

**EVALUACIÓN DE LA ADHESIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO CON USO DE  
ADITIVO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS CON AGREGADOS DEL RIO CHICAMOCHA**



**AUTOR**

**SILVIA DANIELA NAVAS BELTRÁN**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

**ESPECIALISTA EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS**

Director:

**OSCAR RAMIREZ FRANCO**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS  
BOGOTÁ, 24 JUNIO 2022**

## Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN .....	6
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	8
OBJETIVOS .....	10
Objetivo general .....	10
Objetivos específicos.....	10
JUSTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN .....	11
Justificación práctica.....	11
Delimitación (Espacio y territorio) .....	11
MARCO TEÓRICO.....	13
Cemento asfáltico.....	13
Cemento asfáltico 60 – 70 convencional.....	13
Cemento asfáltico 60-70 normalizado.....	13
Aditivo promotor de adherencia.....	14
Surfax AS-500 C. ....	14
Efecto del agua en la durabilidad de las mezclas asfálticas .....	15
Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas utilizando la prueba de tracción indirecta (TSR) Norma: INV E – 725 - 13.....	15
DISEÑO METODOLÓGICO.....	17
ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	18
Caracterización del agregado pétreo .....	18
Verificación del cemento asfáltico.....	20
Diseño de la mezcla.....	22
Ejecución del ensayo de tracción indirecta .....	24
Análisis de costos .....	51
CONCLUSIONES .....	55
RECOMENDACIONES.....	57
REFERENCIAS.....	58

## Lista de tablas

Tabla 1 <i>Ficha técnica del aditivo</i> .....	14
Tabla 2 <i>Resultados obtenidos de los ensayos a los agregados pétreos</i> .....	18
Tabla 3 <i>Granulometría de la combinación de áridos para fórmula de trabajo</i> .....	19
Tabla 4 <i>Resultados reportados en el certificado de calidad del asfalto convencional</i> .....	20
Tabla 5 <i>Resultados reportados en el certificado de calidad del asfalto normalizado</i> .....	21
Tabla 6 <i>Resumen de propiedades físicas de mezcla tipo MDC-19 con diferentes contenidos de asfalto</i> .....	22
Tabla 7 <i>Fórmula de trabajo</i> .....	23
Tabla 8 <i>Distribución de briquetas para realización del ensayo</i> .....	24
Tabla 9 <i>Cálculo de la cantidad de aditivo</i> .....	26
Tabla 10 <i>Resultados de la gravedad específica máxima de la mezcla</i> .....	29
Tabla 11 <i>Resultados de la medición de diámetro y altura</i> .....	31
Tabla 12 <i>Cálculo de la gravedad específica bulk</i> .....	33
Tabla 13 <i>Cálculo del volumen de vacíos</i> .....	35
Tabla 14 <i>Resultado de la carga máxima grupo seco</i> .....	38
Tabla 15 <i>Cálculo del volumen de agua absorbida</i> .....	40
Tabla 16 <i>Cálculo del grado de saturación</i> .....	42
Tabla 17 <i>Cálculo del grado de saturación</i> .....	44
Tabla 18 <i>Resultado de la carga máxima grupo húmedo</i> .....	48
Tabla 19 <i>Cálculo de la resistencia a la tensión</i> .....	50
Tabla 20 <i>Cálculo de materiales de mezcla asfáltica con promotor de adherencia</i> .....	53
Tabla 21 <i>Cálculo de costos de mezcla asfáltica con CAN 60-70 aditivado</i> .....	53
Tabla 22 <i>Cálculo de la resistencia a la tensión</i> .....	55

## Lista de figuras

<i>Figura 1</i> Fuente de agregados río Chicamocha sector Pescadero .....	12
<i>Figura 2</i> Comportamiento granulométrico mezcla tipo MDC-19-19.....	20
<i>Figura 3</i> Dosificación del material.....	25
<i>Figura 4</i> Dosificación del aditivo.....	26
<i>Figura 5</i> Dosificación del cemento asfáltico.....	27
<i>Figura 6</i> Mezclado del agregado y cemento asfáltico.....	27
<i>Figura 7</i> Vaciado de la mezcla en el molde .....	28
<i>Figura 8</i> Compactación de briquetas.....	28
<i>Figura 9</i> Determinación de gravedad específica máxima medida.....	29
<i>Figura 10</i> Extracción de briquetas.....	30
<i>Figura 11</i> Probetas compactadas.....	30
<i>Figura 12</i> Medición con pie de rey de la briqueta.....	31
<i>Figura 13</i> Determinación de la gravedad específica bulk .....	33

<i>Figura 14</i> Acondicionamiento de las briquetas en seco .....	37
<i>Figura 15</i> Probeta sometida a ensayo de tracción indirecta .....	38
<i>Figura 16</i> Saturación de la briqueta.....	40
<i>Figura 17</i> Acondicionamiento de las probetas saturadas .....	43
<i>Figura 18</i> Probeta sometida a ensayo de tracción indirecta .....	47
<i>Figura 19</i> Probetas falladas .....	47
<i>Figura 20</i> Probetas falladas .....	48
<i>Figura 21</i> Costos por metro cúbico de mezcla asfáltica.....	52

## RESUMEN

En este trabajo de investigación se evalúa el uso de un aditivo mejorador de adherencia en una mezcla asfáltica en caliente tipo MDC-19 con agregados del río Chicamocha sector Pescadero y cemento asfáltico 60-70 proveniente de la refinería de Ecopetrol en Barrancabermeja, así como con cemento asfáltico normalizado 60-70, mediante el ensayo de tracción indirecta INV E – 725 – 13. Los resultados muestran el contenido de aditivo necesario para cumplir con el criterio requerido en la especificación 450 – 22 del Instituto Nacional de Vías y cuál de los dos tipos de asfalto es menos susceptible a que se desprenda de la superficie del agregado. También se calcula el costo adicional que tendría la planta de mezcla asfáltica para producir con el uso del aditivo, con el fin de seleccionar la opción de menor costo.

*Palabras clave:* mezcla asfáltica, aditivo, mejorador de adherencia, TSR,

## ABSTRACT

In this research work, it is evaluated the use of an additive to improve the hot mix asphalt adherence between aggregates from Rio Chicamocha, Pescadero, and asphalt cement AC 60-70 from the Ecopetrol refinery in Barrancabermeja, as normalized asphalt cement AC 60-70, through the INV E – 725 – 13 indirect tensile test. The results show the additive content necessary to meet the criteria required in the article 450 – 22 of the Instituto Nacional de Vías and which of the two types of asphalt is less susceptible to flaking off the aggregate surface. The additional cost that the asphalt mixing plant has to produce with the use of the additive is also calculated, in order to select the lowest cost option.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación busca analizar el comportamiento de los agregados pétreos del río Chicamocha sector Pescadero bajo la ejecución del ensayo de tracción indirecta INV E – 725 – 13 con el fin de medir el efecto del agua sobre las mezclas asfálticas con cemento asfáltico de refinería 60-70 y normalizado 60-70 con diferentes porcentajes de aditivo promotor de adherencia de forma tal que se de cumplimiento al requisito de verificación del diseño Marshall de la tabla 450-10 de la especificación 450 – 22 del Instituto Nacional de Vías.

La primera parte de este trabajo describe el planteamiento del problema, seguido de los objetivos, la justificación práctica y delimitación de espacio y tiempo.

En el marco teórico se recopila información sobre el efecto del agua en la durabilidad de las mezclas asfálticas, los fenómenos de daño por humedad y otros conceptos.

En el diseño metodológico se describe la metodología seguida para dar respuesta al problema y alcanzar los objetivos de investigación.

En el capítulo de análisis y resultados se presenta la caracterización del agregado pétreo y cemento asfáltico de refinería y normalizado, el diseño de mezcla, el procedimiento de ejecución del ensayo para medir el efecto del agua sobre su resistencia a la tracción indirecta.

Para el ensayo de tracción indirecta, se plantea la elaboración de sesenta y cuatro (64) briquetas distribuidas así: treinta y dos (32) con asfalto de refinería 60-70 y treinta (32) con asfalto normalizado 60-70 con el porcentaje definido como óptimo en el diseño preliminar, y de cada grupo, ocho (8) por cada porcentaje de aditivo mejorador de adherencia (0%, 0.25%, 0.50% y 0.75%). Una vez obtenidos los valores en porcentaje de resistencia retenida para el ensayo de tracción indirecta para los diferentes tipos de asfalto y porcentajes de aditivo promotor de

adherencia, se verifican cuales cumplen con el requisito exigido por el Instituto Nacional de Vías.

Finalmente, se hace un análisis de costos de producción de mezcla asfáltica con los tipos de asfalto y dosificaciones que cumplen con el requisito de adherencia para determinar la opción con menor costo.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Este estudio es motivado por el incumplimiento del resultado de la evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas con cemento asfáltico de refinería de Barrancabermeja y agregados pétreos del río Chicamocha sector Pescadero, utilizando la prueba de tracción indirecta, pues es menor al requerido por el Instituto Nacional de Vías en sus Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras.

Esta problemática es de especial interés para la planta de producción de mezclas asfálticas, pues se puede afectar la integridad y la resistencia de la mezcla asfáltica en caliente por reducción en la cohesión del cemento asfáltico por interacción química y/o físicamente con el agua. El desempeño de la mezcla también se ve afectado por el daño por humedad por la presencia de agua o vapor de agua al interior de la misma, la cual rompe la unión adhesiva entre la película de asfalto y la superficie del agregado, ocasionando el desprendimiento del agregado pétreo del ligante asfáltico o stripping y a su vez, pérdida de funcionalidad de la vía construida. De no darle tratamiento de manera adecuada, se puede alterar el índice de rugosidad internacional (IRI) y el ahuellamiento, del mismo modo se puede generar daños en la estructura del pavimento y el índice de condición del pavimento (PCI) o la evaluación superficial se vería afectada de manera importante. Esto generaría reclamaciones por parte del cliente y la oportunidad para hacer efectiva la garantía de estabilidad y calidad de la obra y/o producto si fuere contrato de suministro.

Por lo anterior, ante la necesidad apremiante de un tipo de aditivo mejorador de adherencia y teniendo en cuenta que, esta opción hará que los costos de producción de mezclas asfálticas en caliente se incrementen de manera significativa, es necesario determinar ¿cuál es la opción menos

costosa y que solucione el problema de adherencia de las mezclas asfálticas con cemento asfáltico convencional y normalizado 60-70 usando aditivo?

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Evaluar la adherencia cemento asfáltico convencional y cemento asfáltico normalizado 60-70 con el agregado pétreo, por medio del ensayo de tracción indirecta (INV E – 725 – 13).

### **Objetivos específicos**

Caracterizar el agregado pétreo proveniente del río Chicamocha sector Pescadero y verificar el cemento asfáltico 60-70 de refinería de Barrancabermeja para la elaboración del diseño de mezcla.

Describir el procedimiento empleado para cuantificar la susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfálticas.

Comprobar la efectividad de un aditivo promotor de adherencia y comparar la capacidad de adherencia que puede generar el cemento asfáltico normalizado 60-70 en contraste con el cemento asfáltico de refinería 60-70.

Determinar el tipo de asfalto y contenido óptimo de aditivo promotor de adherencia para dar cumplimiento al requisito de adherencia señalado por el Instituto Nacional de Vías que tenga menor costo.

## **JUSTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN**

### **Justificación práctica**

Con el objeto de dar cumplimiento al requisito de adherencia del artículo 450 – 22 de las “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras” de la tabla 450 – 10 “Verificación del diseño Marshall”, donde el porcentaje de adherencia mínimo exigido por el Instituto Nacional de Vías debe ser del 80%, se quiere comprobar la eficacia del aditivo SURFAX AS-500 C mejorando la adherencia en la unión asfalto-agregado de una mezcla densa en caliente tipo MDC-19 producida en la planta ubicada en el Kilómetro 4 vía Zapatoca del departamento de Santander. Con los resultados obtenidos del ensayo de “Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizado la prueba de tracción indirecta, efectuado según el procedimiento establecido en la norma INV E – 725 – 13 a probetas preparadas con asfalto de refinería 60-70 y asfalto normalizado 60-70, se optará por la opción de asfalto y contenido óptimo de dicho aditivo que represente un menor costo para el proceso de producción de mezclas asfálticas.

### **Delimitación (Espacio y territorio)**

El agregado pétreo empleado en la elaboración de la mezcla asfáltica procede del río Chicamocha sector Pescadero (Santander).



*Figura 1* Fuente de agregados río Chicamocha sector Pescadero

El cemento asfáltico 60-70 proviene de la Refinería de Ecopetrol de Barrancabermeja y el cemento asfáltico normalizado 60-70 es suministrado por Multinsa.

Se tomaron todas las condiciones de la mezcla densa en caliente tipo MDC-19 de la planta de producción de mezclas asfálticas ubicada en el Kilómetro 4 vía Zapatoca en el departamento de Santander. En el laboratorio de la planta se realizaron algunos ensayos para la actualización del diseño Marshall, y los restantes en laboratorios externos. Para dicha actualización y ejecución de las pruebas de tracción indirecta se estiman cuatro (4) meses.

## MARCO TEÓRICO

### **Cemento asfáltico**

Es un material que puede ser obtenido como subproducto de la destilación de determinados crudos de petróleo o se puede encontrar en la naturaleza en yacimientos naturales. Tiene cohesión y la adhesión con materiales granulares, características que lo hacen ideal para los trabajos de pavimentación.

El asfalto tiene una consistencia sólida y cambia su comportamiento dependiendo de la temperatura, al calentarlo se ablanda y se vuelve líquido, lo que le permite recubrir los agregados durante el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica en caliente (Urrego E, Ruiz C, 2016).

### **Cemento asfáltico 60 – 70 convencional**

Los asfaltos de penetración 60-70 son constituidos por la fracción más pesada obtenida de la destilación al vacío del crudo reducido (fondos de la destilación atmosférica del petróleo) en la refinería de Ecopetrol. Normalmente son hidrocarburos pesados solubles de color oscuro, que pueden ser líquidos o sólidos (Multinsa).

### **Cemento asfáltico 60-70 normalizado**

Se obtiene en los fondos de la torre de destilación al vacío de la refinación del petróleo, cuya dureza se ha ajustado de acuerdo a las especificaciones INVIAS para que su punto de penetración esté entre 60-70 [0.1mm]. Para la producción del asfalto normalizado se parte del asfalto de refinería y es sometido a un proceso en industrial mediante el cual se acondiciona con aditivos específicos, según la necesidad para lograr cumplimiento de especificaciones y obtener una característica de penetración comprendida entre 60 y 70 mm/10 (Multinsa).

## Aditivo promotor de adherencia

Es un producto químico que al ser incluido en el cemento asfáltico de la mezcla mejora notablemente las características de adherencia entre los agregados y el asfalto, proporcionándole una mayor durabilidad a la carpeta asfáltica. Debe ser incorporado al asfalto en estado líquido mediante dispositivos mecánicos de agitación, por circulación o mediante las recomendaciones o especificaciones del fabricante (Rojas F, García H, Curco A y León B, 2013).

### Surfax AS-500 C.

El producto tal cual se presenta se puede incorporar al asfalto en los diferentes tipos de plantas de mezcla densa en caliente. Gracias a su formulación especial, puede reducir drásticamente el desprendimiento con agregados difíciles o permitir el uso de dosificaciones de aditivo más bajas con agregados regulares. Es un producto seguro de utilizar debido a su elevado punto de flama.

## Tabla 1

### *Ficha técnica del aditivo*

<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS</b>	
Aspecto a 25°C	Líquido viscoso
Olor característico	Amoniacal
Color	Oscuro
Punto de flama	>145°C
<b>FORMULACIONES TÍPICAS</b>	
Asfalto virgen	1000 kg
SURAX AS-500 C	2-5 kg
<b>PRESENTACIÓN</b>	
Tambor metálico con 200 kg, peso neto	
<b>MANEJO Y ALMACENAMIENTO</b>	
Mantener a la sombra, bajo techo y siempre en su envase, cerrado	
<b>RECOMENDACIONES DE USO</b>	
Se puede adicionar al asfalto o rebajado asfáltico en línea de inyección del tambor mezclador de la planta de mezcla. También se puede mezclar con el asfalto en tanque con agitación.	

## **Efecto del agua en la durabilidad de las mezclas asfálticas**

El daño por humedad en mezclas asfálticas se puede definir como el deterioro de la capacidad estructural de la mezcla causada por la presencia de agua al interior de su microestructura. En la actualidad se cuentan con especificaciones para garantizar una resistencia mínima de las mezclas al daño por humedad, así como con procedimientos para emplear modificadores que promuevan dicha resistencia (Caro S y Alvarez A, 2011).

Existen tres modos principales de transporte de agua al interior de las mezclas en un pavimento:

- Infiltración de agua líquida desde la superficie del pavimento a través de vacíos interconectados hacia el interior de la mezcla.
- Difusión de vapor de agua y/o agua líquida a través de los componentes constitutivos de la mezcla.
- Ascensión capilar proveniente de la superficie inferior de la mezcla de agua líquida.

Las manifestaciones de daño tienen en común la pérdida de las propiedades de adhesión en la interfase agregado-cemento asfáltico (Figueroa A y Reyes F, 2015).

## **Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas utilizando la prueba de tracción indirecta (TSR) Norma: INV E – 725 - 13**

El método de prueba establece los procedimientos para preparar y probar especímenes de concreto asfáltico con el propósito de medir el efecto del agua sobre la resistencia a la tracción indirecta. Este método de prueba es aplicable a las mezclas densas y se usa para evaluar el efecto

de la humedad en las mezclas elaboradas con o sin aditivo adhesivo (antistripping), incluidos líquidos y sólidos pulverulentos, tales como cal hidratada o cemento Portland.

Este procedimiento de prueba se puede usar para probar mezclas de concreto asfáltico junto con la mezcla de diseño, para determinar el potencial de daño por humedad, para determinar si un aditivo adhesivo es efectivo o no y para encontrar la cantidad óptima de aditivo para maximizar su efectividad. Este método de prueba puede ser usado también para evaluar mezclas producidas en planta con el propósito de calificar la efectividad de los aditivos bajo las condiciones impuestas en el campo (Instituto Nacional de Vías, 2013).

## DISEÑO METODOLÓGICO

Para el desarrollo de este trabajo se subdivide la metodología en cinco importantes áreas las cuales van permitiendo dar respuesta a la pregunta de investigación.

Caracterización del agregado pétreo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis granulométrico de suelos por tamizado</li> <li>• Densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregados gruesos</li> <li>• Densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregados finos</li> <li>• Densidad relativa (gravedad específica) de los suelos y del llenante mineral</li> <li>• Resistencia al desgaste de los agregados por medio de la máquina de los ángeles</li> <li>• Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato micro-deval</li> <li>• Sanidad de los agregados frente a la acción de sulfatos</li> <li>• Determinación de la limpieza superficial de las partículas de agregado grueso (contenido de impurezas)</li> <li>• Índice de plasticidad</li> <li>• Equivalente de arena de suelos y agregados finos</li> <li>• Proporción de partículas planas y alargadas</li> <li>• Determinación del contenido de vacío en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría)</li> <li>• Densidad bulk del llenante mineral en querosene</li> <li>• Vacíos del llenante seco compacto</li> </ul>
Verificación del cemento asfáltico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Certificado de calidad</li> </ul>
Diseño de mezcla	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall</li> <li>• Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente</li> </ul>
Ejecución del ensayo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas utilizando la prueba de tracción indirecta (TSR)</li> </ul>
Análisis de costos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comparación de costos de producción con los dos tipos de cemento asfáltico y el aditivo promotor de adherencia</li> </ul>

## ANÁLISIS Y RESULTADOS

### Caracterización del agregado pétreo

Se realizaron los ensayos correspondientes al agregado pétreo para garantizar que cumplan con los requisitos de los agregados para mezclas asfálticas de la tabla 450 – 2 del artículo 450 – 22 del Instituto Nacional de Vías (Instituto Nacional de Vías, 2022).

**Tabla 2**

*Resultados obtenidos de los ensayos a los agregados pétreos*

Característica	Norma de ensayo	Criterio de aceptación	Resultado
Desgaste en la máquina de los ángeles, máximo (%) (500 revoluciones)	INV E – 218	25	22
Desgaste en la máquina de los ángeles, máximo (%) (100 revoluciones)	INV E – 218	5	5
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	INV E – 238	20	18
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos	INV E – 224		
Valor en seco, mínimo (kN)		110	261
Relación húmedo/seco, mínima (%)		75	75,0
Coefficiente de pulimiento acelerado para rodadura, mínimo	INV E – 232	45	48,8
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, máximo (%)	INV E – 220	18	1
Impurezas en agregado grueso, máximo (%)	INV E – 237	0,5	0,42
Índice de plasticidad, máximo (%)	INV E – 125/126	NP	NP
Equivalente de arena, mínimo (%)	INV E – 133	50	52
Valor azul de metileno, máximo	INV E – 235	10	1,5
Partículas planas y alargadas relación 5:1	INV E – 240	10	2
Caras fracturadas, agregados gruesos, Una cara: mínimo %	INV E – 227	85	95,6
Caras fracturadas, agregados gruesos, Dos caras: mínimo %	INV E – 227	70	90,7
Angularidad de los agregados finos	INV E – 239	45	45,2
Densidad bulk (g/cm <sup>3</sup> )	INV E – 225	0,5 – 0,8	0,8

Vacíos del llenante seco compactado (%)

INVE – 229

≥38

47

Una vez obtenidos los resultados de caracterización de los agregados, se realizó la estabilización granular combinando los mismos, por peso, obteniéndose una gradación continua y densa con un 25% de triturado pasa 3/4" y 75% de arena triturada pasa 3/8".

**Tabla 3**

*Granulometría de la combinación de áridos para fórmula de trabajo*

TAMIZ		% PASA										
PULGADAS	mm	ESPECIFICACIÓN TABLA 450-6 MDC-19		GRADACIÓN ORIGINAL			% A UTILIZAR EN PESO			MATERIAL COMBINADO	FÓRMULA DE TRABAJO	
		LIMITE SUPERIOR	LIMITE INFERIOR	M1: TRITURADO PASA 3/4" COMBINADO	M2: ARENA TRITURADA PASA 3/8" AVENSA	M3: ARENA TRITURADA PASA 3/8" COINOBRAS	M1	M2	M3		SUPERIOR	INFERIOR
1"	25.00	100	100	100.0	100.0	100.0	25.0	37.5	37.5	100.0	100.0	100.0
3/4"	19.00	100	100	100.0	100.0	100.0	25.0	37.5	37.5	100.0	100.0	100.0
1/2"	12.50	95	80	50.2	100.0	97.2	12.5	37.5	36.5	86.5	90.5	82.5
3/8"	9.50	88	70	24.6	100.0	84.1	6.1	37.5	31.5	75.2	79.2	71.2
No 4	4.75	65	49	3.3	75.5	74.2	0.8	28.3	27.8	57.0	61.0	53.0
No 10	2.00	45	29	2.3	47.3	55.0	0.6	17.7	20.6	38.9	41.9	35.9
No 40	0.425	25	14	1.8	19.1	23.6	0.5	7.2	8.9	16.5	19.5	13.5
No 80	0.18	17	8	1.5	10.3	18.5	0.4	3.9	6.9	11.2	14.2	8.2
No 200	0.075	8	4	1.1	6.4	8.4	0.3	2.4	3.2	5.8	7.8	4.0

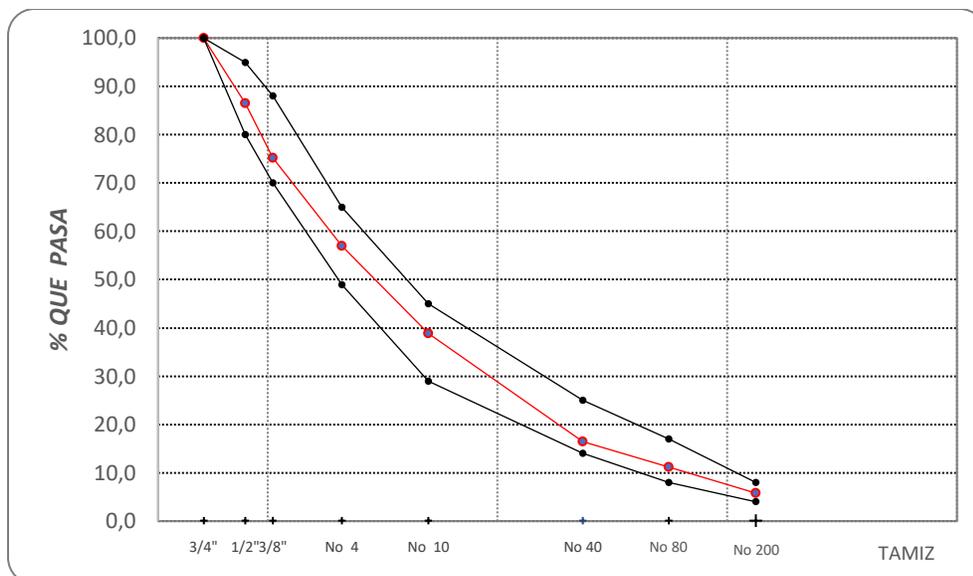


Figura 2 Comportamiento granulométrico mezcla tipo MDC-19

### Verificación del cemento asfáltico

El cemento asfáltico proveniente de Ecopetrol y de otra compañía que suministra el mismo, se recibe con sus respectivos certificados de calidad. Estos se verifican de acuerdo a las especificaciones del cemento asfáltico de la tabla 410 – 1 del artículo 410 – 22 del Instituto Nacional de Vías.

Tabla 4

Resultados reportados en el certificado de calidad del asfalto convencional

Característica	Norma de ensayo	Grado de penetración 60-70		Resultado
		Mín.	Máx.	
<b>Asfalto original</b>				
Penetración (25° C, 100 g, 5s) (0,1 mm)	INV E – 706	60	70	65
Punto de ablandamiento (°C)	INV E – 712	48	54	49.1
Índice de penetración	INV E – 724	-1.2	+0.6	-0.8
Viscosidad a 60 °C (P)	INV E – 716 o E	1500	-	2260
Viscosidad a 135 °C (P)	- 717 o NTC 5117:2017	4.0	-	No reportado

Ductilidad (25° C, 5 cm/min) (cm)	INV E – 270	100	-	140
Solubilidad en tricloroetileno (%)	INV E – 713	99	-	99.97
Contenido de agua (%)	INV E – 704	-	0.2	No reportado
Contenido de parafinas (%)	INV E – 718	-	3	No reportado
Punto de inflamación, mediante copa abierta de Cleveland (°C)	INV E – 709	230	-	294
<b>Asfalto residual, luego de la prueba de acondicionamiento en película delgada rotatoria</b>				
Cambio de masa por calentamiento (%)	INV E – 720	-	0.8	0.28
Penetración del residuo, en % de la penetración del asfalto original	INV E – 706	50	-	No reportado
Incremento en el punto de ablandamiento (°C)	INV E – 712	-	9	No reportado
Índice de envejecimiento: relación de viscosidades (60 °C) del asfalto residual y el asfalto original	INV E – 716 o 717 o NTC 5117:2017	-	4	No reportado

**Tabla 5**

*Resultados reportados en el certificado de calidad del asfalto normalizado*

Característica	Norma Invias	Criterio de aceptación		Resultado
		Mín.	Máx.	
<b>Asfalto original</b>				
Penetración (25° C, 100 g, 5s) (0,1 mm)	INV E – 706	60	70	62.9
Punto de ablandamiento (°C)	INV E – 712	48	54	48.5
Índice de penetración	INV E – 724	-1.2	+0.6	-1.0
Viscosidad a 60 °C (P)	INV E – 716 o E	1500	-	2160
Viscosidad a 135 °C (P)	- 717 o NTC 5117:2017	4.0	-	No reportado
Ductilidad (25° C, 5 cm/min), cm	INV E – 270	100	-	>100
Solubilidad en tricloroetileno (%)	INV E – 713	99	-	99.9
Contenido de agua (%)	INV E – 704	-	0.2	0,0
Contenido de parafinas (%)	INV E – 718	-	3	1.3
Punto de inflamación, mediante copa abierta de Cleveland (°C)	INV E – 709	230	-	297
<b>Asfalto residual, luego de la prueba de acondicionamiento en película delgada rotatoria</b>				
Pérdida de masa por calentamiento (%)	INV E – 720	-	0.8	-0.275
Penetración del residuo, en % de la penetración del asfalto original	INV E – 706	50	-	64.1
Incremento en el punto de ablandamiento (°C)	INV E – 712	-	9	8.4

Índice de envejecimiento: relación de viscosidades (60° C) del asfalto residual y el asfalto original	INV E – 716 o E – 717 o NTC 5117:2017	-	4	4.00
---	---	---	---	------

### Diseño de la mezcla

Se elaboraron quince especímenes, distribuidos en cinco grupos de tres briquetas cada uno, con incrementos de asfalto de 0.5%, desde 4.5% hasta 6.5%. A cada grupo se le adicionó un porcentaje de asfalto determinado, según método Marshall y criterios de especificación INVIAS 450 para tránsito NT3. Cada juego de briquetas fue confeccionado con asfalto 60/70 convencional.

La muestra de combinación de agregados fue preparada y calentada a 158 °C para mezclar los diferentes porcentajes de ligante a temperatura de mezcla entre 150 y 155 °C.

De las mezclas obtenidas para cada contenido de asfalto se realizaron los respectivos ensayos y se obtuvieron los resultados de densidad, vacíos, estabilidad y flujo, por cada porcentaje de asfalto. Los resultados han sido graficados en 7 curvas de diseño adjuntas para determinar el contenido óptimo de asfalto, que cumplan los parámetros establecidos y determine el nuevo valor de estabilidad que se acerque y refleje más los valores obtenidos de la producción de mezcla asfáltica.

Para seleccionar el contenido óptimo de asfalto, se tomaron como guías de diseño los criterios especificados en el artículo 450 – 22 del Instituto Nacional de Vías, para mezclas tipo MDC-19 y tránsito NT3, comparándolos con las 7 curvas de diseño obtenidas en el paso anterior y que se resumen en la tabla 6.

### Tabla 6

*Resumen de propiedades físicas de mezcla tipo MDC-19 con diferentes contenidos de asfalto*

<b>Contenido de asfalto</b>	<b>%</b>	<b>4,5</b>	<b>5,0</b>	<b>5,5</b>	<b>6,0</b>	<b>6,5</b>
Densidad aparente briqueta Dm	g/cm <sup>3</sup>	2.332	2.353	2.366	2.382	2.399
Densidad máx. medida (Rice)	g/cm <sup>3</sup>	2.498	2.478	2.456	2.440	2.422
Gmm						
Vacíos con aire Va	%	6.6%	5.0%	3.7%	2.4%	1.0%
Vacíos en los agr.	%	15.99	15.67	15.68	15.55	15.42
Minerales VAM						
Vacíos llenos de asfalto VFA	%	58.5	68.0	76.5	84.6	93.6
Estabilidad corregida Et (N)	N	19410	19764	20159	18855	18002
Flujo Ft (mm)	mm	3.2	3.2	3.5	3.7	4.2
Relación Estabilidad / Flujo	kN/mm	6.1	6.1	5.7	5.0	4.3

La fórmula de trabajo queda definida por los siguientes valores:

**Tabla 7**

*Fórmula de trabajo*

<b>Parámetro</b>		<b>Resultado</b>	<b>Min.</b>	<b>Máx.</b>
Contenido óptimo de asfalto	%	5.2	4.9%	5.5%
Vacíos con aire (Va)	%	4.6	4.0%	6.0%
Densidad aparente briqueta	g/cm <sup>3</sup>	2.357	Dato diseño	
Gs Máxima medida (Rice)	g/cm <sup>3</sup>	2.470	Dato diseño	
Estabilidad	N	19942	9000	
Flujo	mm	3.4	2.0	3.5
Vacíos en los agregados (VAM)	%	15.7	15%	
Vacíos llenos con asfalto (VFA)	%	70.9	65	75
Relación llenante/Ligante		1.1	0,8	1,2
Relación Estabilidad/Flujo		5.7	3.0	6.0

Es de notar que el diseño de la mezcla en el laboratorio se realiza bajo condiciones de humedad y temperaturas controladas, según las normas de ensayo INVIAS 2022, por tal motivo

esta fórmula puede sufrir modificaciones según los resultados estadísticos obtenidos de la producción.

La fórmula de trabajo establecida en el laboratorio se podrá ajustar con los resultados de las pruebas realizadas durante la fase de experimentación, igualmente, si durante la ejecución de las obras varían la procedencia o las características de alguno de los componentes de la mezcla o se rebasan las tolerancias granulométricas establecidas, se requerirá el estudio de una nueva fórmula de trabajo.

### **Ejecución del ensayo de tracción indirecta**

De este ensayo se busca obtener el porcentaje de resistencia conservada o resistencia retenida para cada una de las alternativas propuestas en el presente trabajo de investigación, para la realización de este ensayo se propone los siguientes sub grupos:

**Tabla 8**

*Distribución de briquetas para realización del ensayo*

Tipo de asfalto	Sin aditivo P.A.	Cantidad de briquetas			Total
		0.25% P.A.	0.50% P.A.	0.75% P.A.	
CA Refinería 60-70	8	8	8	8	32
CA Normalizado 60-70	8	8	8	8	32
<b>Total</b>	16	16	16	16	64

En total se elaboran sesenta y cuatro briquetas, treinta y dos por cada tipo de asfalto (refinería y normalizado) y de cada subgrupo, ocho por porcentaje de aditivo. Por ensayo se elaboran ocho briquetas, dos adicionales a las exigidas para descartar si no cumplen con los vacíos requeridos.

1. En primer lugar, partiendo de la fórmula de trabajo de diseño se procede a realizar el cuarteo del agregado de acuerdo con la norma INV E – 202 tomando los materiales del acopio y haciendo la combinación en el laboratorio. Se lleva a cabo la preparación del material que es necesario para preparar tres bachadas de mezcla suficiente, las dos primeras para elaborar por lo menos seis briquetas y la última para elaborar dos briquetas y para determinar la gravedad específica máxima medida.



*Figura 3* Dosificación del material

2. El cemento asfáltico se calienta en el horno a  $150 \pm 6^\circ \text{C}$  en un recipiente. Se agrega la cantidad requerida de aditivo y se mezcla inmediatamente durante unos 2 minutos. La dosificación de cemento asfáltico y aditivo necesario por briketa para una mezcla cuyo contenido óptimo de asfalto es 5.2%, es la siguiente:

$$\text{Peso de la mezcla} = 1200 \text{ g}$$

**Tabla 9***Cálculo de la cantidad de aditivo*

<b>5.2% CA</b>	<b>Sin aditivo P.A.</b>	<b>0.25% P.A.</b>	<b>0.50% P.A.</b>	<b>0.75% P.A.</b>
62.4 g CA	0 g	0.156 g	0.312 g	0.468 g

*Figura 4 Dosificación del aditivo*

*Figura 5* Dosificación del cemento asfáltico

3. Luego de tener la dosificación lista, se realiza la mezcla de los agregados pétreos y cemento asfáltico a una temperatura de 150°C.



*Figura 6* Mezclado del agregado y cemento asfáltico



*Figura 7* Vaciado de la mezcla en el molde

4. Se compactan a una temperatura que está entre los 135°C y a cada capa se le dan 35-47 golpes dependiendo del tipo de asfalto y cantidad de promotor. Previamente se han realizado pruebas para determinar el número de golpes de la compactación Marshall para alcanza un volumen de vacíos con aire de  $7 \pm 1\%$ .



*Figura 8* Compactación de briquetas

5. Mientras transcurren las 24 horas para extraer las briquetas de los moldes, se determina la gravedad específica máxima medida de la mezcla, de acuerdo con la norma INV E – 735.



*Figura 9* Determinación de gravedad específica máxima medida

**Tabla 10**

*Resultados de la gravedad específica máxima de la mezcla*

<b>Gmm</b>	<b>Sin aditivo P.A.</b>	<b>0,25% P.A.</b>	<b>0,50% P.A.</b>	<b>0,75% P.A.</b>
CA Refinería 60-70	2.470	2.488	2.486	2.485
CA Normalizado 60-70	2.489	2.491	2.501	2.497

6. Se dejan las briquetas en los moldes a una temperatura ambiente y se extraen de los moldes a las 24 horas siguientes.



*Figura 10* Extracción de briquetas



*Figura 11* Probetas compactadas

7. Se determina el diámetro y el espesor de cada briqueta.



Figura 12 Medición con pie de rey de la briqueta

**Tabla 11**

*Resultados de la medición de diámetro y altura*

	Grupo húmedo			Grupo seco		
<b>CA Refinería 60-70</b>						
<b>Sin aditivo P.A.</b>						
Muestra No	1	5	6	2	3	7
Diámetro (cm)	10.2	10.1	10.2	10.2	10.1	10.2
Espesor (cm)	6.7	6.7	6.7	6.7	6.6	6.7
<b>0.25% P.A.</b>						
Muestra No	1	3	7	5	6	8
Diámetro (cm)	10.2	10.2	10.2	10.2	10.1	10.2
Espesor (cm)	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6
<b>0.50% P.A.</b>						
Muestra No	2	3	5	6	7	8
Diámetro (cm)	10.2	10.1	10.1	10.1	10.2	10.1
Espesor (cm)	6.5	6.6	6.6	6.6	6.5	6.6
<b>0.75% P.A.</b>						
Muestra No	1	3	7	2	5	8
Diámetro (cm)	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2
Espesor (cm)	6.6	6.6	6.6	6.7	6.6	6.6
<b>CA Normalizado 60-70</b>						
<b>Sin aditivo P.A.</b>						
Muestra No	3	4	6	1	2	7
Diámetro (cm)	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2
Espesor (cm)	6.61	6.61	6.60	6.58	6.61	6.60
<b>0.25% P.A.</b>						

Muestra No	2	3	6	1	4	7
Diámetro (cm)	10.2	10.1	10.2	10.2	10.2	10.2
Espesor (cm)	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6
<b>0.50% P.A.</b>						
Muestra No	1	3	4	5	6	8
Diámetro (cm)	10.2	10.2	10.2	10.2	10.1	10.2
Espesor (cm)	6.6	6.5	6.6	6.6	6.6	6.6
<b>0.75% P.A.</b>						
Muestra No	2	3	6	5	7	8
Diámetro (cm)	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.1
Espesor (cm)	6.5	6.6	6.5	6.5	6.5	6.6

8. Se determina la gravedad específica bulk de los especímenes compactados de acuerdo con la norma INV E – 733, y se expresa el volumen de cada briqueta en centímetros cúbicos.

$$\text{Gravedad específica bulk} = \frac{A}{B - C}$$

Donde: A: Masa de la briqueta seca en el aire, g

B-C: Masa del volumen de agua correspondiente al volumen de la briqueta a 25° C

B: Masa en el aire de la briqueta saturada y superficialmente seca (SSS), g

C: Masa de la briqueta sumergida en agua, g



Figura 13 Determinación de la gravedad específica bulk

Tabla 12

*Cálculo de la gravedad específica bulk*

	Grupo húmedo			Grupo seco		
<b>CA Refinería 60-70</b>						
<b>Sin aditivo P.A.</b>						
Muestra No	1	5	6	2	3	7
Masa seca (g)	1199.0	1198.6	1197.4	1116.9	1198.0	1198.0
Masa SSS (g)	1203.0	1202.2	1201.2	1202.0	1202.2	1201.0
Masa en el agua (g)	676.6	677.8	678.2	676.2	678.2	676.0
Volumen (cm <sup>3</sup> )	526.4	524.4	523.0	525.8	524.0	525.0
Gravedad específica bulk (g/cm <sup>3</sup> )	2.278	2.286	2.289	2.276	2.286	2.282
<b>0.25% P.A.</b>						
Muestra No	1	3	7	5	6	8
Masa seca (g)	1199.8	1195.2	1198.0	1196.6	1196.8	1199.4
Masa SSS (g)	1202.4	1200.0	1203.4	1201.8	1200.4	1203.8
Masa en el agua (g)	679.0	679.6	679.8	679.4	677.4	681.4
Volumen (cm <sup>3</sup> )	523.4	520.4	523.6	522.4	523.0	522.4

Gravedad específica bulk (g/cm <sup>3</sup> )	2.292	2.297	2.288	2.291	2.288	2.296
<b>0.50% P.A.</b>						
Muestra No	2	3	5	6	7	8
Masa seca (g)	1198.2	1197.8	1197.2	1197.4	1198.4	1198.4
Masa SSS (g)	1201.4	1201.2	1199.6	1200.4	1201.8	1201.4
Masa en el agua (g)	683.6	680.2	677.8	677.4	680.6	681.0
Volumen (cm <sup>3</sup> )						
Gravedad específica bulk (g/cm <sup>3</sup> )	2.314	2.299	2.294	2.289	2.299	2.303
<b>0.75% P.A.</b>						
Muestra No	1	3	7	2	5	8
Masa seca (g)	1196.9	1197.2	1199.4	1199.4	1198.6	1196.4
Masa SSS (g)	1200.0	1200.0	1203.2	1202.8	1202.0	1200.6
Masa en el agua (g)	679.4	677.6	683.0	678.2	683.4	678.4
Volumen (cm <sup>3</sup> )	520.6	522.4	520.2	524.6	518.6	522.2
Gravedad específica bulk (g/cm <sup>3</sup> )	2.299	2.292	2.306	2.286	2.311	2.291
<b>CA Normalizado 60-70</b>						
<b>Sin aditivo P.A.</b>						
Muestra No	3	4	6	1	2	7
Masa seca (g)	1197.0	1197.6	1196.2	1197.4	1198.0	1196.8
Masa SSS (g)	1202.0	1201.6	1198.8	1200.2	1201.0	1200.4
Masa en el agua (g)	683.0	680.2	677.2	680.8	677.8	678.6
Volumen (cm <sup>3</sup> )	519.0	521.4	521.6	519.4	523.2	521.8
Gravedad específica bulk (g/cm <sup>3</sup> )	2.306	2.297	2.293	2.305	2.290	2.294
<b>0.25% P.A.</b>						
Muestra No	2	3	6	1	4	7
Masa seca (g)	1199.6	1198.2	1195.4	1198.0	1197.8	1197.0
Masa SSS (g)	1203.4	1201.6	1200.2	1202.6	1200.4	1201.6
Masa en el agua (g)	684.8	680.0	678.8	683.4	679.8	679.2
Volumen (cm <sup>3</sup> )	518.6	521.6	521.4	519.2	520.6	522.4
Gravedad específica bulk (g/cm <sup>3</sup> )	2.313	2.297	2.293	2.307	2.301	2.291
<b>0.50% P.A.</b>						
Muestra No	1	3	4	5	6	8
Masa seca (g)	1197.2	1195.2	1197.2	1196.6	1197.4	1198.0
Masa SSS (g)	1199.4	1197.6	1200.0	1198.4	1199.2	1201.0
Masa en el agua (g)	680.4	681.2	682.6	680.2	681.8	681.6
Volumen (cm <sup>3</sup> )	519.0	516.4	517.4	518.2	517.4	519.4
Gravedad específica bulk (g/cm <sup>3</sup> )	2.307	2.314	2.314	2.309	2.314	2.307
<b>0.75% P.A.</b>						
Muestra No	2	3	6	5	7	8

Masa seca (g)	1195.6	1196.0	1197.6	1197.4	1198.4	1196.0
Masa SSS (g)	1198.2	1198.8	1199.0	1200.0	1201.4	1197.4
Masa en el agua (g)	682.0	680.2	681.2	683.2	682.2	679.4
Volumen (cm <sup>3</sup> )	516.2	518.6	517.8	516.8	519.2	518.0
Gravedad específica bulk (g/cm <sup>3</sup> )	2.316	2.306	2.313	2.317	2.308	2.309

9. Se calcula el porcentaje de vacíos con aire respecto del volumen total (% V<sub>A</sub>) de cada briqueta, de acuerdo con la norma INV E – 736, y se expresa el volumen de aire en centímetros cúbicos (cm<sup>3</sup>). El volumen de vacíos con aire se calcula multiplicando el volumen total encontrado en el numeral 6.4.8 por el porcentaje de vacíos con aire y dividiendo por 100. Como se elaboraron ocho, se descartan dos cuyo resultado esté por fuera del rango requerido.

$$V_A = \left[ 1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right] \times 100$$

Donde: V<sub>A</sub>: Porcentaje de vacíos con aire en la mezcla compactada respecto del volumen de la briqueta:

G<sub>mm</sub>: Gravedad específica máxima

G<sub>mb</sub>: Gravedad específica bulk de la briqueta compactada

**Tabla 13**

*Cálculo del volumen de vacíos*

	Grupo húmedo			Grupo seco		
<b>CA Refinería 60-70</b>						
<b>Sin aditivo P.A.</b>						
Muestra No	1	5	6	2	3	7
% V <sub>A</sub>	7.8	7.5	7.3	7.8	7.4	7.6
Volumen de vacíos con aire	41.0	39.1	38.2	41.2	39.0	40.0
<b>0.25% P.A.</b>						
Muestra No	1	3	7	5	6	8

% V <sub>A</sub>	7.9	7.7	8.0	7.9	8.0	7.7
Volumen de vacíos con aire	41.2	40.0	42.1	41.5	42.0	40.3
<b>0.50% P.A.</b>						
Muestra No	2	3	5	6	7	8
% V <sub>A</sub>	6.9	7.5	7.7	7.9	7.5	7.4
Volumen de vacíos con aire	35.8	39.2	40.2	41.3	39.1	38.3
<b>0.75% P.A.</b>						
Muestra No	1	3	7	2	5	8
% V <sub>A</sub>	7.5	7.8	7.2	8.0	7.0	7.8
Volumen de vacíos con aire	39.0	40.6	37.5	41.9	36.3	40.8
<b>CA Normalizado 60-70</b>						
<b>Sin aditivo P.A.</b>						
Muestra No	3	4	6	1	2	7
% V <sub>A</sub>	7.3	7.7	7.9	7.4	8.0	7.9
Volumen de vacíos con aire	38.1	40.2	41.0	38.3	41.9	41.0
<b>0.25% P.A.</b>						
Muestra No	2	3	6	1	4	7
% V <sub>A</sub>	7.1	7.8	8.0	7.1	7.6	8.0
Volumen de vacíos con aire	37.0	40.6	41.5	38.3	39.7	41.9
<b>0.50% P.A.</b>						
Muestra No	1	3	4	5	6	8
% V <sub>A</sub>	7.8	7.5	7.5	7.7	7.5	7.8
Volumen de vacíos con aire	40.3	38.5	38.7	39.8	38.6	40.4
<b>0.75% P.A.</b>						
Muestra No	2	3	6	5	7	8
% V <sub>A</sub>	7.2	7.6	7.4	7.2	7.6	7.5
Volumen de vacíos con aire	37.4	39.6	38.2	37.3	39.3	39.0

10. Las briquetas que se elaboran para cada prueba, se dividen en dos subgrupos, de tal forma que el promedio de los vacíos con aire en los dos sea aproximadamente igual.

11. Se procede a realizar el ensayo al subgrupo seco:

11.1 Se ajusta la temperatura del subgrupo conservado en seco, colocando las briquetas en un baño de agua a  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  durante 20 minutos.



*Figura 14* Acondicionamiento de las briquetas en seco

11.2 Se determina la resistencia a la tensión del subgrupo seco colocando una probeta en el aparato de carga, con las franjas de carga centrada y paralela sobre el plano diametral. Se aplica una carga diametral a una deformación de  $50 \text{ mm/min}$  ( $2''/\text{min}$ ) hasta que alcance la carga máxima y se registra dicha carga.



Figura 15 Briqueta sometida a ensayo de tracción indirecta

**Tabla 14**

*Resultado de la carga máxima grupo seco*

	Grupo húmedo			Grupo seco		
<b>CA Refinería 60-70</b>						
<b>Sin aditivo P.A.</b>						
Muestra No	1	5	6	2	3	7
Carga (Kg)				805.9	881.8	818.3
Carga (N)				7902.7	8646.9	8024.2
<b>0.25% P.A.</b>						
Muestra No	1	3	7	5	6	8
Carga (Kg)				996.7	1000.0	988.0
Carga (N)				9773.6	9806.0	9688.3
<b>0.50% P.A.</b>						
Muestra No	2	3	5	6	7	8
Carga (Kg)				991.2	890.7	957.9
Carga (N)				9719.7	8734.2	9393.2
<b>0.75% P.A.</b>						
Muestra No	1	3	7	2	5	8
Carga (Kg)				1000.2	867.4	912.6
Carga (N)				9808.0	8505.7	8949.0
<b>CA Normalizado 60-70</b>						
<b>Sin aditivo P.A.</b>						
Muestra No	3	4	6	1	2	7
Carga (Kg)				990.3	995.9	1019

Carga (N)				9710.9	9765.8	9992.3
<b>0.25% P.A.</b>						
Muestra No	2	3	6	1	4	7
Carga (Kg)				1068	1124	1083
Carga (N)				10473	11022	10620
<b>0.50% P.A.</b>						
Muestra No	1	3	4	5	6	8
Carga (Kg)				1073	1121	1127
Carga (N)				10522	10993	11051
<b>0.75% P.A.</b>						
Muestra No	2	3	6	5	7	8
Carga (Kg)				1072	1035	1133
Carga (N)				10512	10149	11110

11.3 Por último, se desmonta el aparato de ensayo y se abre el espécimen estimando visualmente el comportamiento del agregado con el bitumen.

12. Utilizando una cámara de vacío, se satura parcialmente con agua destilada a temperatura ambiente el subgrupo que va a ser probado húmedo.

7.4.12.1 Se satura parcialmente al grado entre 50% y 80%, aplicando un vacío parcial de 525 mm Hg (20'' Hg) o 70 kPa, durante un tiempo corto.



*Figura 16 Saturación de la briqueta*

12.2 Se determina el volumen de la briqueta parcialmente saturado, de acuerdo con la norma INV E – 733. Se determina el volumen de agua absorbida ( $V_{wa}$ ), restando la masa seca en el aire del espécimen, determinada en el numeral 6.4.8, de la masa de la briqueta saturada y superficialmente seca.

$$V_{wa} = \text{Masa SSS} - \text{Masa seca en el aire}$$

**Tabla 15**

*Cálculo del volumen de agua absorbida*

<b>Grupo húmedo</b>			
<b>CA Refinería 60-70</b>			
<b>Sin aditivo P.A.</b>			
Muestra No	1	5	6
Masa SSS (g)	1229.4	1226.8	1224.8
Masa en el agua (g)	701.0	700.6	700.8

Volumen (cm <sup>3</sup> )	528.4	526.2	524.0
V <sub>wa</sub> (cm <sup>3</sup> )	30.4	28.2	27.4
<b>0.25% P.A.</b>			
Muestra No	1	3	7
Masa SSS (g)	1229.4	1224.2	1227.8
Masa en el agua (g)	704.6	701.4	702.2
Volumen (cm <sup>3</sup> )	524.8	522.8	525.6
V <sub>wa</sub> (cm <sup>3</sup> )	29.6	29.0	29.8
<b>0.50% P.A.</b>			
Muestra No	2	3	5
Masa SSS (g)	1223.0	1225.4	1225.4
Masa en el agua (g)	703.2	703.6	701.2
Volumen (cm <sup>3</sup> )	519.8	521.8	701.2
V <sub>wa</sub> (cm <sup>3</sup> )	24.8	27.6	28.2
<b>0.75% P.A.</b>			
Muestra No	1	3	7
Masa SSS (g)	1225.2	1225.7	1227.4
Masa en el agua (g)	703.0	702.6	705.2
Volumen (cm <sup>3</sup> )	522.2	523.1	522.2
V <sub>wa</sub> (cm <sup>3</sup> )	28.3	28.5	28.2
<b>CA Normalizado 60-70</b>			
<b>Sin aditivo P.A.</b>			
Muestra No	3	4	6
Masa SSS (g)	1223.8	1226.0	1225.8
Masa en el agua (g)	702.2	702.0	702.8
Volumen (cm <sup>3</sup> )	521.6	524.0	523.0
V <sub>wa</sub> (cm <sup>3</sup> )	26.8	28.4	29.6
<b>0.25% P.A.</b>			
Muestra No	2	3	6
Masa SSS (g)	1225.0	1225.8	1225.0
Masa en el agua (g)	704.1	702.4	701.4
Volumen (cm <sup>3</sup> )	520.9	523.4	523.6
V <sub>wa</sub> (cm <sup>3</sup> )	25.4	27.6	29.6
<b>0.50% P.A.</b>			
Muestra No	1	3	5
Masa SSS (g)	1225.8	1223.2	1224.8
Masa en el agua (g)	704.2	705.2	705.8
Volumen (cm <sup>3</sup> )	521.6	517.8	519.2
V <sub>wa</sub> (cm <sup>3</sup> )	28.6	27.8	27.6
<b>0.75% P.A.</b>			
Muestra No	2	3	6
Masa SSS (g)	1222.6	1224.0	1224.2
Masa en el agua (g)	704.2	703.4	705.6
Volumen (cm <sup>3</sup> )	518.4	520.6	518.6
V <sub>wa</sub> (cm <sup>3</sup> )	27.0	28.0	26.6

12.3 Se calcula el grado de saturación, dividiendo el volumen del agua absorbida en el numeral 12.2, por el volumen de vacíos con aire de la briqueta encontrado en el numeral 4.9. El resultado se expresa en porcentaje.

$$\% \text{ saturación} = \frac{V_{wa}}{V_A} \times 100$$

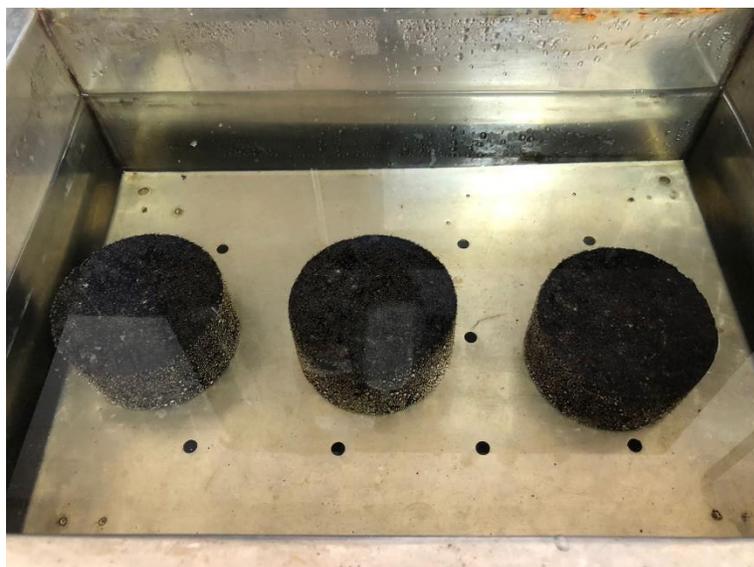
**Tabla 16**

*Cálculo del grado de saturación*

<b>Grupo húmedo</b>			
<b>CA Refinería 60-70</b>			
<b>Sin aditivo P.A.</b>			
Muestra No	1	5	6
% Saturación	74.2	72.1	71.7
% Absorción	0.4	0.3	0.2
<b>0.25% P.A.</b>			
Muestra No	1	3	7
% Saturación	71.9	72.5	70.8
% Absorción	0.3	0.5	0.4
<b>0.50% P.A.</b>			
Muestra No	2	3	5
% Saturación	69.2	70.4	70.1
% Absorción	0.4	0.2	0.5
<b>0.75% P.A.</b>			
Muestra No	1	3	7
% Saturación	72.7	70.1	74.6
% Absorción	0.3	0.1	0.4
<b>CA Normalizado 60-70</b>			
<b>Sin aditivo P.A.</b>			
Muestra No	3	4	6
% Saturación	70.4	70.6	72.2
% Absorción	0.5	0.5	0.3
<b>0.25% P.A.</b>			
Muestra No	2	3	6
% Saturación	80.8	78.3	80.5
% Absorción	0.0	0.0	0.1

<b>0.50% P.A.</b>			
Muestra No	1	3	5
% Saturación	70.9	72.2	71.3
% Absorción	0.5	0.3	0.3
<b>0.75% P.A.</b>			
Muestra No	2	3	6
% Saturación	72.2	70.7	69.7
% Absorción	0.4	0.4	0.2

12.4 Después de verificar la saturación, se acondicionan las briquetas parcialmente saturadas, sumergiéndolos en un baño de agua destilada a  $60 \pm 1.0^\circ\text{C}$  durante 24 Horas.



*Figura 17* Acondicionamiento de las probetas saturadas

12.5 Se ajusta la temperatura de las briquetas acondicionadas en condición húmeda, colocándolos en un baño de agua a  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  durante 1 hora.

12.6 Se mide la altura de los especímenes acondicionados en condición húmeda, y se determina su volumen por el método de la norma INV E - 733.

12.6.1 Se determinan la absorción de agua y el grado de saturación, de acuerdo a lo indicado en los numerales 6.4.12.2 y 6.4.12.3. Un grado de saturación que exceda el 80% es aceptable.

**Tabla 17**

*Cálculo del grado de saturación*

<b>Grupo húmedo</b>			
<b>CA Refinería 60-70</b>			
<b>Sin aditivo P.A.</b>			
Muestra No	1	5	6
Nuevo diámetro en cm	10	10	10
Nuevo espesor en cm	6.7	6.7	6.7
Masa SSS (g)	1234.4	1231.8	1229.2
Masa en el agua (g)	706.2	706.8	706.2
Volumen (cm <sup>3</sup> )	528.2	525.0	523.0
V <sub>wa</sub> (cm <sup>3</sup> )	35.4	33.2	31.8
% Saturación	86.4	84.8	83.2
% Absorción	0.3	0.1	0.0
<b>0.25% P.A.</b>			
Muestra No	1	3	7
Nuevo diámetro en cm	10.2	10.2	10.2
Nuevo espesor en cm	6.7	6.6	6.7
Masa SSS (g)	1233.0	1227.8	1230.8
Masa en el agua (g)	709.0	707.0	706.8
Volumen (cm <sup>3</sup> )	524.0	520.8	524.0
V <sub>wa</sub> (cm <sup>3</sup> )	33.2	32.6	32.8
% Saturación	80.7	81.5	77.9
% Absorción	0.1	0.1	0.1
<b>0.50% P.A.</b>			
Muestra No	2	3	5
Nuevo diámetro en cm	10.2	10.1	10.1
Nuevo espesor en cm	6.5	6.6	6.6
Masa SSS (g)	1227.4	1228.6	1227.1
Masa en el agua (g)	707.8	707.2	704.8
Volumen (cm <sup>3</sup> )	519.6	521.4	522.3

V <sub>wa</sub> (cm <sup>3</sup> )	29.2	30.8	29.9
% Saturación	81.5	78.6	74.3
% Absorción	0.3	0.1	0.1
<b>0.75% P.A.</b>			
Muestra No	1	3	7
Nuevo diámetro en cm	10.2	10.2	10.2
Nuevo espesor en cm	6.6	6.6	6.6
Masa SSS (g)	1227.2	1228.4	1230.4
Masa en el agua (g)	706.0	706.2	710.2
Volumen (cm <sup>3</sup> )	521.2	522.2	520.2
V <sub>wa</sub> (cm <sup>3</sup> )	30.3	31.2	31.0
% Saturación	77.8	76.8	82.6
% Absorción	0.1	0.0	0.0
<b>CA Normalizado</b>			
<b>60-70</b>			
<b>Sin aditivo P.A.</b>			
Muestra No	3	4	6
Nuevo diámetro en cm	10.2	10.2	10.2
Nuevo espesor en cm	6.61	6.61	6.60
Masa SSS (g)	1231.0	1229.8	1232.0
Masa en el agua (g)	710.0	706.6	707.7
Volumen (cm <sup>3</sup> )	521.0	523.2	524.3
V <sub>wa</sub> (cm <sup>3</sup> )	34.0	32.2	35.8
% Saturación	89.3	80.0	87.3
% Absorción	0.4	0.3	0.5
<b>0.25% P.A.</b>			
Muestra No	2	3	6
Nuevo diámetro en cm	10.2	10.1	10.2
Nuevo espesor en cm	6.57	6.63	6.59
Masa SSS (g)	1229.5	1230.0	1228.8
Masa en el agua (g)	710.8	708.2	706.8
Volumen (cm <sup>3</sup> )	518.7	521.8	522.0
V <sub>wa</sub> (cm <sup>3</sup> )	29.9	31.8	33.4
% Saturación	80.8	78.3	80.5
% Absorción	0.0	0.0	0.1
<b>0.50% P.A.</b>			
Muestra No	1	3	4
Nuevo diámetro en cm	10.2	10.2	10.2

Nuevo espesor en cm	6.6	6.6	6.6
Masa SSS (g)	1229.4	1226.8	1228.4
Masa en el agua (g)	708.0	709.0	710.7
Volumen (cm <sup>3</sup> )	521.4	517.8	517.7
V <sub>wa</sub> (cm <sup>3</sup> )	32.2	31.6	31.2
% Saturación	79.9	82.1	80.6
% Absorción	0.5	0.3	0.1
<b>0.75% P.A.</b>			
Muestra No	2	3	6
Nuevo diámetro en cm	10.2	10.2	10.2
Nuevo espesor en cm	6.5	6.6	6.5
Masa SSS (g)	1225.0	1227.8	1227.4
Masa en el agua (g)	709.0	709.2	709.2
Volumen (cm <sup>3</sup> )	516.0	518.6	518.2
V <sub>wa</sub> (cm <sup>3</sup> )	29.4	31.8	29.8
% Saturación	78.6	80.3	78.0
% Absorción	0.0	0.0	0.1

12.7 Se determina la resistencia a la tensión del subgrupo húmedo siguiendo el mismo procedimiento del subgrupo seco.



*Figura 18* Briqueta sometida a ensayo de tracción indirecta



*Figura 19* Briquetas falladas



Figura 20 Probetas falladas

Tabla 18

Resultado de la carga máxima grupo húmedo

	Grupo húmedo			Grupo seco		
<b>CA Refinería 60-70</b>						
<b>Sin aditivo P.A.</b>						
Muestra No	1	5	6	2	3	7
Carga (Kg)	527.8	489.1	412.8			
Carga (N)	5175.6	4796.1	4047.9			
<b>0.25% P.A.</b>						
Muestra No	1	3	7	5	6	8
Carga (Kg)	674.1	678	696.5			
Carga (N)	6610.2	6648.5	6829.9			
<b>0.50% P.A.</b>						
Muestra No	2	3	5	6	7	8
Carga (Kg)	713.8	768.4	783.0			
Carga (N)	6999.5	7534.9	7678.1			
<b>0.75% P.A.</b>						
Muestra No	1	3	7	2	5	8
Carga (Kg)	822.8	887.1	820.1			

Carga (N)	8068.4	8698.9	8041.9			
<b>CA Normalizado</b>						
<b>60-70</b>						
<b>Sin aditivo P.A.</b>						
Muestra No	3	4	6	1	2	7
Carga (Kg)	591.2	552.9	569.2			
Carga (N)	5797.3	5421.7	5581.6			
<b>0.25% P.A.</b>						
Muestra No	2	3	6	1	4	7
Carga (Kg)	794.5	761.6	650.6			
Carga (N)	7790.9	7468.2	6379.8			
<b>0.50% P.A.</b>						
Muestra No	1	3	4	5	6	8
Carga (Kg)	894.2	776.2	917.9			
Carga (N)	87868.5	7611.4	9000.9			
<b>0.75% P.A.</b>						
Muestra No	2	3	6	5	7	8
Carga (Kg)	964.5	951.1	1008.0			
Carga (N)	9457.9	9326.5	9884.4			

12.8 Se calcula la resistencia a la tensión ( $R_T$ ) como sigue:

$$R_T = \frac{2000 \times P}{\pi \times t \times D}$$

Donde:  $R_T$ : Resistencia a la tensión, kPa

P: Carga máxima, N

t: Altura de la probeta inmediatamente antes de la prueba, mm

D: Diámetro de la probeta, mm

Y se calcula la relación de resistencias a tensión, como sigue:

$$RRT = \left[ \frac{R_{TH}}{R_{TS}} \right] \times 100$$

Donde: RRT: Relación de resistencias a la tensión, %

$R_{TH}$ : Resistencia promedio a la tensión, del subgrupo acondicionado al agua

$R_{TS}$ : Resistencia promedio a la tensión, del subgrupo mantenido en seco

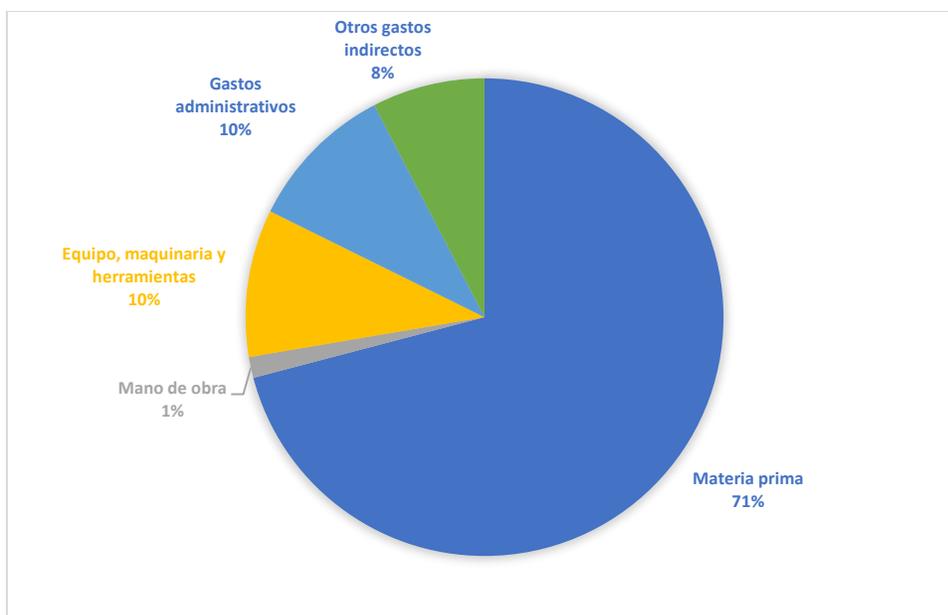
**Tabla 19***Cálculo de la resistencia a la tensión*

	Grupo húmedo			Grupo seco		
<b>CA Refinería 60-70</b>						
<b>Sin aditivo P.A.</b>						
Muestra No	1	5	6	2	3	7
Resistencia a tensión seca				754.8	833.8	770.3
Resistencia a tensión húmeda	495.1	461.3	388.8			
%RRT	65.6	55.3	50.5			
%RRT PROMEDIO		57.1				
<b>0.25% P.A.</b>						
Muestra No	1	3	7	5	6	8
Resistencia a tensión seca				943.9	950.3	935.2
Resistencia a tensión húmeda	639.0	644.7	657.3			
%RRT	67.7	67.8	70.3			
%RRT PROMEDIO		68.6				
<b>0.50% P.A.</b>						
Muestra No	2	3	5	6	7	8
Resistencia a tensión seca				944.3	858.2	912.6
Resistencia a tensión húmeda	683.2	738.7	747.4			
%RRT	72.4	86.1	81.9			
%RRT PROMEDIO		80.1				
<b>0.75% P.A.</b>						
Muestra No	1	3	7	2	5	8
Resistencia a tensión seca				942.4	825.2	864.7
Resistencia a tensión húmeda	786.7	844.8	778.2			
%RRT	83.5	102.4	90.0			
%RRT PROMEDIO		91.9				
<b>CA Normalizado</b>						
<b>60-70</b>						
<b>Sin aditivo P.A.</b>						
Muestra No	3	4	6	1	2	7
Resistencia a tensión seca				944.0	945.0	966.5
Resistencia a tensión húmeda	561.0	524.6	540.4			

%RRT	59.4	55.5	55.9			
%RRT PROMEDIO		57.0				
<b>0.25% P.A.</b>						
Muestra No	2	3	6			
Resistencia a tensión seca	1212.9	1069.3	1026.6			
Resistencia a tensión húmeda	757.7	721.2	618.0			
%RRT	74.8	67.4	60.2			
%RRT PROMEDIO		67.5				
<b>0.50% P.A.</b>						
Muestra No	1	3	4	5	6	8
Resistencia a tensión seca	1026.5	1076.6	1071.6			
Resistencia a tensión húmeda	844.8	741.5	870.2			
%RRT	82.3	68.9	81.2			
%RRT PROMEDIO		77.5				
<b>0.75% P.A.</b>						
Muestra No	2	3	6	5	7	8
Resistencia a tensión seca	1026.2	989.3	1086.6			
Resistencia a tensión húmeda	923.3	904.9	967.9			
%RRT	90.0	91.5	88.9			
%RRT PROMEDIO		90.1				

### Análisis de costos

De la evaluación financiera de la planta, para una producción de 1.040 metros cúbicos mensuales, se tiene que, el costo por metro cúbico de mezcla asfáltica está distribuido así:



*Figura 21* Costos por metro cúbico de mezcla asfáltica

- Los costos de materiales corresponden a los costos de la grava  $\frac{3}{4}$ '' , arena pasa  $\frac{3}{8}$ '' y cemento asfáltico de refinería 60/70.
- La mano de obra corresponde a la nómina y prestaciones del laboratorista.
- El equipo corresponde a la panta de asfalto, cargador que carga el material a las tolvas, equipo de laboratorio y herramienta menor.
- Los gastos administrativos corresponden a la nómina y prestaciones del personal administrativo y demás personal de la planta de producción.
- Los otros gastos indirectos corresponden a servicios, mantenimiento, impuestos, entre otros.

Los costos de mano de obra, equipo, gastos administrativos y otros gastos indirectos son fijos, pues el volumen de producción presupuestado de la evaluación financiera no cambia, por el contrario, se afectarán los costos de los materiales por el tipo de cemento asfáltico y la cantidad

de aditivo promotor de adherencia que se requiera por metro cúbico y, por consiguiente, la utilidad y el impuesto al valor agregado, pero este último no se tiene en cuenta.

Para el año 2022, el precio por tonelada puesto en planta de cemento asfáltico de refinería 60-70 es \$2,308,000 y \$2,456,200 para el cemento asfáltico normalizado 60-70. Además de estos costos, se utilizaron las cantidades que se muestran en la siguiente tabla para el análisis de costos:

**Tabla 20**

*Análisis de costos de mezcla asfáltica con cemento asfáltico de refinería 60-70 aditivado*

<b>Material</b>	<b>Sin aditivo P.A.</b>	<b>0.25% P.A.</b>	<b>0.50% P.A.</b>	<b>0.75% P.A.</b>
Aditivo promotor de adherencia				
Necesitado, Kg/m <sup>3</sup>	0.00	0.23	0.46	0.69
Precio, \$/Kg	\$17,720	\$17,720	\$17,720	\$17,720
Costo	\$0,00	\$4,102	\$8,204	\$12,307
Mezcla asfáltica				
Necesitado, t/m <sup>3</sup>		1.78		
Precio, \$/t		\$244,382		
Costo		\$435,000		
TOTAL MDC-19	\$435,000	\$439,102	\$443,204	\$447,307

**Tabla 21**

*Análisis de costos de mezcla asfáltica con cemento asfáltico normalizado 60-70 aditivado*

<b>Material</b>	<b>Sin aditivo P.A.</b>	<b>0.25% P.A.</b>	<b>0.50% P.A.</b>	<b>0.75% P.A.</b>
Aditivo promotor de adherencia				
Necesitado, Kg/m <sup>3</sup>	0,00	0,23	0,46	0,69

Precio, \$/Kg	\$17.720	\$17.720	\$17.720	\$17.720
Costo	\$0,00	\$4.102	\$8.204	\$12.307
Mezcla asfáltica				
Necesitado, t/m3		1,78		
Precio, \$/t		\$247.753		
Costo		\$441.000		
TOTAL MDC-19	\$441.000	\$445.102	\$449.204	\$453.307

---

## CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos, la mezcla densa en caliente con cemento asfáltico de refinería 60-70 aditivado al 0.50% y al 0.75% con promotor de adherencia cumple con el porcentaje mínimo de resistencia retenida exigido por el Instituto Nacional de Vías, mientras que con cemento asfáltico normalizado 60-70 solo cumple aditivándolo al 0.75%.

**Tabla 22**

*Resultados del cálculo de la resistencia a la tensión*

	%RRT PROMEDIO
<b>CA Refinería 60-70</b>	
Sin aditivo P.A.	57.1
0.25% P.A.	68.6
0.50% P.A.	80.1
0.75% P.A.	91.9
<b>CA Normalizado 60-70</b>	
Sin aditivo P.A.	57.0
0.25% P.A.	67.5
0.50% P.A.	77.5
0.75% P.A.	90.1

Los resultados de este estudio muestran que tanto el cemento asfáltico de refinería 60-70 como el cemento asfáltico normalizado tienen condiciones de adhesión (o valores de relación de resistencia a la tensión) similares con los agregados pétreos del río Chicamocha. Por lo tanto, los procesos de modificación realizados al cemento asfáltico normalizado no mejoran la resistencia de las mezclas asfálticas al daño por humedad.

Si no se aditiva la mezcla asfáltica con el contenido de promotor de adherencia resultante en este estudio, el agregado pétreo será susceptible a que el cemento asfáltico de refinería 60-70 sea desplazado de su superficie por acción del agua, por lo tanto, es necesario adicionar aditivo al

0.75% a la mezcla para que proporcione menor susceptibilidad al daño por humedad al ser combinado con el agregado pétreo del río Chicamocha.

El análisis de costos del proceso de producción de mezclas asfálticas permitió determinar que para la planta es menos costoso utilizar el asfalto de refinería, en comparación con el asfalto normalizado, puesto que aditivando la mezcla asfáltica con asfalto de refinería al 0.50% cumple con el requisito del artículo 450 – 22 del Instituto Nacional de Vías, mientras que con asfalto normalizado no cumple.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda obtener el porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla densa en caliente con cemento asfáltico normalizado 60-70, pues para el desarrollo del presente trabajo se utilizó la misma fórmula de trabajo para elaborar las briquetas con asfalto de refinería como con asfalto normalizado, y ya que la composición de los ambos cementos asfálticos es diferente, lo más probable es que la fórmula de trabajo cambie y se requiera otro diseño de mezcla. De igual forma, puede que el aditivo promotor de adherencia cambie algunas propiedades en la mezcla asfáltica, por lo que surge otro tema de investigación.

Según otras investigaciones, en términos de la resistencia al daño por humedad, el tipo de agregado empleado en la mezcla asfáltica posee un papel más relevante que el tipo de cemento asfáltico, por lo tanto, se recomienda hacer la investigación con agregados pétreos de otra fuente para verificar que tengan mayor adherencia con el asfalto proveniente de la refinería de Barrancabermeja, que es la fuente más cercana al área metropolitana de Bucaramanga.

Para completar el diseño de mezcla, queda por determinar el cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua hirviendo según la norma INV E – 757, la adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos por método Riedel Weber según la norma INV E – 774 y la resistencia a la deformación plástica según la norma INV E – 756.

## REFERENCIAS

[Asfalto 60-70]. (s.f). <https://www.multinsa.com/asfalto-60-70/>

[Asfalto 60-70 normalizado]. (s.f). <https://www.multinsa.com/asfalto-60-70-normalizado/>

Caro, S., y Alvarez, A. (2011, Marzo). Evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas empleando propiedades termodinámicas. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, núm 58, pp 95-104.  
<https://www.redalyc.org/pdf/430/43021467010.pdf>

Figuroa, A., y Reyes, F. (2015, Diciembre). Análisis de la susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla asfáltica a partir del ensayo MIST y del programa iPAS 2D. *Revista Infraestructura Vial*, número 30, pp 31-39.  
<https://www.scielo.sa.cr/pdf/infraestructura/v17n30/2215-3705-infraestructura-17-30-00031.pdf>

Instituto Nacional de Vías. (2013). *Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta* (INV E – 725 – 13).  
<https://www.invias.gov.co/index.php/normativa/documentos-tecnicos1>

Instituto Nacional de Vías. (2022). *Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua* (Artículo 450 – 22). <https://www.invias.gov.co/index.php/normativa/documentos-tecnicos1>

Instituto Nacional de Vías. (2022). *Suministro de cemento asfáltico*. (Artículo 410 – 22).  
<https://www.invias.gov.co/index.php/normativa/documentos-tecnicos1>

Rojas, F., García, H., Curco, A., y León, B. (2013, Diciembre). *Influencia de aditivos mejoradores de adherencia en la resistencia de hormigones asfálticos diseñados con agregados provenientes de las canteras de Pintag y Guayllabamba* (tesis de pregrado).

Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí.

<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/7607/1/AC-C-ESPE-047618.pdf>

Urrego, E., y Ruiz, C. (2016) *Determinación de la adherencia en mezclas asfálticas elaboradas con asfaltos convencionales y materiales de peña y río*. Universidad Católica de Colombia.

<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15108/1/DETERMINACION%20DE%20LA%20ADHERENCIA%20EN%20MEZCLAS%20ASFALTICAS%20ELABORADAS%20CON%20ASFALTOS%20CONVENCIONALES%20Y%20MATERIAL.pdf>