DEL CEMENTO ASFALTICO.....	61

RESUMEN

En la producción industrial del arroz se obtiene una cascara que hasta el momento no ha sido utilizada en esta industria y más de la mitad es desechada, convirtiéndose en un agente contaminante. La parte comercializada es llevada a fábricas donde la utilizan como combustible generando grandes cantidades de cenizas, esto podría ser la consecuencia de otro problema ambiental debido a que el gran porcentaje de estas cenizas terminan convirtiéndose en basura. Colombia es un gran productor de arroz y según la federación arrocera de este país, en el año 2017 se produjeron 2'619.043 toneladas métricas de arroz donde estas generaron aproximadamente 700 mil toneladas métricas de cascarilla de arroz (Fedearroz, 2018), estas cenizas son conocidas científicamente como RHA por sus siglas en inglés.

Este proyecto pretende estudiar los efectos del RHA como agente modificador del asfalto convencional. Las cenizas fueron utilizadas en 5 porcentajes modificadores diferentes (4, 4.5, 5, 5.5, 6). Cada uno de ellos se sometió a diversas pruebas; punto de ablandamiento, viscosímetro rotacional, adherencia Stripping, gravedad específica, adherencia en bandeja y penetración, donde el número total de ensayos fueron 144. Con los resultados obtenidos se realizó una caracterización de sus propiedades con el fin de poder comparar los asfaltos modificados con el convencional, determinando que el RHA mejora las propiedades mecánicas y reológicas del agente bituminoso.

Este trabajo se realizó en dos fases, la primera se basó principalmente en realizar todos los ensayos a todos los asfaltos y la segunda se trató en el procesamiento y análisis de resultados obtenidos en la primera fase, este procesamiento de información arroja la viabilidad del uso de los asfaltos modificados en los porcentajes utilizados en este proyecto.

ABSTRACT

In the industrial production of rice, a shell has been obtained that until now has not been used in this industry and more than half is discarded, becoming a contaminating agent. The commercialized part has been taken to factories in which the use as fuel is generating large amounts of ash, this entails another environmental problem because the large percentage of these ashes end up becoming garbage. Colombia is a huge producer of rice and according to the rice federation of this country, in the year 2017 there were 2'619,043 metric tons of rice where these generated approximately 700 thousand metric tons of rice husks, these ashes are scientifically known as RHA by its acronym in English.

This project aims to study the effects of RHA as a conventional asphalt modifying agent. The ashes were used in 5 different modifying percentages (4, 4.5, 5, 5.5, 6). Each of them underwent some tests; softening point, rotational viscometer, Stripping adhesion, specific gravity, tray adhesion and penetration, where the total number of tests was 144. With the results obtained, a characterization of its properties was carried out in order to be able to compare the modified asphalts with the conventional, determining that the RHA improves the mechanical and rheological properties of the bituminous agent.

This work was carried out in two phases, the first one is mainly based on carrying out all the tests and all the analyzes in the first phase, this information process shows the feasibility of using the modified asphalts in the percentages used in this project.

INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes elementos para una eficaz comunicación y óptimo traslado de un lugar a otro, son las vías para lo que se requiere de materiales que alarguen la vida de las mismas aportando durabilidad y resistencia ante los diferentes eventos que está expuesta en su diario vivir, por esto a lo largo de los años se ha buscado e investigado diferentes maneras que sea posible lograr dichas ideas de mejoramiento, uno de ellos es este trabajo en donde se busca evaluar el comportamiento del asfalto convencional al incluir en sus agregados las cenizas de cascarilla de arroz.

Al incinerar la cascarilla, la ceniza resultante contiene un porcentaje en sílice superior al 90%, lo cual la hace una potencial fuente de sílice (Mejía, 2012). Las principales impurezas que contiene esta sílice son: calcio, potasio, magnesio y manganeso y como secundarias aluminio, hierro (10-20ppm), boro y fósforo. (1-40 ppm) (Rodríguez, J.E. et al., 1992), buscando con estas propiedades prolongar la vida útil del asfalto convencional y también dar una utilidad a las cenizas, ya que a lo largo del tiempo han sido tratadas como un desecho sin tener un uso eficaz.

Para ello se requiere llevar a cabo diversas pruebas de ensayo y error de las cuales hace parte diferentes cantidades de agregado de cenizas de cascarilla de arroz, logrando de esta manera encontrar y a su vez determinar el porcentaje que logre aportar una mejora a sus propiedades físicas y reológicas ya intrínsecas, y así evidenciar la viabilidad que tendría o no este nuevo agregado. Cabe resaltar que para llevar a cabo estos ensayos el asfalto debe estar en estado líquido para esto se debe calentar teniendo precaución que su temperatura no supere los 110 ° C, ya que si llega a pasar

1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

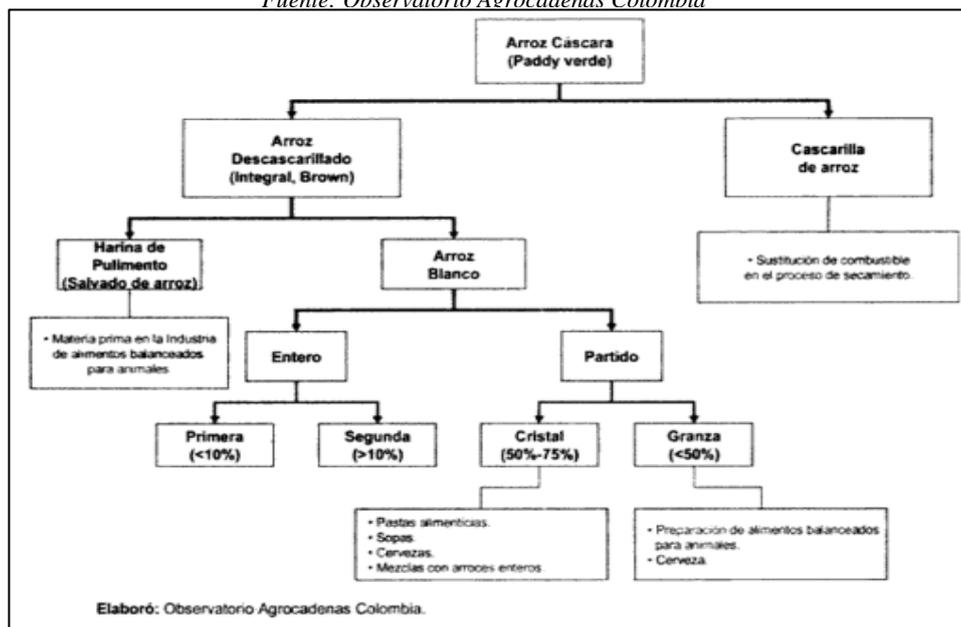
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En las carreteras, el asfalto es el principal componente debido a que es un material impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes. Este elemento es tan importante en los pavimentos que se ha buscado modificar con materiales que logren mejorar sus propiedades, presentando un mejor comportamiento a los cambios climáticos y de temperatura. Además, siendo más resistente al envejecimiento, aumentando la capacidad de carga y de soporte, mejoras en las condiciones de elasticidad, flexibilidad, cohesión y viscosidad, lo cual redundaría en una mayor vida útil y en la disminución del espesor de la carpeta de asfalto (Registrocdt, s.f.). Para esto se quiere incluir en el asfalto la ceniza de cascarilla de arroz la cual gracias a sus características de aislante térmico, combustible alternativo entre otras, podría aportar dichas mejoras.

Para lograr obtener la cascarilla de arroz esta debe ser sometida a cierto proceso el cual se observa en la siguiente estructura de la cadena productiva de arroz.

Ilustración 1: Estructura de la cadena productiva de arroz

Fuente: Observatorio Agro cadenas Colombia



Según la federación arrocera de Colombia, en el año 2017 en el país se produjeron 2'619.043 toneladas métricas de arroz donde estas generaron aproximadamente 700 mil toneladas métricas de cascarilla de arroz. (Fedearroz, 2018), de las cuales cerca de un 15% es aprovechado como combustible y otra poca cantidad como elemento para esparcir en establos (Aguilar, 2009), lo que significa que una gran proporción de esta cascarilla es incinerada sin ningún tipo de utilidad o arrojada a cursos

de agua, lo cual repercute negativamente en el ecosistema, dadas las exigentes condiciones que requiere su combustión completa. Por otro lado al darle esta utilidad a la ceniza se logra mitigar este gran impacto ambiental mencionado anteriormente, y se logra aprovechar sus grandes cualidades mecánicas.

1.2 FORMULACION DEL PROBLEMA

¿Es viable agregar cenizas de cascarilla de arroz al asfalto convencional en busca de mejorar sus propiedades físicas y reológicas?

2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

2.1 GRAN PRODUCCIÓN DE ARROZ EN COLOMBIA

Colombia es un gran productor de arroz, produciendo este grano en su gran mayoría en los departamentos de Huila Y Tolima. En la producción industrial de este se obtiene una cascarilla la cual no es utilizada en esta industria y más de la mitad es desechada, convirtiéndose en un desecho contaminante. Por otra parte se comercializa este material donde algunas fábricas utilizan la cascara como combustible generando grandes cantidades de cenizas, esto lleva a generar otro problema ambiental debido a que el gran porcentaje de estas de cenizas terminan convirtiéndose en basura. Según la federación arrocera de Colombia, en el año 2017 en el país se produjeron 2’619.043 toneladas métricas de arroz donde estas generaron aproximadamente 700 mil toneladas métricas de cascarilla de arroz. (Fedearroz, 2018)

Año	Mecanizado A	Mecanizado B	Subtotal	Manual	Total
2000	1,364,462	840,488	2,204,950	32,320	2,237,270
2001	1,316,128	807,862	2,123,990	32,320	2,156,310
2002	1,226,436	804,274	2,030,710	32,320	2,063,030
2003	1,535,584	859,286	2,394,870	32,320	2,427,190
2004	1,606,870	857,526	2,464,396	32,320	2,496,716
2005	1,296,587	767,511	2,064,098	32,320	2,096,418
2006	1,148,601	762,198	1,910,799	32,320	1,943,119
2007	1,191,375	893,524	2,084,899	28,590	2,113,489
2008	1,433,946	939,426	2,373,372	28,590	2,401,962
2009	1,510,431	916,098	2,426,529	28,590	2,455,119
2010	1,307,097	615,650	1,922,747	28,590	1,951,337
2011	1,177,875	763,509	1,941,384	28,590	1,969,974
2012	1,169,927	679,279	1,849,206	28,590	1,877,796
2013	1,219,907	724,362	1,944,269	28,590	1,972,859
2014	1,066,302	677,191	1,743,493	28,590	1,772,083
2015	1,324,337	663,847	1,988,184	28,590	2,016,774
2016	1,875,627	650,551	2,526,178	27,399	2,553,577
2017*	1,750,179	841,465	2,591,644	27,399	2,619,043

Ilustración 2 Producción de arroz seco en Colombia por semestres desde 2000 hasta 2018 (Toneladas)

Fuente: Dane - Fedearroz

Como se aprecia en la anterior ilustración, en el país se presentan grandes producciones de arroz y es allí donde nace la necesidad de realizar esta investigación, para aportar en la búsqueda de disminuir el desecho de agentes contaminantes en esta industria agrícola.

2.2 AUSENCIA DE ESTUDIOS EN LA MODIFICACION DE ASFALTOS CON CENIZAS DE CASCARILLA DE ARROZ

Aunque existen estudios que realizaron la aplicación de este material en producciones de concreto, el uso de estas cenizas en la modificación de asfaltos está en

etapas iniciales y se han realizado muy pocos análisis de su comportamiento. Es por ello, que se realizó la evaluación de algunos aspectos que no han sido plasmados en la adición de cenizas de cascarilla de arroz al asfalto convencional. En el estudio se evidencia la viabilidad del uso de este material con el ligante, para encontrar otra usanza óptima de este desecho industrial y así mismo encontrar otro debido manejo de estas trizas contaminantes.

Los pocos estudios realizados en base a este tipo de modificación de asfaltos convencionales se han realizado en países asiáticos, más específicamente en Irán y China, en los años 2015 y 2017 respectivamente, en estos utilizan distintos porcentajes de modificación, valores entre el 1 y el 20% en relación con el asfalto, los porcentajes donde se presentan mejores rendimientos de estas modificaciones en estos estudios se encontraban en el rango del 2% al 7% de porcentaje de modificación (Chang'an University, Xi'an, China, 2017).

2.3 MALLA VIAL EN COLOMBIA

Según el Instituto Nacional de Vías. La malla vial del país en la actualidad se encuentra aproximadamente en un 52% en óptimo estado (INVIAS, 2018). A partir del mejoramiento del asfalto convencional se puede aumentar este porcentaje, ya que si las vías asfaltadas del país presentan mejores propiedades físicas y de resistencia, gracias a los asfaltos modificados, los daños en estas van a ser menores y así mismo las inversiones en reparaciones y mantenimiento. Llevando esto a que puedan ser reparadas y mejoradas más vías del país. A continuación se puede observar los kilómetros por estado en el que se encuentra la malla vial de Colombia.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS E INNOVACIÓN														Jun-18	
No.	TERRITORIAL	PAVIMENTADO (Kms)					SIN PAVIMENTAR (Kms)					RED TOTAL CALIFICADA			
		MUY BUENO	BUENO	REGULAR	REGULAR MALO	MUY MALO	MUY BUENO	BUENO	REGULAR	REGULAR MALO	MUY MALO	PAV.	SIN PAV.	INTERV.	TOTAL
1	ANTIOQUIA	9,70	101,07	168,95	77,99	0,00	0,00	7,76	0,00	0,00	0,00	357,70	7,76	0,00	365,47
2	ATLÁNTICO	0,00	8,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,45	0,00	0,00	8,45
3	BOLÍVAR	4,88	34,46	22,80	6,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	68,36	0,00	0,00	68,36	
4	BOYACÁ	67,76	201,49	280,04	98,62	0,00	0,00	5,78	21,00	141,06	26,32	647,91	194,15	0,00	842,06
5	CALDAS	34,36	100,55	36,04	7,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	177,97	0,00	0,00	177,97	
6	CAQUETÁ	133,16	74,57	68,65	102,85	0,00	0,00	1,61	21,70	15,34	18,05	379,23	56,70	9,45	445,37
7	CASANARE	0,16	262,39	264,67	30,64	0,28	0,00	0,00	36,66	15,20	0,00	558,14	51,86	0,00	610,00
8	CAUCA	63,69	150,87	223,44	131,41	1,01	3,97	38,06	281,30	309,26	9,72	570,41	642,31	0,00	1.212,73
9	CESAR	26,99	69,66	14,72	22,11	0,00	0,00	3,00	2,00	28,20	0,00	133,48	33,20	0,00	166,68
10	CHOCÓ	33,60	70,80	43,87	5,14	0,00	0,00	6,41	49,50	37,73	31,21	153,42	124,85	0,00	278,27
11	CÓRDOBA	34,82	58,81	31,67	65,68	35,51	0,00	0,98	5,99	36,23	13,03	226,48	56,23	0,00	282,71
12	CUNDINAMARCA	0,00	66,22	91,41	38,38	0,00	1,00	1,00	21,06	5,95	0,00	196,01	29,01	0,00	225,02
13	GUAJIRA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	HUILA	39,21	84,06	76,39	59,21	1,03	0,00	5,27	115,06	99,45	0,00	259,90	219,78	0,00	479,69
15	MAGDALENA	3,01	15,07	19,45	12,21	10,61	0,00	0,00	6,00	64,07	14,06	60,36	84,14	0,00	144,50
16	META	68,93	110,25	140,95	21,74	2,05	47,98	20,30	83,34	87,89	2,00	343,92	241,51	0,00	585,43
17	NARIÑO	243,01	276,91	99,37	72,61	0,62	0,81	4,23	4,73	7,84	9,58	692,51	27,18	0,00	719,70
18	N. DE SANTANDER	21,80	108,50	128,21	93,76	0,97	0,00	7,11	75,43	27,94	6,00	353,23	116,48	0,00	469,71
19	PUTUMAYO	90,14	44,48	9,71	5,19	0,00	0,00	18,89	28,69	85,48	0,00	149,52	133,05	0,00	282,57
20	QUINDÍO	1,98	31,90	40,42	7,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	81,32	0,00	8,52	89,84
21	RISARALDA	42,46	87,64	37,74	5,34	0,00	0,00	11,78	29,69	3,40	0,00	173,18	44,86	0,00	218,05
22	SANTANDER	9,24	275,70	63,39	31,69	5,48	0,00	26,79	71,52	50,02	34,85	385,51	183,18	0,00	568,69
23	SUCRE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	TOLIMA	0,00	197,34	85,51	29,26	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	314,11	0,00	0,00	314,11
25	VALLE	67,74	130,90	117,19	79,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	395,27	0,00	0,00	395,27
26	OCANA	2,03	8,17	38,44	53,56	11,08	0,00	0,00	0,00	4,43	0,00	113,28	4,43	0,00	117,71
27	S. ANDRÉS y PROV.	14,12	25,60	6,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	45,75	0,00	0,00	45,75
	TOTAL RED VIAL	1.012,77	2.595,86	2.109,04	1.057,12	70,82	53,76	168,97	863,66	1.019,49	164,82	6.845,41	2.250,69	17,97	9.114,06
		14,79%	37,92%	30,81%	15,44%	1,33%	2,38%	7,06%	37,93%	45,30%	7,32%	75,11%	24,69%	0,20%	

Ilustración 3 Estado malla vial de Colombia año 2018

Fuente: <https://www.invias.gov.co>

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la viabilidad de las cenizas de cascarilla de arroz como agente modificador de asfalto convencional.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la susceptibilidad térmica del asfalto modificado con cenizas de cascarilla de arroz.
- Conceptuar los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio realizados al asfalto modificado y convencional.
- Comparar las propiedades físicas y reológicas del asfalto modificado a porcentajes de 4, 4.5, 5, 5.5 y 6.
- Identificar el porcentaje de modificación que mejora las propiedades físicas y reológicas del asfalto.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1 MARCO TEORICO

4.1.1 Asfalto.

El asfalto es una sustancia bituminosa que resulta de la destilación del petróleo, el cual posee características de adherencia e impermeabilidad, y es empleado a modo de revestimiento o pavimento. Esta sustancia posee propiedades las cuales la hacen idónea para su uso como aglomerante para la construcción de carreteras. (Porto, Definición.de, 2016).

El comportamiento del ligante asfáltico en una mezcla asfáltica depende totalmente de su composición química, la cual está relacionada con las propiedades físicas de este. Las propiedades físicas que presenta el asfalto son la cohesión, adherencia, consistencia, durabilidad, pureza y gravedad específica. La consistencia es la resistencia a la deformación a temperaturas determinadas (viscosidad), cohesión es la habilidad para mantener todas las partículas unidas, durabilidad es la capacidad del ligante para mantener sus características iniciales mientras es sometido a esfuerzos, adherencia es la propiedad para unir partículas a altas temperaturas y mantenerlas juntas después de enfriarse, pureza es la ausencia de materiales insolubles y gravedad específica es la relación de la masa con su volumen. (INVEAS, 2016)

4.1.2 Asfalto modificado.

La modificación de asfaltos es una alternativa para aumentar la durabilidad de los pavimentos flexibles, el cual consiste en la adición de un material en partículas diminutas al ligante donde esta unificación se realiza a temperaturas altas, con el fin de poder realizar una óptima homogenización de los dos materiales, la cantidad de material modificante se emplea en relación al peso del agente bituminoso (Asphalt, 2010)

4.1.3 Penetrometro de asfalto.

“Es un instrumento que tiene el objeto de medir con precisión la profundidad de penetración de una muestra de asfalto en decimas de milímetros” (HEELT, 2017).

4.1.4 Punto de ablandamiento

“Es un ensayo que busca determinar el punto de ablandamiento del asfalto a temperaturas en el rango entre 30° y 157° C. Este es realizado por medio del aparato de anillo y bola, el cual consiste en calentar el material bituminoso en un baño líquido, mientras dos anillos soportan una bola de acero” (INVIAS, 2013).

4.1.5 Peso Específico.

“Es el cociente entre el peso de un cuerpo y su volumen. Este es calculado dividiendo el peso de la sustancia o material con el volumen que este ocupa. El peso específico también es conocido como densidad de peso” (Porto, Definicion.de, 2013).

4.1.6 Viscosímetro Rotacional.

“Es un instrumento que determina la viscosidad de una sustancia, midiendo el esfuerzo tangencial que se necesita para realizar rotaciones en el material con una velocidad específica de deformación. La viscosidad se calcula como la relación entre el esfuerzo tangencial y la deformación de corte” (J.P. SELECTA, 2015).

4.1.7 Picnómetro.

“Es un utensilio que se encuentra en los laboratorios para medir volúmenes y pesos específicos de elementos líquidos o sólidos” (Martinez, 2017)

4.1.8 Adherencia en bandeja.

“Es un procedimiento de laboratorio que busca determinar el porcentaje de adherencia de un ligante asfáltico en una muestra de agregado grueso, el resultado de este ensayo se representa como el porcentaje adherido a las partículas de agregado” (INVIAS, 2007).

4.1.9 Stripping.

“Es un ensayo de laboratorio que busca determinar el efecto de la acción del agua sobre el agregado con ligante asfáltico, este ensayo se realiza dejando el agregado grueso con asfalto en inmersión estática” (INVIAS, 2007)

4.1.10 Cascarilla de arroz

“La cascarilla de arroz es un desecho que proviene de la industria molendera de arroz, ya que es la cascara que recubre el arroz en la espiga. Este es un subproducto que se ha convertido en agente altamente contaminante por las grandes cantidades de este. Está compuesto por sílice, celulosa, extracto no nitrogenado y humedad” (Huerta Agrícola, 2017).

4.2 MARCO TEXTUAL

4.2.1 Antecedentes de estudios realizados a asfaltos modificados con cenizas de cascarilla de arroz.

En los años 2017 y 2015 se realizaron dos estudios de asfaltos modificados donde de alguna manera utilizaban las cenizas de cascarilla de arroz como agente modificante. En Irán evaluaron el asfalto modificado solo con cenizas de cascarilla de arroz, aplicado en cuatro distintos porcentajes, los cuales fueron 5, 10, 15, 20, donde solo se avaluó las propiedades mecánicas del asfalto. El valor modificante de 5% fue el único porcentaje que arrojó resultados óptimos con relación al asfalto convencional. (Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran, 2017)

Por otra parte en Shanghái, en la universidad de Xi’an, se realizó el estudio del contenido óptimo de cenizas de cascarilla de arroz como agregado de aglutinante de asfalto y su modificación con bio-aceite. Durante la evaluación realizada a este tipo de asfalto modificado, se utilizaron cinco porcentajes de cenizas de cascarilla de arroz con el objetivo de encontrar el porcentaje idóneo de agente aglutinante. En los resultados obtenidos se detallan que los porcentajes 5 y 7 fueron los únicos que arrojaron valores

óptimos con relación con el asfalto convencional. (Chang'an University, Xi'an, China, 2017)

4.2.2 Impactos del asfalto modificado con cenizas de cascarilla de arroz en Colombia.

Cuando se analiza el estado de la malla vial en Colombia y se detalla que el 48% de esta no se encuentra en óptimo estado, se presenta la necesidad de buscar la alternativa para que este porcentaje sea mucho menor. Es allí donde la ceniza de cascarilla de arroz actúa como agente modificador, mejorando las propiedades físicas y reológicas del asfalto y así los pavimentos en Colombia podrían tener un mayor periodo de vida útil, conllevando esto a grandes impactos económicos y sociales.

El impacto económico se presentará principalmente en las empresas constructoras de pavimentos flexibles, debido a que los resultados óptimos de las pruebas de propiedades del ligante modificado, conllevarían a una reducción de precios de sus obras de pavimentación y a una duración más larga en buen estado de estas, disminuyendo así las obras de reparación y de esta manera indirectamente se beneficiaran el gobierno municipal, departamental y nacional, ya que sus inversiones en infraestructura vial serán un poco más bajas. Así mismo las inversiones del estado a infraestructura vial llegarían a más lugares del país, zonas donde el estado de la malla vial no era el óptimo, conllevando esto al desarrollo social y económico de más regiones.

5 METODOLOGÍA

5.1 ESTRATEGIA METODOLOGICA

Para iniciar con el proceso de evaluación del comportamiento de la ceniza de cascarilla de arroz como agregado del asfalto, primero se obtuvo este elemento en una mufla bajo temperaturas que no superaron el rango entre 500 y 700°C, así logrando incinerarlo y evitando su carbonización. La ceniza obtenida se tamizó y las partículas que se utilizaron fueron las que pasaron el tamiz 0,075.

Por consiguiente para poder realizar la respectiva comparación entre los resultados del asfalto convencional y el asfalto modificado, inicialmente se realizaron los ensayos en el convencional, empezando por el ensayo de Peso específico con el picnómetro, Punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola, Adherencia en bandeja, Penetración, Stripping y terminando con el de viscosímetro rotacional. Para esto se calentó el asfalto bajo temperaturas que no superaran los 110 ° C, evitando así que se perdieran algunas de sus propiedades y procediendo a llevar a cabo cada uno de los ensayos de laboratorio.

Para modificar el asfalto, se calentó una porción del mismo y al observar que su estado estuviera lo más líquido posible se añadió la primera porción de ceniza, siendo del 4% directamente proporcional a la cantidad usada de asfalto. Después, para que esta muestra quedara lo más homogénea posible, se sometió a 20 minutos de mezcla continua. Una vez la muestra estuvo lista, se efectuó cada uno de los ensayos de laboratorio correspondientes. Así para cada uno de los porcentajes siguientes siendo del 4.5%, 5%, 5.5% y 6% respectivamente.

Al culminar todos los ensayos respectivos de cada muestra, estos se compilaron y sus resultados se compararon entre sí, estableciendo que entre más alto fuera el resultado indicaría un incremento en la mejora realizada, esto con la finalidad de determinar si se presentaban mejoras en las propiedades del asfalto al ser modificado y cuál de estos porcentajes añadidos era el más prometedor.

5.2. ENSAYOS DE LABORATORIO

5.2.1. ENSAYOS DE CARACTERIZACION DEL ASFALTO

✓ **Densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos (Método del picnómetro)**

Esta prueba se realiza con la ayuda de un picnómetro a el cual se le agrega una cantidad de asfalto, se pesa el picnómetro con la muestra y el volumen restante se suple con agua, se procede a pesar de nuevo el elemento. La densidad de la muestra se calcula a partir de la masa de la muestra y de la masa del agua desalojada por la muestra en el picnómetro lleno. Este ensayo se realizó 4 veces por muestra (Instituto Nacional de Vias, INVE-707-13)

✓ **Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (Aparato de anillo y bola)**

Esta prueba consiste en el sometimiento de la mezcla bituminosa en agua a altas temperaturas por medio del aparato de anillo y bola, con el fin de determinar a qué temperatura se dará la fluencia del material. Este ensayo será realizado tres veces por cada mezcla de asfalto modificado, tomando como resultado final el promedio de los mismos. (Instituto Nacional de Vias, INVE-712-07)

✓ **Adherencia en bandeja**

Para esta prueba se vierte asfalto modificado en una bandeja, pasados unos pocos minutos se adicionan 50 partículas de agregado grueso, las cuales se dejan en el horno a 60°C por 24 horas. Cumplido el tiempo se retira una por una con la ayuda de un alicate y a su vez realizando una prueba visual para clasificar el porcentaje de las rocas que aún tienen asfalto adherido. (Instituto Nacional de Via, INVE-740-07)

✓ **Penetración de los materiales asfálticos**

Este procedimiento se realiza con la ayuda del Penetrometro donde la mezcla está a 25 °C y se mide su consistencia dependiendo de la profundidad de penetración. Se repetirá nueve veces en cada muestra. (Instituto Nacional de Vías, INVE -706-07)

✓ **Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua**

(Stripping)

Por medio de esta prueba se valorará el efecto del agua sobre la mezcla asfáltica. Para ello se tomará agregado mezclado con asfalto y se sumergirá en agua a 60° C durante 16 horas, al final se visualizará y clasificará el agregado sin desprendimiento del material bituminoso. Este proceso experimental se ejecutará en tres ocasiones por cada mezcla modificada (Instituto Nacional de Vías, INVE-737-07)

✓ **Método para determinar la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional**

Se pretende medir esta propiedad mediante el viscosímetro rotacional en el cual las muestras deben estar entre 60° a 200° C, donde se realizará tres pruebas por cada mezcla. (Instituto Nacional de Vías, INVE-717-07)

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el fin de poder realizar un análisis de resultados por medio de la comparación de propiedades físicas y reológicas entre el asfalto convencional y los asfaltos modificados, también se realizó la caracterización del ligante sin ningún tipo de agregado, todos los ensayos se realizaron según las normas del Instituto Nacional de Vías (INV-E).

Los ensayos realizados a los asfaltos fueron: gravedad específica, penetración, punto de ablandamiento, viscosidad rotacional, Stripping y adherencia en bandeja. Cabe aclarar que todos los ensayos fueron repetidos 4 veces por cada tipo de asfalto. Los resultados obtenidos de cada ensayo son los siguientes.

6.1. ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA



Ilustración 4 Ensayos de gravedad específica asfalto convencional

En este ensayo se realizan 4 repeticiones de la prueba con cada asfalto, con el fin de promediar valores y alcanzar un resultado más preciso. Para el cálculo de la gravedad específica se aplica la siguiente ecuación:

$$\text{Gravedad específica} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$$

Donde:

A = Peso del picnómetro con tapón.

B = Peso del picnómetro con agua.

C = Peso del picnómetro parcialmente lleno con asfalto.

D = Peso del picnómetro con agua y asfalto.

✓ ASFALTO CONVENCIONAL

Asfalto Convencional				
Ensayo	1	2	3	4
Picnómetro (Kg)	0,037	0,037	0,037	0,037
Picnómetro + agua (Kg)	0,0858	0,0858	0,0858	0,0858
Picnómetro + asfalto (Kg)	0,065	0,067	0,069	0,061
Picnómetro+ asfalto + agua (Kg)	0,082	0,088	0,09	0,086
Gravedad específica	0,88050314	1,07913669	1,15107914	1,00840336
Gravedad promedio	1,029780583			

Tabla 1 Resultados gravedad específica (A. Convencional)

✓ ASFALTO MODIFICADO 4%

Asfalto Modificado #1 (4%)				
Ensayo	1	2	3	4
Picnómetro (Kg)	0,037	0,037	0,037	0,037
Picnómetro + agua (Kg)	0,0858	0,0858	0,0858	0,0858
Picnómetro + asfalto (Kg)	0,056	0,0564	0,0569	0,0577
Picnómetro+ asfalto + agua (Kg)	0,0865	0,0867	0,0863	0,087
Gravedad específica	1,03825137	1,04864865	1,0257732	1,06153846
Gravedad promedio	1,043552918			

Tabla 2 Resultados gravedad específica (A. Modificado 4%)

✓ ASFALTO MODIFICADO 4.5%

Asfalto Modificado #2 (4.5%)				
Ensayo	1	2	3	4
Picnómetro (Kg)	0,037	0,037	0,037	0,037
Picnómetro + agua (Kg)	0,0858	0,0858	0,0858	0,0858
Picnómetro + asfalto (Kg)	0,05	0,053	0,05	0,052
Picnómetro+ asfalto + agua (Kg)	0,086	0,0867	0,086	0,087
Gravedad específica	1,015625	1,05960265	1,015625	1,08695652
Gravedad promedio	1,044452293			

Tabla 3 Resultados gravedad específica (A. Modificado 4.5%)

✓ ASFALTO MODIFICADO 5%

Asfalto Modificado #3(5%)				
Ensayo	1	2	3	4
Picnómetro (Kg)	0,037	0,037	0,037	0,037
Picnómetro + agua (Kg)	0,0858	0,0858	0,0858	0,0858
Picnómetro + asfalto (Kg)	0,0588	0,0567	0,057	0,059
Picnómetro+ asfalto + agua (Kg)	0,0875	0,0865	0,0867	0,0863
Gravedad específica	1,08457711	1,03684211	1,04712042	1,02325581
Gravedad promedio	1,047948863			

Tabla 4 Resultados gravedad específica (A. Modificado 5%)

✓ ASFALTO MODIFICADO 5.5%

Asfalto Modificado #4 (5.5%)				
Ensayo	1	2	3	4
Picnómetro (Kg)	0,037	0,037	0,037	0,037
Picnómetro + agua (Kg)	0,0858	0,0858	0,0858	0,0858
Picnómetro + asfalto (Kg)	0,0542	0,0531	0,0569	0,0564
Picnómetro+ asfalto + agua (Kg)	0,0868	0,0864	0,087	0,0865
Gravedad específica	1,0617284	1,03870968	1,06417112	1,03743316
Gravedad promedio	1,050510588			

Tabla 5 Resultados gravedad específica (A. Modificado 5.5%)

✓ ASFALTO MODIFICADO 6%

Asfalto Modificado #5 (6%)				
Ensayo	1	2	3	4
Picnómetro (Kg)	0,037	0,037	0,037	0,037
Picnómetro + agua (Kg)	0,0858	0,0858	0,0858	0,0858
Picnómetro + asfalto (Kg)	0,051	0,0532	0,0522	0,0523
Picnómetro+ asfalto + agua (Kg)	0,0865	0,0861	0,0869	0,0867
Gravedad específica	1,05263158	1,01886792	1,07801418	1,0625
Gravedad promedio	1,053003422			

Tabla 6 Resultados gravedad específica (A. Modificado 6%)

Observando los valores de gravedad específica en promedio de todos los asfaltos, se puede analizar que todos los valores se encuentran entre 1,03 y 1,055. En el siguiente grafico se puede evidenciar la variación de las gravedades específicas:

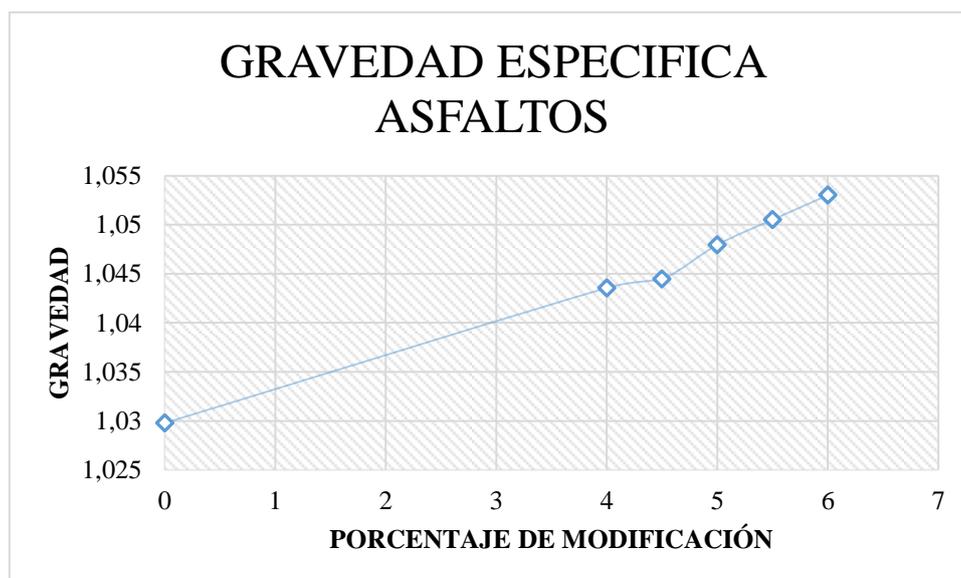


Grafico 1. Línea de punto de gravedad específica vs porcentaje de modificación

Como se evidencia en el gráfico, los valores de la gravedad específica del asfalto aumentan al adicionarles la ceniza de cascarilla de arroz como agente modificador, aunque las variaciones no son tan significativas ya que son menores de 0,03.

6.2.PUNTO DE ABLANDAMIENTO



Ilustración 5 Ensayo de punto de ablandamiento

✓ ASFALTO CONVENCIONAL

Al realizar el ensayo para el asfalto convencional los resultados fueron que pasados entre 15 a 16 min garantizando aproximadamente la elevación de 1 °C por min (VER ANEXO A) el punto de ablandamiento fue de 42.25 °C en promedio. Siguiendo los requerimientos de la norma invias este asfalto 60-70 no está cumpliendo ya que debe estar entre 48 y 56 °C (Instituto Nacional de Vias, ART 410-13).

✓ ASFALTO MODIFICADO (4%)

Este ensayo con adición del 4% de ceniza de cascarilla de arroz se obtuvo que pasados entre 16 a 17 min garantizando aproximadamente la elevación de 1 °C por min, el punto de ablandamiento fue de 44.15 °C en promedio, teniendo un aumento considerable respecto al asfalto convencional.

✓ **ASFALTO MODIFICADO (4.5 %)**

Este ensayo con adición del 4.5 % de ceniza de cascarilla de arroz se obtuvo que pasados entre 15 a 16 min el punto de ablandamiento fue de 46.25 °C en promedio.

✓ **ASFALTO MODIFICADO (5%)**

Este ensayo con adición del 5 % de ceniza de cascarilla de arroz se obtuvo que pasados los 17 min el punto de ablandamiento fue de 44.75 °C en promedio, evidenciando una reducción en comparación con el 4.5%.

✓ **ASFALTO MODIFICADO (5.5 %)**

Este ensayo con adición del 5.5 % de ceniza de cascarilla de arroz se obtuvo que pasados entre 21 a 22 min el punto de ablandamiento fue de 45.05 °C en promedio, evidenciando una reducción en comparación con el 4.5%.

✓ **ASFALTO MODIFICADO (6 %)**

Este ensayo con adición del 6 % de ceniza de cascarilla de arroz se obtuvo que pasados entre 20 a 21 min el punto de ablandamiento fue de 48.75 °C en promedio, evidenciando una aumento en comparación con todos los resultados obtenidos anteriormente.

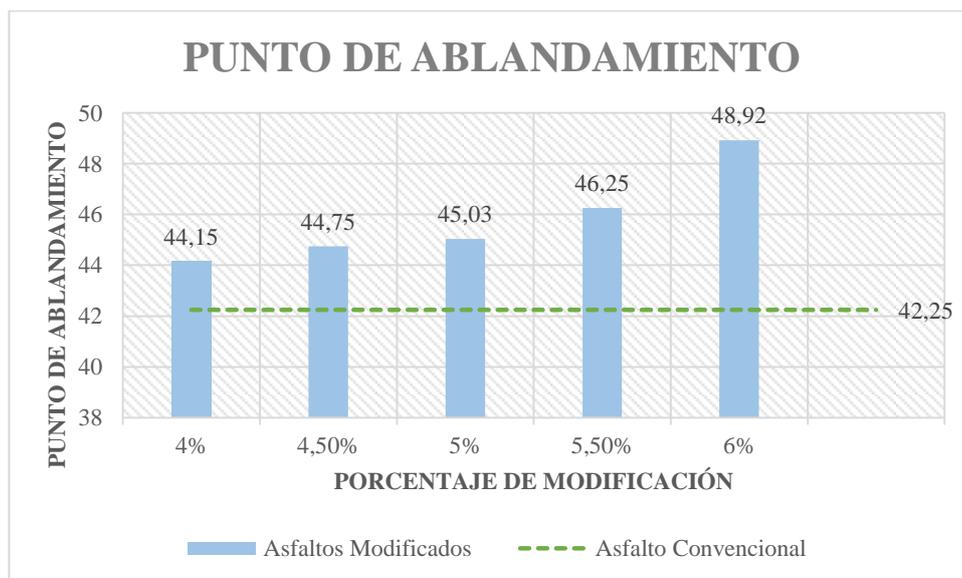


Grafico 1. Grafica de punto de ablandamiento vs porcentaje de modificación

Como se muestra en la gráfica, los mejores resultados obtenidos fueron con el porcentaje modificador del 6% el cual evidencia una gran resistencia al calor en comparación con los resultados de los demás ensayos.

6.3.ADHERENCIA EN BANDEJA



Ilustración 6 Ensayo de adherencia en bandeja

✓ ASFALTO CONVENCIONAL

El ensayo en asfalto convencional dio como resultado promedio que de las 50 partículas utilizadas, el 22% quedaron parcialmente cubiertas, el 64% quedaron totalmente cubiertas y el 24% restante se fracturaron durante el proceso de desprendimiento.

✓ ASFALTO MODIFICADO (4%)

El ensayo en asfalto modificado con agregado del 4 %, dio como resultado promedio que de las 50 partículas utilizadas, el 4% quedaron con nada de cubrimiento, el 24% quedaron parcialmente cubiertas, el 66% quedaron totalmente cubiertas y el 6% restante se fracturaron durante el proceso de desprendimiento.

✓ **ASFALTO MODIFICADO (4.5 %)**

El ensayo en asfalto modificado con agregado del 4.5 %, dio como resultado promedio que de las 50 partículas utilizadas, el 14% quedaron parcialmente cubiertas y el 84 % restante quedaron totalmente cubiertas.

✓ **ASFALTO MODIFICADO (5%)**

El ensayo en asfalto modificado con agregado del 5 %, dio como resultado promedio que de las 50 partículas utilizadas, el 6% quedaron parcialmente cubiertas, el 74 % quedaron totalmente cubiertas y el 20% restante se fracturaron durante el proceso.

✓ **ASFALTO MODIFICADO (5.5 %)**

El ensayo en asfalto modificado con agregado del 5.5 %, dio como resultado promedio que de las 50 partículas utilizadas, el 12% quedaron parcialmente cubiertas, el 84 % quedaron totalmente cubiertas y el 4 % restante se fracturaron durante el proceso.

✓ **ASFALTO MODIFICADO (6 %)**

El ensayo en asfalto modificado con agregado del 5.5 %, dio como resultado promedio que de las 50 partículas utilizadas, el 4% quedaron parcialmente cubiertas, el 88 % quedaron totalmente cubiertas y el 8 % restante se fracturaron durante el proceso.

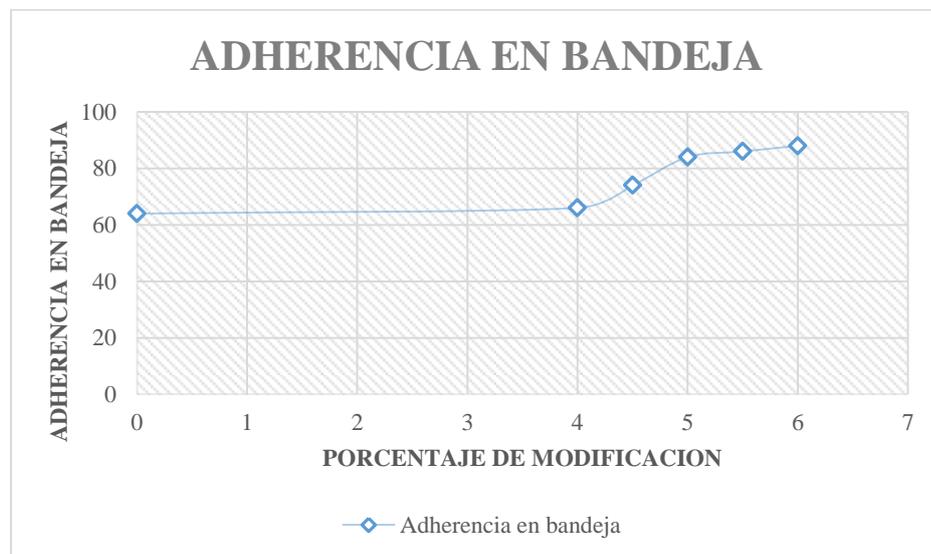


Grafico 3. Línea de adherencia en bandeja vs porcentaje de modificación

De los ensayos realizados con los diferentes porcentajes modificadores se pudo determinar que el mejor resultado fue con el 6%, obteniendo un 88% de partículas totalmente cubiertas.

6.4. ENSAYO DE PENETRACIÓN



Ilustración 7 Ensayo de penetración

Esta prueba fue realizada con el asfalto convencional y los modificados a una temperatura de 25° centígrados (temperatura ambiente), después de mínimo 2 horas de enfriamiento. Los resultados del ensayo de penetración fueron registradas en milímetros (mm) y son los siguientes.

✓ **ASFALTO CONVENCIONAL.**

Asfalto Convencional			
Muestra #1	Muestra #2	Muestra #3	Muestra #4
5,73	5,3	5,46	5,76
5,14	5,76	5,45	4,44
5,84	5,93	6,59	6,15
5,71	5,92	5,25	4,26
5,4	5,2	4,37	5,23
5,46	5,56	6,16	6,68
5,44	5,25	4,19	6,34
6,28	5,29	4,42	5,28

5,55	5,96	5,88	4,95
4,47	5,97	6,2	5,95
PROMEDIO		5,50425	

Tabla 7 Resultados de Penetración (A. Convencional)

 ✓ **ASFALTO MODIFICADO 4%**

Asfalto Modificado #1 (4%)			
Muestra #1	Muestra #2	Muestra #3	Muestra #4
5,17	4,67	5,23	4,56
5,45	5,1	6,05	5,12
5,63	5,12	5,87	5,34
5,68	5,97	5,21	6,13
5,61	5,45	5,14	6,31
5,12	5,67	5,67	5,68
4,89	5,54	5,23	5,86
5,9	5,63	5,12	5,34
5,72	5,12	5,89	5,31
4,3	5,34	4,78	5,99
PROMEDIO		5,42275	

Tabla 8 Resultados de Penetración (A. Modificado 4%)

 ✓ **ASFALTO MODIFICADO 4.5%**

Asfalto Modificado #2 (4.5%)			
Muestra #1	Muestra #2	Muestra #3	Muestra #4
5,23	5,1	5,67	5,34
5,67	4,34	4,87	4,88
4,87	4,89	5,23	5,34
4,98	5,34	5,64	5,76
5,12	5,65	5,76	5,45
5,78	5,43	4,65	5,86
5,34	5,12	5,89	5,96
5,64	6,12	5,67	5,67

5,89	4,57	5,12	5,23
5,12	5,67	5,34	5,87
PROMEDIO		5,37675	

Tabla 9 Resultados de Penetración (A. Modificado 4.5%)

 ✓ **ASFALTO MODIFICADO 5%**

Asfalto Modificado #3 (5%)			
Muestra #1	Muestra #2	Muestra #3	Muestra #4
5,24	5,52	5,32	5,34
5,21	5,17	5,41	5,23
5,18	5,19	5,67	5,24
5,39	5,35	4,82	5,57
5,35	5,36	5,12	4,9
5,45	5,51	5,32	5,23
5,35	5,47	5,34	5,19
5,23	5,47	5,46	5,37
5,34	5,12	5,43	5,31
5,21	4,89	5,28	5,41
PROMEDIO		5,299	

Tabla 10 Resultados de Penetración (A. Modificado 5%)

 ✓ **ASFALTO MODIFICADO 5.5%**

Asfalto Modificado #4 (5.5%)			
Muestra #1	Muestra #2	Muestra #3	Muestra #4
4,93	5,06	5,26	4,89
5,4	4,76	5,15	5,04
4,91	5,08	5,01	5,03
5,05	5,15	4,96	5,07
5,08	5,19	4,88	5,15
4,83	5,01	5,56	4,56
4,93	4,77	4,89	5,09
4,91	5,01	4,97	5,15

5,15	5,05	4,96	5,46
5,02	4,98	5,06	4,99
PROMEDIO		5,035	

Tabla 11 Resultados de Penetración (A. Modificado 5.5%)

✓ **ASFALTO MODIFICADO 6%**

Asfalto Modificado #5 (6%)			
Muestra #1	Muestra #2	Muestra #3	Muestra #4
3,68	3,98	4,29	4,06
3,75	3,87	4,14	4,15
3,76	3,81	3,88	3,78
4,15	4,24	4,05	4,45
4,34	4,16	4,12	4,25
3,84	4,65	3,82	4,06
4,15	3,91	4,09	4,12
4,26	4,04	4,22	4,1
4,15	4,15	4,35	4,09
4,23	4,24	4,01	4,25
PROMEDIO		4,091	

Tabla 12 Resultados de Penetración (A. Modificado 6%)

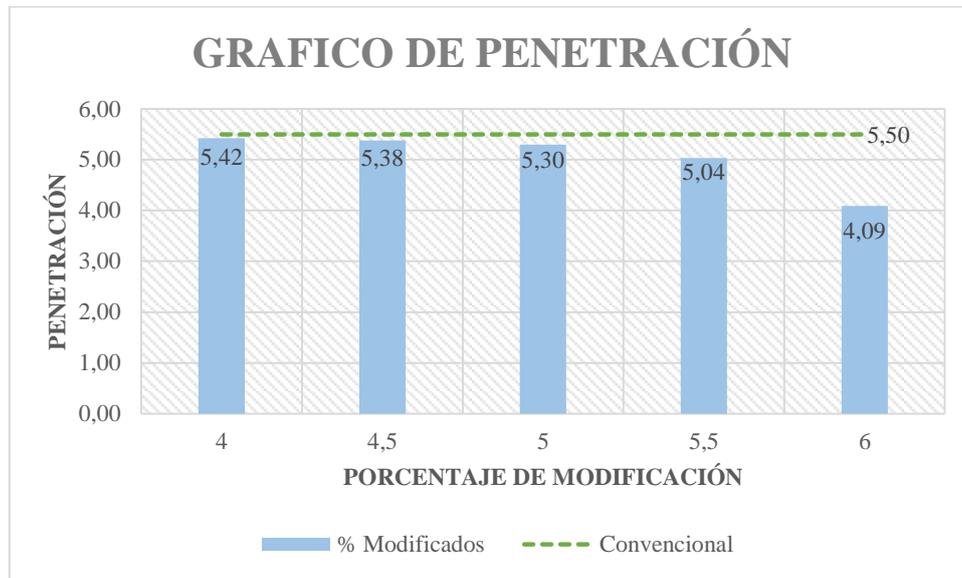


Grafico 4. Curva de penetración vs porcentaje de modificación

Por medio de la gráfica de penetración vs porcentaje de modificación, se puede apreciar más detalladamente que los asfaltos de modificación presentan valores menores de penetración que el asfalto convencional, donde el asfalto modificado al 6% presenta la menor presentación, con un valor promedio de 4,091 milímetros.

Con base a lo estipulado por las especificaciones del cemento asfáltico 60-70 de la norma INV E, se denota que los valores obtenidos de penetración del asfalto convencional están un poco por debajo del rango mínimo que estipula la norma (ver Anexo A).

Los datos obtenidos se presentan dentro del margen de diferencias máximas entre valores extremos que indica la norma INV E 706-8 y se aprecia en la siguiente

Ilustración 8 Margen de error de resultados ensayo de penetración

ilustración.

PENETRACIÓN (0.1 mm)	0 a 49	50 a 149	150 a 249	250 a 500
DIFERENCIA MAXIMA ENTRE VALORES EXTREMOS	2	4	12	20

Fuente: Norma INV E 706-12

6.5. ENSAYO DE STRIPPING



Ilustración 9 Ensayo Stripping del asfalto convencional

El ensayo de Stripping es una evaluación visual que se le realiza a agregado grueso cubierto de asfalto después de 16 horas de inmersión en agua. La variación en los resultados es muy leve y los resultados son tomados por evaluación propia. Los datos obtenidos son los siguientes:

ENSAYO STRIPPING					
ASFALTO	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4	PROMEDIO
CONVENCIONAL	97,0%	97,5%	98,0%	98,0%	97,6%
MODIFICADO 1 (4.0%)	98,0%	98,0%	97,5%	98,0%	97,9%
MODIFICADO 2 (4.5%)	98,5%	98,5%	98,0%	97,0%	98,0%
MODIFICADO 3 (5.0%)	98,0%	98,5%	98,0%	98,0%	98,1%
MODIFICADO 4 (5.5%)	98,5%	98,5%	98,0%	99,0%	98,5%
MODIFICADO 5 (6.0%)	98,5%	99,0%	99,0%	98,5%	98,8%

Tabla 13 Resultados ensayo Stripping

Durante la ejecución de este ensayo se presentan algunas dificultades para precisar el valor exacto de cubrimiento en cada prueba es por esto que se repite cuatro veces cada ensayo con cada tipo de asfalto. Al observar los resultados obtenidos se observa una leve mejora en el porcentaje de cubrimiento a medida que el porcentaje de modificación aumentaba, arrojando como mayor porcentaje promedio de cubrimiento de 98.8%.

6.6.VISCOSIMETRO ROTACIONAL



Ilustración 10 Ensayo de viscosímetro rotacional

Este ensayo fue realizado a 3 muestras por cada porcentaje modificador, desde el asfalto convencional hasta el asfalto modificado con 6% de agregado de ceniza, por lo tanto los resultados arrojados se representan en las siguientes graficas las cuales muestran la curva de los valores promedio obtenidos en los tres ensayos realizados:

✓ **ASFALTO CONVENCIONAL**

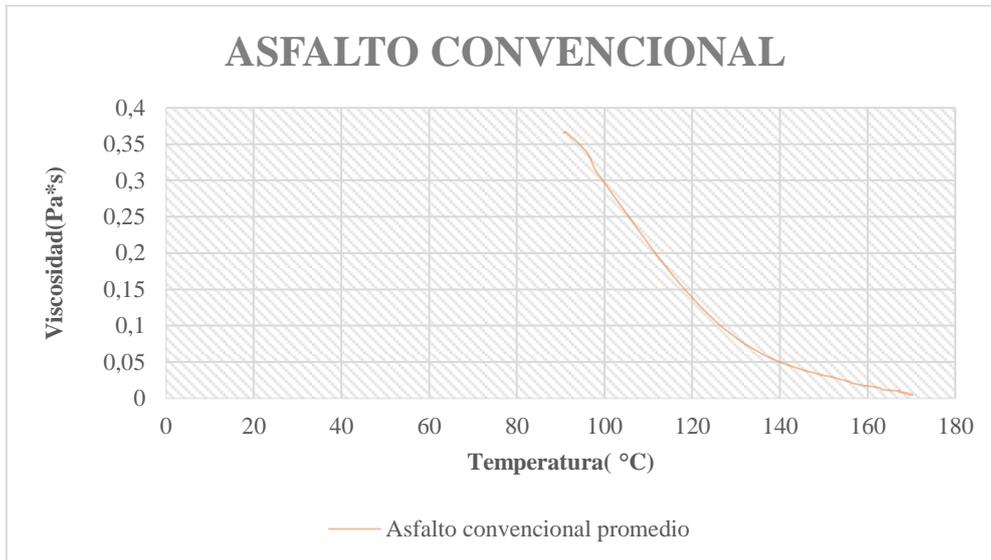


Gráfico 5. Curva de viscosidad vs temperatura (A. Convencional)

✓ **ASFALTO MODIFICADO (4%)**

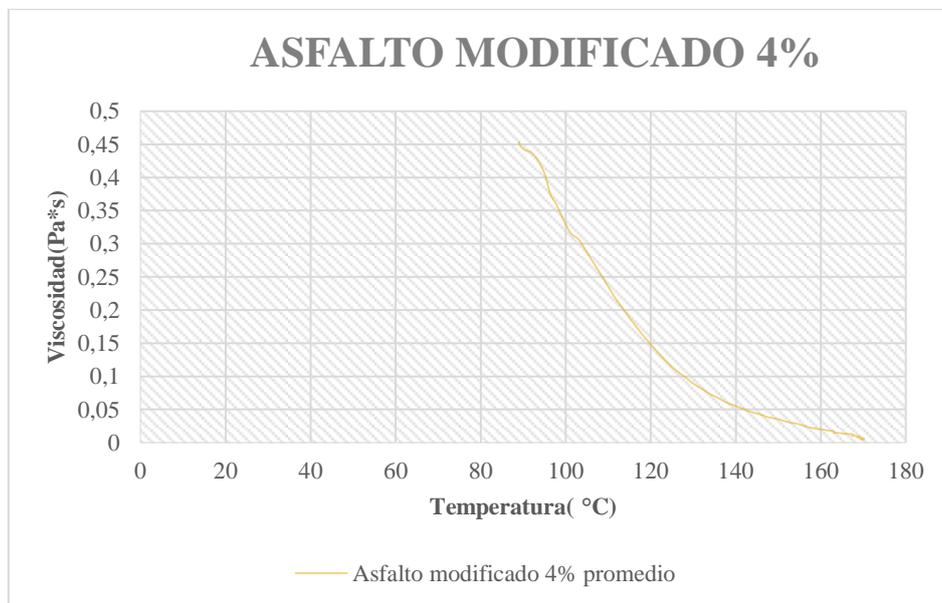


Gráfico 6. Curva de viscosidad vs temperatura (A. Modificado 4%)

✓ **ASFALTO MODIFICADO (4.5 %)**

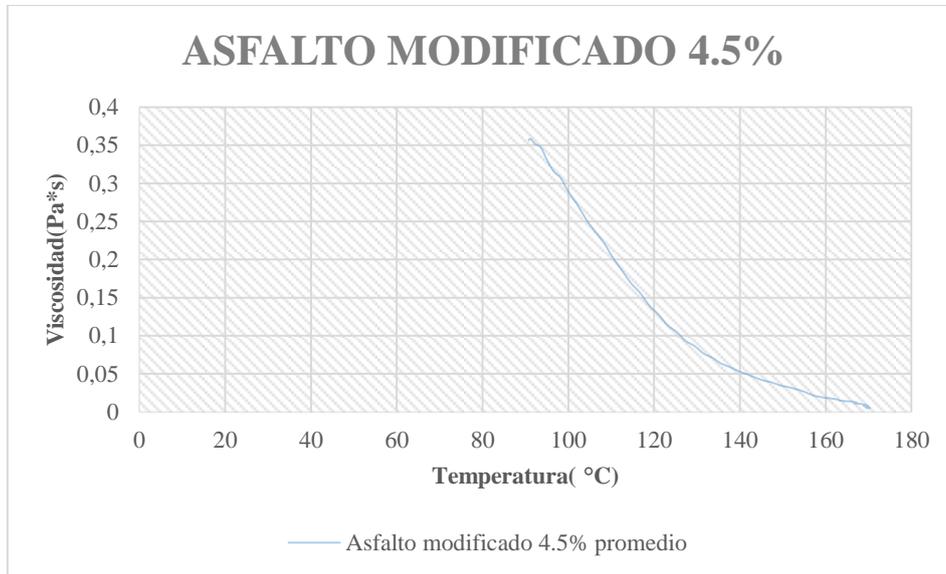


Gráfico 7. Curva de viscosidad vs temperatura (A. Modificado 4.5 %)

✓ **ASFALTO MODIFICADO (5%)**

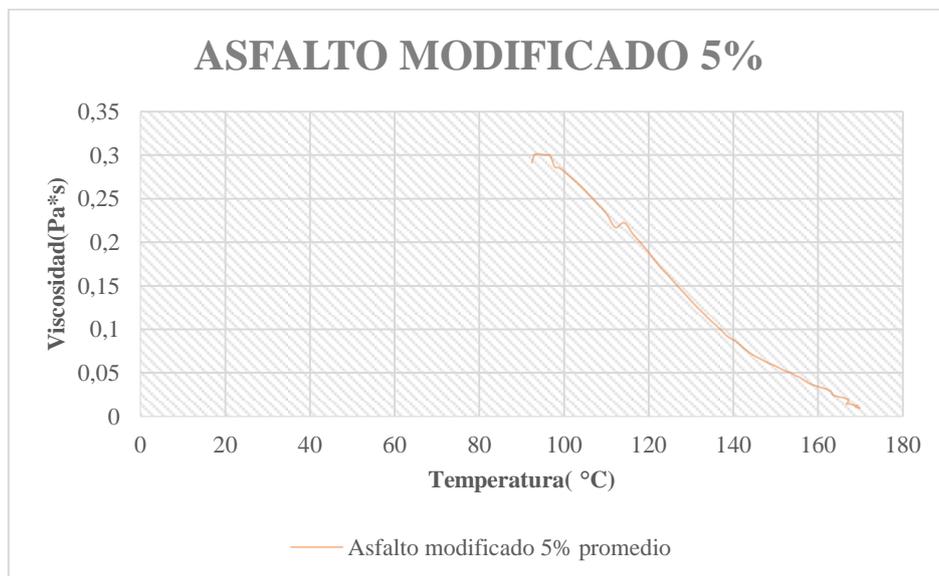


Gráfico 8. Curva de viscosidad vs temperatura (A. Modificado 5 %)

✓ **ASFALTO MODIFICADO (5.5 %)**

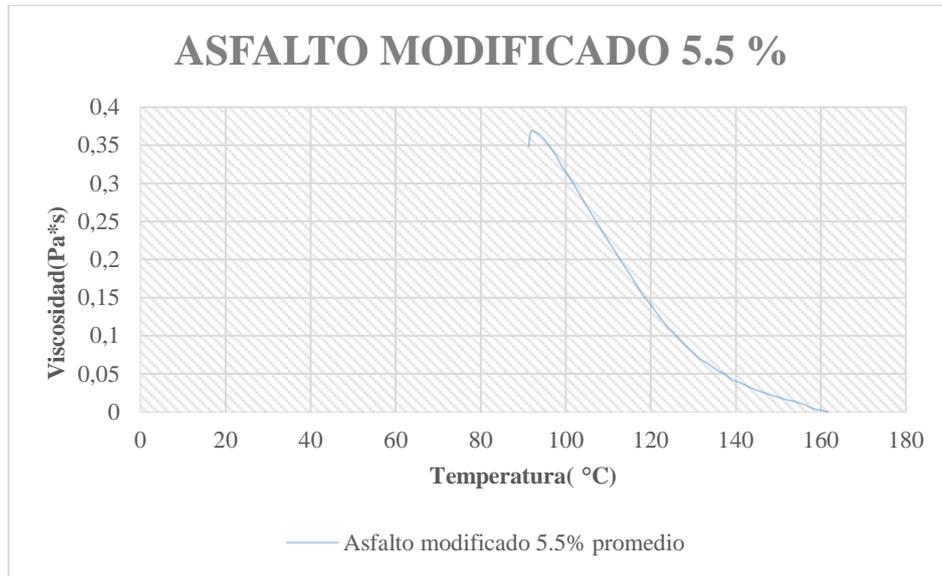


Gráfico 9. Curva de viscosidad vs temperatura (A. Modificado 5.5 %)

✓ **ASFALTO MODIFICADO (6 %)**

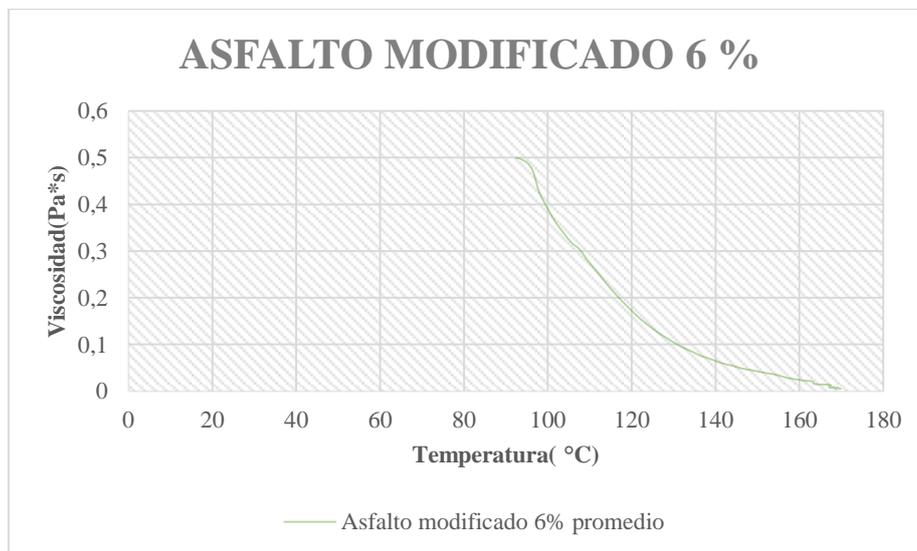


Gráfico 10. Curva de viscosidad vs temperatura (A. Modificado 6 %)

Con la ayuda del viscosímetro rotacional, se pudo obtener las anteriores graficas las cuales dan una lectura de la viscosidad de la muestra vs la temperatura a la cual dicha muestra estuvo expuesta. Al analizar las gráficas se obtiene como resultado que la viscosidad más alta se dio con el porcentaje de modificación #5, el del 6 %, mostrando una gran resistencia al calor al cual fue sometido, tomando más tiempo que el asfalto convencional para volverse líquido.

7. CONCLUSIONES

Durante este trabajo investigativo realizado a la modificación del asfalto con cenizas de cascarilla de arroz se puede concluir lo siguiente:

- ✓ A partir de la evaluación realizada al asfalto modificado con cenizas de cascarilla de arroz en comparación con el asfalto convencional, se certifica que la modificación en porcentajes de 4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6%, mejora en pequeña porción las propiedades físicas y reológicas del ligante asfáltico, donde el mejor resultado se obtuvo con el asfalto modificado al 6%.

- ✓ Se pudo comprobar con los ensayos de viscosidad realizados en el laboratorio y con evaluación visual, que el asfalto modificado es más viscoso por la adición de las cenizas de cascarilla de arroz.

- ✓ A partir de los análisis físicos y reológicos del asfalto modificado con cenizas de cascarilla de arroz se puede afirmar que es factible y viable el uso de este para mezclas asfálticas, ya que los análisis arrojan una mejoría en penetración del 25%, en adherencia del 2%, en Viscosímetro del 26% y punto de ablandamiento del 14%. Determinando esto la viabilidad de esta modificación específicamente al 6%.
- ✓ El asfalto 60-70 convencional utilizado durante las pruebas, no cumple con las especificaciones de la norma para los cementos asfálticos.
- ✓ En base a los ensayos realizados se llega a la conclusión que la ceniza de cascarilla de arroz con su gran contenido de sílice, es quien aporta al asfalto una mayor resistencia al calor, incrementando su durabilidad.
- ✓ Al realizar el ensayo de punto de ablandamiento, se pudo determinar que al garantizar que la temperatura se elevara 1°C por min, era menor el rango de incertidumbre del ensayo.

8. RECOMENDACIONES

- ✓ Es importante que se continúe con esta investigación de modificación de asfaltos con cenizas de cascarilla de arroz, con diferentes porcentajes a los ya utilizados en este trabajo de investigación, con el fin de encontrar el porcentaje que más aumente las propiedades del material bituminoso.
- ✓ Incentivar a la Universidad de Ibagué a que adquiera más equipos de laboratorio para poder realizar más ensayos físicos y reológicos al material asfáltico.
- ✓ Es idóneo realizar ensayos Marshall con estos asfaltos modificados para poder constatar la efectividad del uso de estos en pavimentos flexibles.

9. BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, J. S. (2009). *ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DE LA CASCARILLA DE ARROZ EN COLOMBIA*. Sincelejo.

Asphalt. (2010). *e-Asphalt*. Obtenido de <https://www.e-asphalt.com/modificados/modificados.htm>

Chang'an University, Xi'an, China. (2017). Study on the optimum rice husk ash content added in asphalt binder and its modification with bio-oil. *Construction and Building Materials*, 776-789.

Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran. (2017). Assessment of mechanical properties of rice husk ash modified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 350-358.

Fedearroz. (Febrero de 2018). *Fedearroz*. Obtenido de
http://www.fedearroz.com.co/new/apr_public.php

HEELT. (2017). *HEELT SRL*. Obtenido de
<http://www.heelt.com.ar/Producto.aspx?producto=83>

Huerta Agricola. (14 de Julio de 2017). *Huerta Agricola*. Obtenido de
<http://www.huertagricola.com/2017/07/cascarilla-de-arroz.html>

Instituto Nacional de Via, INVE-740-07 . (s.f.). *ADHERENCIA EN BANDEJA*.
Obtenido de <file:///D:/User/Desktop/Monografia/Norma%20INV%20E-740-07%20Adherencia%20en%20bandeja.pdf>

Instituto Nacional de Vias, ART 410-13. (s.f.). *SUMINISTRO DE CEMENTO
ASFÁLTICO*. Obtenido de
[ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/harenas/docs/PAVIMENTOS/DOCUMENTOS
%20DE%20CONSULTA/CAP%C3%8DTULO%204.pdf](ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/harenas/docs/PAVIMENTOS/DOCUMENTOS%20DE%20CONSULTA/CAP%C3%8DTULO%204.pdf)

Instituto Nacional de Vias, INVE-707-13. (s.f.). • *DENSIDAD DE MATERIALES
BITUMINOSOS SÓLIDOS Y SEMISÓLIDOS (MÉTODO DEL PICNÓMETRO)*.
Obtenido de [ftp://ftp.ani.gov.co/Licitaci%C3%B3n%20VJVGCLP%20001-2016-M-1/Normas%20de%20Ensayo%20de%20materiales%20para%20carreteras/SECCIONES%20700%20Y%20800%20\(primer%20parte\).pdf](ftp://ftp.ani.gov.co/Licitaci%C3%B3n%20VJVGCLP%20001-2016-M-1/Normas%20de%20Ensayo%20de%20materiales%20para%20carreteras/SECCIONES%20700%20Y%20800%20(primer%20parte).pdf)

Instituto Nacional de Vias, INVE -706-07 . (s.f.). *PENETRACION DE LOS
MATERIALES ASFÁLTICOS*. Obtenido de
<file:///D:/User/Desktop/Monografia/Norma%20INV%20E-706-07%20Penetracion.pdf>

Instituto Nacional de Vias, INVE-712-07. (s.f.). *PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE
MATERIALES BITUMINOSO*. Obtenido de
<file:///D:/User/Desktop/Monografia/Norma%20INV%20E-712-07%20P.%20de%20ablandamiento.pdf>

- Instituto Nacional de Vías, INVE-717-07 . (s.f.). *MÉTODO PARA DETERMINAR LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO EL VISCOSIMETRO ROTACIONAL*. Obtenido de
file:///D:/User/Desktop/Monografia/Norma%20INV%20E-717-07%20Viscosidad.pdf
- Instituto Nacional de Vías, INVE-737-07 . (s.f.). *CUBRIMIENTO DE LOS AGREGADOS CON MATERIALES ASFÁLTICOS EN PRESENCIA DEL AGUA (STRIPPING)*. Obtenido de
file:///D:/User/Desktop/Monografia/Norma%20INV%20E-737-07%20Stripping.pdf
- INVEAS. (2016). *Scribd*. Obtenido de Propiedades físicas y químicas de los asfaltos:
<https://es.scribd.com/document/202603063/2-Propiedades-Quimicas-Fisicas-de-los-asfaltos>
- INVIAS. (2007). *NORMA INVE-737-07*. Obtenido de
<ftp://ftp.ani.gov.co/Bogota%20Villavicencio%20Sector1/4%20HIDRAULICA/Auxiliar/ANX12%20Especificaciones%20Tecnicas%20Invias/normas%20Invias/Normas/Invias/Ensayos/Norma%20INV%20E-737-07.pdf>
- INVIAS. (2007). *NORMA INVE-740-07*. Obtenido de
ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-740-07.pdf
- INVIAS. (2013). *NORMA INVE-712-13. Especificaciones norma INVIAS, 7*.
- INVIAS. (17 de Enero de 2018). *Estado de la Red Vial*. Obtenido de
<https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/directiva-presidencial/2-uncategorised/57-estado-de-la-red-vial>
- J.E. Rodríguez-Páez & Ahumada, L. (2006.). Uso del SiO₂ obtenido de la cascarilla de arroz en la síntesis de silicatos de calcio. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 30 (117), 581-594.
- J.P. SELECTA. (2015). Viscosímetros. *Catálogo Viscosímetros*, 354-360.

Martínez, C. (2017). *Lifeder*. Obtenido de <https://www.lifeder.com/picnometro/>

Mejía, J. (2012). Ceniza de cascarilla de arroz como fuente de sílice . *Materiales de Construcción* , 361-375.

Porto, J. P. (2013). *Definicion.de*. Obtenido de <https://definicion.de/peso-especifico/>

Porto, J. P. (2016). *Definición.de*. Obtenido de <https://definicion.de/asfalto/>

Registrocdt. (s.f.). *PAVIMENTOS*. Obtenido de <http://www.registrocdt.cl/registrocdt/www/admin/uploads/docTec/Pavimentos.pdf>

10. ANEXOS

ANEXO A: RESULTADOS PUNTO DE ABLANDAMIENTO

✓ ASFALTO CONVENCIONAL

Asfalto Convencional Prueba 1			Asfalto Convencional Prueba 2		
Tiempo(min)	Temperatura	Bola	Tiempo(min)	Temperatura	Bola
0	25		0	25	
1	25.5		1	26	
2	27		2	27	
3	27.6		3	28	
4	28.6		4	29	
5	30		5	30	
6	31		6	31	
7	32.5		7	32.5	
8	33.5		8	33	
9	35		9	34	
10	36		10	35	
11	37		11	36	
12	38		12	37	
13	39		13	38	
14	40		14	39	
15	41.5		15	41	
15:38	42	1	16	41.8	1
16	42.5	2	17:20	42.6	2
P.A. Promedio	42.25		P.A. Promedio	42.2	

Asfalto Convencional Prueba 3		
Tiempo(min)	Temperatura	Bola
0	25	
1	25.5	
2	26.5	
3	27.5	
4	28.5	
5	29.5	
6	30.8	
7	32	
8	33	
9	34	
10	35	
11	36	
12	37	
13	38	
14	39	
15	41	
16	42	1
17	42.5	2
P.A. Promedio	42.25	

✓ **ASFALTO MODIFICADO 4%**

Asfalto Modificado (4%) Prueba 1		
Tiempo(min)	Temperatura	Bola
0	25	
1	26	
2	27	
3	28.5	
4	30	
5	31	
6	32.5	
7	34	
8	35	
9	36	
10	37	
11	38.5	
12	39.5	
13	40.5	
14	41.5	
15	42.5	
16	43.5	
16:32	43.8	1
17	44	
17:20	44.5	2
P.A. Promedio	44.15	

Asfalto Modificado (4%) Prueba 2		
Tiempo(min)	Temperatura	Bola
0	25	
1	26	
2	27	
3	28	
4	29	
5	30	
6	31	
7	32	
8	33	
9	34	
10	35	
11	37	
12	38	
13	39	
14	40	
15	41	
16	42	
17	43	1
18	44	
18:30	45.2	2
P.A. Promedio	44.1	

Asfalto Modificado (4%) Prueba 3		
Tiempo(min)	Temperatura	Bola
0	25	
1	26	
2	27	
3	28	
4	29	
5	30	
6	31	
7	32	
8	33	
9	35	
10	36	
11	37	
12	38	
13	39	
14	40	
15	41	
16	42	
17	43	1
17:29	44.5	
18	45.3	2
P.A. Promedio	44.15	

✓ **ASFALTO MODIFICADO 4.5 %**

Asfalto Modificado (4.5%) Prueba 1		
Tiempo(min)	Temperatura	Bola
0	25	
1	25.5	
2	26	
3	27	
4	28	
5	29	
6	30	
7	30.5	
8	32	
9	33	
10	34	
11	35	
12	35.5	
13	37	
14	38	
15	38.5	
16	39.5	
17	40	
18	41	
19	42	
20	43	
21	44	
21:50	44.5	1
22	45	2
P.A. Promedio	44.75	

Asfalto Modificado (4.5%) Prueba 2		
Tiempo(min)	Temperatura	Bola
0	25	
1	25.5	
2	27	
3	28	
4	29	
5	30.5	
6	32	
7	33	
8	34	
9	35	
10	36.5	
11	38	
12	39.5	
13	40	
14	41.5	
15	42.5	
16	43.5	
16:50	44.5	1
17	45	2
P.A. Promedio	44.75	

Asfalto Modificado (4.5%) Prueba 3		
Tiempo(min)	Temperatura	Bola
0	25	
1	26	
2	27	
3	28	
4	29	
5	30	
6	31	
7	32	
8	33	
9	34	
10	36	
11	37	
12	38	
13	39	
14	41	
15	42	
16	43	
16:50	44.5	1
17	45	2
P.A. Promedio	44.75	

✓ **ASFALTO MODIFICADO 5 %**

Asfalto Modificado (5%) Prueba 1		
Tiempo(min)	Temperatura	Bola
0	25	
1	27	
2	28	
3	29	
4	30	
5	31	
6	32	
7	33	
8	34	
9	35	
10	36	
11	37	
12	38	
13	39	
14	40	
15	41	
16	42	
17	42.8	
18	43	
19	43.5	
20	44	
21	44.5	
21:40	45	1
22	45.25	
22:34	45.5	2
P.A. Promedio	45.25	

Asfalto Modificado (5%)Prueba 2		
Tiempo(min)	Temperatura	Bola
0	24	
1	24.5	
2	25	
3	26	
4	27	
5	29	
6	30	
7	31	
8	32	
9	32.5	
10	33	
11	34	
12	35	
13	35.5	
14	36	
15	37	
16	38	
17	39	
18	40	
19	40.5	
20	41	
21	43	
22	44	
22:20	45	1
22:38	45.5	2
P.A. Promedio	45.25	

Asfalto Modificado (5%)Prueba 3		
Tiempo(min)	Temperatura	Bola
0	25	
1	25.5	
2	26	
3	27	
4	28	
5	29	
6	30	
7	31	
8	32	
9	33	
10	34	
11	35	
12	35.5	
13	36	
14	37	
15	38	
16	39	
17	40	
18	41	
19	42	
20	43	
21	44	
22	44.5	1
23	45.5	2
P.A. Promedio	45	

✓ **ASFALTO MODIFICADO 5.5 %**

Asfalto Modificado (5.5%) Prueba 1		
Tiempo(min)	Temperatura	Bola
0	25	
1	26	
2	27	
3	28	
4	30	
5	31	
6	32.5	
7	34	
8	36	
9	37	
10	39	
11	40	
12	42	
13	43	
14	45	
15	46	1
15:28	46.5	2
P.A. Promedio	46.25	

Asfalto Modificado (5.5%) Prueba 2		
Tiempo(min)	Temperatura	Bola
0	25	
1	26	
2	27	
3	28	
4	30	
5	31	
6	32	
7	33	
8	34	
9	35	
10	37	
11	38	
12	41	
13	42	
14	44	
15	45.5	1
16	46.8	2
P.A. Promedio	46.15	

Asfalto Modificado (5.5%) Prueba 3		
Tiempo(min)	Temperatura	Bola
0	25	
1	26	
2	27	
3	28	
4	30	
5	31	
6	32.5	
7	33.5	
8	35	
9	36	
10	37	
11	39	
12	41	
13	42	
14	44	
15	45.5	1
15:28	47	2
P.A. Promedio	46.25	

✓ ASFALTO MODIFICADO 6 %

Asfalto Modificado (6%) Prueba 1		
Tiempo(min)	Temperatura	Bola
0	25	
1	25.5	
2	26	
3	26.5	
4	27.5	
5	28	
6	29	
7	29.5	
8	30	
9	31	
10	33	
11	34	
12	34.5	
13	35	
14	35.5	
15	36	
16	37	
17	38	
18	39	
19	40	
20	40.5	
21	41	
22	42	
23	42.5	
24	43	
25	44	
26	44.5	
27	45	
28	45.5	
29	46	
30	47	1
30:35:00	47.5	2
P.A. Promedio	47.25	

Asfalto Modificado (6%) Prueba 2		
Tiempo(min)	Temperatura	Bola
0	25	
1	26	
2	26.5	
3	27	
4	28.5	
5	30	
6	31.5	
7	33	
8	34	
9	36	
10	37	
11	38.5	
12	39.5	
13	41	
14	42	
15	43	
16	45	
17	46	
18	47	
19	48	
20	49	
20:35	50	1
21	50.5	2
P.A. Promedio	50.25	

Asfalto Modificado (6%) Prueba 3		
Tiempo(min)	Temperatura	Bola
0	25	
1	26	
2	27	
3	28	
4	29	
5	30	
6	31	
7	32	
8	33	
9	34	
10	36	
11	37	
12	39	
13	40	
14	42	
15	43	
16	44	
17	45	
18	46	
19	47	
20	48	
21	49	1
22	49.5	2
P.A. Promedio	49.25	

ANEXO B: RESULTADOS ADHERENCIA EN BANDEJA

✓ ASFALTO CONVENCIONAL

Asfalto Convencional				
Muestra	Parcial	Total	Nada	Fracturados
1	11	32	0	7
2	9	29	1	11
3	13	35	0	2

✓ ASFALTO MODIFICADO 4%

Asfalto Modificado #1 (4%)				
Muestra	Parcial	Total	Nada	Fracturados
1	28	19	1	2
2	12	33	3	2
3	19	27	1	3

✓ ASFALTO MODIFICADO 4.5 %

Asfalto Modificado #2 (4.5%)				
Muestra	Parcial	Total	Nada	Fracturados
1	3	37	0	10
2	9	32	1	8
3	11	30	2	7

✓ ASFALTO MODIFICADO 5 %

Asfalto Modificado #3 (5%)				
Muestra	Parcial	Total	Nada	Fracturados
1	12	38	0	0
2	7	42	0	0
3	9	41	0	0

✓ **ASFALTO MODIFICADO 5.5 %**

Asfalto Modificado #4 (5.5%)				
Muestra	Parcial	Total	Nada	Fracturados
1	6	43	0	1
2	5	42	0	3
3	3	44	0	2

 ✓ **ASFALTO MODIFICADO 6 %**

Asfalto Modificado #5 (6%)				
Muestra	Parcial	Total	Nada	Fracturados
1	2	44	0	4
2	1	47	0	2
3	3	45	0	2

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	GRADO DE PENETRACIÓN					
		40-50		60-70		80-100	
		MÍN	MÁX	MÍN	MÁX	MÍN	MÁX
Asfalto original							
Penetración (25° C, 100 g, 5 s), 0.1 mm	E-706	40	50	60	70	80	100
Punto de ablandamiento, °C	E-712	52	58	48	54	45	52
Índice de penetración	E-724	-1.2	+0.6	-1.2	+0.6	-1.2	+0.6
Viscosidad absoluta (60° C), P	E-716 o E-717	200 0	-	150 0	-	100 0	-
Ductilidad (25° C, 5 cm/min), cm	E-702	80	-	100	-	100	-
Solubilidad en tricloroetileno, %	E-713	99	-	99	-	99	-
Contenido de agua, %	E-704	-	0.2	-	0.2	-	0.2
Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland, °C	E-709	240	-	230	-	230	-
Contenido de parafinas, %	E-718	-	3	-	3	-	3

Ilustración 11 Anexo A. Tabla de especificaciones del cemento asfáltico

ANEXO C: TABLA 410-01 ESPECIFICACIONES DEL CEMENTO

Fuente: Especificaciones INVIAS, parámetros de los materiales. Cap. 4

ANEXO D. RESULTADOS VISCOSIMENTRO ROTACIONAL

 ✓ **ASFALTO CONVENCIONAL**

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Temp	Viscosity	Temp	Viscosity	Temp	Viscosity
(°C)	Pa.s	(°C)	Pa.s	(°C)	Pa.s
90.1	0.373	90.7	0.3654	90.0	0.3565
90.7	0.369	91.1	0.3667	90.5	0.3437
91.8	0.3616	92.1	0.3616	91.5	0.3326
93.3	0.3546	93.5	0.3546	93.0	0.3215
94.8	0.3456	95	0.3456	94.4	0.3104
96.2	0.335	96.4	0.335	95.7	0.2993
97.6	0.3146	97.9	0.3146	97.1	0.2882
99.3	0.2995	99.7	0.2995	98.6	0.2771
101.1	0.2838	101.5	0.2838	100.4	0.266
103.1	0.2672	103.5	0.2672	102.2	0.2549
105.1	0.2506	105.5	0.2506	104.4	0.2438
107.2	0.2326	107.6	0.2326	106.4	0.2327
109.3	0.2163	109.6	0.2163	108.4	0.2216
111.4	0.199	111.7	0.199	110.4	0.2105
113.6	0.1827	113.8	0.1827	112.7	0.1994
115.7	0.167	115.9	0.167	114.7	0.1883
117.8	0.152	118	0.152	116.7	0.1772
119.9	0.1382	120.1	0.1382	119.0	0.1361
122.0	0.1245	122.2	0.1245	121.1	0.1245
124.1	0.1123	124.3	0.1123	123.1	0.1129
126.2	0.1008	126.3	0.1008	125.1	0.1013
128.3	0.0912	128.3	0.0912	127.3	0.0897
130.3	0.05472	130.4	0.0816	129.3	0.0781
132.4	0.05056	132.4	0.07328	131.3	0.0665
134.4	0.04672	134.4	0.06656	133.3	0.0549
136.4	0.04416	136.3	0.05984	135.4	0.0433
138.4	0.04	138.3	0.0544	137.4	0.0417
140.4	0.03712	140.3	0.04928	139.3	0.0401
142.3	0.03456	142.2	0.04512	141.4	0.0385
144.3	0.032	144.1	0.04128	143.3	0.034
146.2	0.02944	146	0.03776	145.2	0.0314
148.1	0.0272	147.9	0.03488	147.0	0.0298
150.0	0.02528	149.8	0.03168	149.1	0.02968
151.8	0.02336	151.6	0.02976	150.9	0.02956
153.3	0.02176	153.1	0.0272	152.5	0.0272
154.6	0.02016	154.5	0.02496	153.8	0.02496
155.5	0.01888	155.4	0.02368	154.9	0.02368
156.2	0.0176	156.2	0.02176	155.6	0.02176
156.9	0.01664	156.8	0.02048	156.3	0.02048
157.6	0.01568	157.5	0.01952	157.0	0.01952
158.5	0.01504	158.3	0.01824	157.9	0.01824
159.6	0.01408	159.4	0.01728	159.0	0.01728
160.8	0.01344	160.5	0.01664	160.1	0.01664

✓ **ASFALTO MODIFICADO 4%**

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Temp	Viscosity	Temp	Viscosity	Temp	Viscosity
(°C)	(Pa*s)	(°C)	(Pa*s)	(°C)	(Pa*s)
90.8	0.4838	89	0.4531	90.7	0.46845
91.3	0.4787	89.4	0.4467	91	0.4627
92.3	0.45	90.5	0.441	91.9	0.4455
93.7	0.4239	91.9	0.4378	93.2	0.43085
95.3	0.4046	93.5	0.4256	94.8	0.4151
96.8	0.3875	95.1	0.4043	96.2	0.3959
98.4	0.3473	96.4	0.3743	97.7	0.3608
100.3	0.3245	97.8	0.3592	99.4	0.34185
102.2	0.3046	99.4	0.3369	101.5	0.32075
104.2	0.2778	101.2	0.3157	103.4	0.29675
106.3	0.2515	103.1	0.3062	105.3	0.27885
108.4	0.2272	105.1	0.2858	107.6	0.2565
110.5	0.2038	107.2	0.2643	109.6	0.23405
112.6	0.183	109.3	0.2429	111.6	0.21295
114.7	0.1632	111.3	0.2214	113.6	0.1923
116.8	0.1453	113.4	0.2026	115.9	0.17395
118.9	0.1299	115.5	0.184	117.9	0.15695
121	0.1149	117.6	0.1664	119.9	0.14065
123.1	0.103	119.7	0.1504	121.9	0.1267
125.1	0.09216	121.8	0.1354	124.1	0.11378
127.2	0.08192	123.8	0.1219	126.1	0.10191
129.2	0.07424	125.9	0.1091	128	0.09167
131.2	0.06624	127.9	0.09984	129.9	0.08304
133.2	0.05984	130	0.08896	132.2	0.0744
135.2	0.0544	131.9	0.0816	134.1	0.068
137.1	0.04896	134	0.07296	136	0.06096
139.1	0.0448	135.9	0.0672	138.1	0.056
141	0.04096	137.9	0.06016	140	0.05056
143	0.03712	139.8	0.05568	141.8	0.0464
144.9	0.03424	141.8	0.05056	143.7	0.0424
146.8	0.03136	143.7	0.04608	145.7	0.03872
148.7	0.02848	145.6	0.04288	147.6	0.03568
150.5	0.02624	147.5	0.0384	149.4	0.03232
152.3	0.02432	149.4	0.03616	151.1	0.03024
153.8	0.0224	151.2	0.03296	152.9	0.02768
155	0.02112	152.9	0.03008	154.2	0.0256
155.9	0.01984	154.3	0.02848	155.2	0.02416
156.6	0.01856	155.4	0.02656	156	0.02256
157.1	0.0176	156.2	0.02496	156.6	0.02128
157.7	0.01664	156.9	0.02368	157.1	0.02016
158.6	0.01568	157.4	0.02272	157.9	0.0192
159.6	0.01472	158.3	0.02176	159	0.01824
160.8	0.01408	159.2	0.02048	160.2	0.01728

✓ **ASFALTO MODIFICADO 4.5 %**

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Temp	Viscosity	Temp	Viscosity	Temp	Viscosity
(°C)	(Pa*s)	(°C)	(Pa*s)	(°C)	(Pa*s)
91.8	0.3136	90.7	0.3565	91.25	0.33505
92.2	0.3123	91.2	0.3584	91.7	0.33535
93.3	0.3066	92.2	0.352	92.75	0.3293
94.6	0.3008	93.6	0.3469	94.1	0.32385
96	0.287	95.1	0.3299	95.55	0.30845
97.5	0.2781	96.6	0.3155	97.05	0.2968
99.1	0.2694	98.2	0.3072	98.65	0.2883
100.9	0.255	100	0.289	100.45	0.272
102.9	0.2445	101.9	0.2739	102.4	0.2592
104.9	0.2288	103.9	0.255	104.4	0.2419
107	0.2163	106	0.2384	106.5	0.22735
109.1	0.2006	108.2	0.2227	108.65	0.21165
111.3	0.1862	110.3	0.2032	110.8	0.1947
113.4	0.1715	112.4	0.1866	112.9	0.17905
115.5	0.1574	114.6	0.169	115.05	0.1632
117.6	0.1443	116.7	0.1565	117.15	0.1504
119.8	0.1315	118.9	0.1395	119.35	0.1355
121.8	0.1194	121	0.128	121.4	0.1237
123.9	0.1085	123.1	0.1139	123.5	0.1112
126	0.09856	125.2	0.1053	125.6	0.10193
128.1	0.09024	127.3	0.09344	127.7	0.09184
130.1	0.08128	129.4	0.08672	129.75	0.084
132.1	0.07488	131.5	0.0768	131.8	0.07584
134.1	0.0672	133.5	0.07136	133.8	0.06928
136.2	0.0624	135.6	0.06368	135.9	0.06304
138.1	0.05568	137.6	0.0592	137.85	0.05744
140.1	0.05216	139.6	0.05376	139.85	0.05296
142	0.04672	141.6	0.0496	141.8	0.04816
144	0.04384	143.6	0.04512	143.8	0.04448
145.9	0.04032	145.5	0.04128	145.7	0.0408
147.8	0.0368	147.5	0.03872	147.65	0.03776
149.7	0.03456	149.4	0.03488	149.55	0.03472
151.6	0.03136	151.3	0.03264	151.45	0.032
153.1	0.02976	153	0.03008	153.05	0.02992
154.4	0.0272	154.3	0.02784	154.35	0.02752
155.4	0.0256	155.3	0.02592	155.35	0.02576
156.1	0.02432	156	0.024	156.05	0.02416
156.8	0.02304	156.6	0.02304	156.7	0.02304
157.4	0.02208	157.3	0.02112	157.35	0.0216
158.2	0.0208	158.1	0.02048	158.15	0.02064
159.3	0.01984	159.2	0.0192	159.25	0.01952
160.4	0.01888	160.4	0.01824	160.4	0.01856

✓ **ASFALTO MODIFICADO 5 %**

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Temp	Viscosity	Temp	Viscosity	Temp	Viscosity
(°C)	Pa.s	(°C)	Pa.s	(°C)	Pa.s
92.4	0.2912	92	0.2995	92.2	0.29535
93	0.3002	92.5	0.3014	92.75	0.3008
94	0.3014	93.5	0.3008	93.75	0.3011
95.3	0.3002	94.9	0.3008	95.1	0.3005
96.7	0.2995	96.3	0.2976	96.5	0.29855
97.8	0.2867	97.5	0.255	97.65	0.27085
98.9	0.2854	98.5	0.28	98.7	0.2827
100.4	0.2797	99.8	0.2733	100.1	0.2765
102.1	0.2726	101.4	0.2653	101.75	0.26895
104	0.2643	103.2	0.2566	103.6	0.26045
105.9	0.2547	105.1	0.2477	105.5	0.2512
107.9	0.2442	107.1	0.2374	107.5	0.2408
110	0.233	109.1	0.2266	109.55	0.2298
112.1	0.217	111.2	0.2144	111.65	0.2157
114.2	0.2224	113.2	0.2029	113.7	0.21265
116.3	0.2093	115.3	0.1907	115.8	0.2
118.4	0.1978	117.4	0.1792	117.9	0.1885
120.4	0.1859	119.5	0.1667	119.95	0.1763
122.5	0.1728	121.6	0.1552	122.05	0.164
124.6	0.1619	123.6	0.144	124.1	0.15295
126.7	0.1501	125.7	0.1344	126.2	0.14225
128.7	0.1398	127.7	0.1229	128.2	0.13135
130.7	0.129	129.8	0.1136	130.25	0.1213
132.7	0.1194	131.8	0.1034	132.25	0.1114
134.7	0.1098	133.8	0.09568	134.25	0.10274
136.7	0.1011	135.8	0.08736	136.25	0.09423
138.6	0.09184	137.7	0.08096	138.15	0.0864
140.6	0.08608	139.7	0.07392	140.15	0.08
142.5	0.07808	141.6	0.0688	142.05	0.07344
144.4	0.07136	143.6	0.06272	144	0.06704
146.3	0.06624	145.5	0.05824	145.9	0.06224
148.2	0.06144	147.4	0.05408	147.8	0.05776
150.1	0.0576	149.3	0.05024	149.7	0.05392
151.9	0.0528	151.1	0.04672	151.5	0.04976
153.5	0.05024	152.8	0.04384	153.15	0.04704
154.7	0.04672	154.3	0.04128	154.5	0.044
155.7	0.0448	155.3	0.03712	155.5	0.04096
156.4	0.04224	156.1	0.03552	156.25	0.03888
157.1	0.04032	156.8	0.03296	156.95	0.03664
157.7	0.0384	157.4	0.03104	157.55	0.03472
158.6	0.03648	158.2	0.02944	158.4	0.03296
159.6	0.03488	159.2	0.02752	159.4	0.0312
160.8	0.03296	160.3	0.02592	160.55	0.02944

✓ **ASFALTO MODIFICADO 5.5 %**

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Temp	Viscosity	Temp	Viscosity	Temp	Viscosity
(°C)	Pa.s	(°C)	Pa.s	(°C)	Pa.s
91.3	0.3488	91.7	0.3213	91.5	0.33505
91.8	0.368	92.2	0.3322	92	0.3501
92.8	0.3674	93.2	0.3309	93	0.34915
94.1	0.3629	94.5	0.3251	94.3	0.344
95.6	0.3533	95.9	0.3187	95.75	0.336
96.9	0.343	97.1	0.3173	97	0.33015
97.8	0.3359	98	0.3162	97.9	0.32605
98.9	0.324	99.2	0.3066	99.05	0.3153
100.3	0.3126	100.6	0.2947	100.45	0.30365
102	0.2979	102.3	0.2816	102.15	0.28975
103.8	0.2806	104.1	0.2688	103.95	0.2747
105.7	0.263	106.1	0.2538	105.9	0.2584
107.7	0.2451	108.1	0.239	107.9	0.24205
109.6	0.2278	110.1	0.2224	109.85	0.2251
111.6	0.2106	112.1	0.2074	111.85	0.209
113.7	0.192	114.2	0.1904	113.95	0.1912
115.7	0.1757	116.2	0.176	115.95	0.17585
117.7	0.1568	118.3	0.1584	118	0.1576
119.7	0.1427	120.3	0.1453	120	0.144
121.7	0.1277	122.4	0.129	122.05	0.12835
123.7	0.1133	124.4	0.1168	124.05	0.11505
125.7	0.1024	126.4	0.1024	126.05	0.1024
127.7	0.0896	128.4	0.0928	128.05	0.0912
129.6	0.08	130.4	0.08096	130	0.08048
131.5	0.06976	132.4	0.07328	131.95	0.07152
133.5	0.06336	134.3	0.06368	133.9	0.06352
135.4	0.05536	136.2	0.05728	135.8	0.05632
137.3	0.04992	138.2	0.0496	137.75	0.04976
139.1	0.04288	140.1	0.04448	139.6	0.04368
141	0.0384	141.9	0.0384	141.45	0.0384
142.9	0.03328	143.9	0.03456	143.4	0.03392
144.7	0.02912	145.7	0.02912	145.2	0.02912
146.6	0.02528	147.6	0.02592	147.1	0.0256
148.4	0.02208	149.4	0.0224	148.9	0.02224
150.2	0.0192	151.3	0.01984	150.75	0.01952
151.9	0.016	152.9	0.01728	152.4	0.01664
153.5	0.0144	154.3	0.01536	153.9	0.01488
154.8	0.01216	155.4	0.01344	155.1	0.0128
155.9	0.01024	156.1	0.01184	156	0.01104
156.6	0.00864	156.8	0.01056	156.7	0.0096
157.2	0.0064	157.3	0.00896	157.25	0.00768
157.9	0.00512	158.1	0.00768	158	0.0064
158.6	0.00352	159.1	0.00608	158.85	0.0048
159.6	0.00288	160.3	0.00448	159.95	0.00368
160.7	0.00128	161.4	0.00096	161.05	0.00112

✓ ASFALTO MODIFICADO 6 %

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Temp	Viscosity	Temp	Viscosity	Temp	Viscosity
(°C)	(Pa.s)	(°C)	(Pa.s)	(°C)	(Pa.s)
91.4	0.496	92.4	0.4994	92.6	0.4977
91.9	0.495	92.9	0.4992	94	0.4971
92.9	0.491	93.9	0.4954	95.5	0.4932
94.3	0.4864	95.2	0.4877	97	0.48705
95.9	0.476	96.5	0.4698	98.2	0.4729
97.5	0.4326	97.7	0.4326	99	0.4326
98.7	0.4298	98.8	0.4098	99.5	0.4198
99.4	0.3972	100.2	0.3872	99.9	0.3922
99.9	0.3721	101.8	0.3621	100.3	0.3671
100.2	0.3494	103.7	0.3394	101.4	0.3444
100.8	0.3283	105.6	0.3183	102.7	0.3233
101.8	0.3134	107.6	0.3034	104.2	0.3084
103.2	0.2987	109.6	0.2787	105.9	0.2887
104.9	0.266	111.7	0.256	107.9	0.261
106.7	0.2523	113.8	0.2323	109.7	0.2423
108.6	0.2309	115.8	0.2109	111.6	0.2209
110.5	0.191	117.9	0.191	113.8	0.191
112.5	0.176	120	0.1722	115.7	0.1741
114.6	0.1786	122.1	0.1542	117.7	0.1664
116.6	0.1773	124.2	0.1395	119.6	0.1584
118.6	0.1683	126.2	0.1258	121.8	0.14705
120.7	0.1638	128.3	0.1139	123.8	0.13885
122.8	0.1552	130.3	0.103	125.8	0.1291
124.8	0.1533	132.3	0.0928	127.7	0.12305
126.8	0.1494	134.4	0.0848	129.9	0.1171
128.8	0.1459	136.3	0.07616	131.8	0.11103
130.8	0.1424	138.3	0.0704	133.7	0.1064
132.9	0.1376	140.3	0.06368	135.8	0.10064
134.8	0.1325	142.2	0.05824	137.7	0.09537
136.8	0.1274	144.2	0.05408	139.6	0.09074
138.7	0.1213	146.1	0.04896	141.4	0.08513
140.6	0.1155	148	0.04576	143.5	0.08063
142.6	0.1091	149.9	0.04256	145.4	0.07583
144.5	0.103	151.7	0.03936	147.2	0.07118
146.4	0.09696	153.3	0.03712	149	0.06704
148.3	0.0912	154.6	0.03456	151	0.06288
150.1	0.08512	155.6	0.03232	152.5	0.05872
151.9	0.07936	156.3	0.0304	153.9	0.05488
153.5	0.07456	156.9	0.0288	155.1	0.05168
154.8	0.06912	157.6	0.02752	155.8	0.04832
155.8	0.06432	158.4	0.02624	156.5	0.04528
156.4	0.06048	159.4	0.02496	157.1	0.04272
157.1	0.056	160.6	0.02336	158	0.03968
157.7	0.05248	161.6	0.02208	159	0.03728
158.5	0.04832	162.5	0.02176	160.1	0.03504
159.6	0.04576	163	0.02112	161.1	0.03344
160.7	0.04192	163.3	0.0192	162.1	0.03056