

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO MECÁNICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA
TIBIA MODIFICADA CON ESCORIA DE ALTO HORNO ESTABILIZADA CON
UN ADITIVO QUÍMICO**

**ING. JORGE ALBERTO ROMERO ROMERO
ING. WILLIAM VALENCIA CAMPO**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ D.C.
2019**

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO MECÁNICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA
TIBIA MODIFICADA CON ESCORIA DE ALTO HORNO ESTABILIZADA CON
UN ADITIVO QUÍMICO**

**ING. JORGE ALBERTO ROMERO ROMERO
ING. WILLIAM VALENCIA CAMPOS**

**DIRECTOR DEL PROYECTO
ING. HUGO ALEXANDER RONDÓN QUINTANA**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ D.C.
2019**

AGRADECIMIENTOS

Dedico de manera especial este logro a mi abuela Mercedes, quien en medio de las dificultades ha sido el faro que ha iluminado mi camino, siendo desde mis inicios la inspiración para afrontar cada reto que me he propuesto en la vida y quien sembró en mí la semilla de la responsabilidad, el deseo de superación, la confianza en mis capacidades y el amor al prójimo. Su gran corazón, su confianza y bondad son para mí un espejo en el que busco reflejarme cada día.

Doy gracias a mi familia por ser hoy un motivo más para seguir creciendo, a Erika, Luna y al Pequeño Dylan Martín, cuya llegada a este mundo hace crecer mis deseos de superación y poder ser su inspiración.

A mi mamá y a mi tía Gloria por todo su apoyo, confianza, respaldo y credibilidad en cada sueño que les comparto, a mis tíos, primos y demás familiares, por ser una inspiración para cada proyecto que emprendo.

A cada una de esas personas que en mi camino me han compartido su sabiduría y ofrecido los mejores consejos, enseñanzas y ejemplo para así fortalecer mi formación profesional.

A todos, mil gracias.

Jorge Romero Romero

Esta tesis la dedico a mi esposa Sonia, a mis hijos Santiago y Juan Camilo, por ser mi bastón, mi motor de vida, las personas que hacen que cada día sea mejor persona y que han sido mi mayor motivación para alcanzar las metas que me he propuesto en la vida, entre estas, la que hoy alcanzo con esta tesis, ya que, sin esa fuerza inspirada por ellos, muy difícilmente las hubiera logrado. Gracias por el amor que me brindan día a día, sin ustedes no estaría hoy acá.

Gracias mamá Hilda por haberme dado la vida y formado como profesional en la ingeniería. Te agradezco madre por todos tus sacrificios y tus traspasos por sacarnos adelante, a mí y a mis hermanos.

También a mis hermanos, Éiber, Carlos, Henry y Juan, porque en los momentos difíciles siempre he contado con ellos, con su amor de hermanos dándonos la mano. Y a mi abuela Gilma la matriarca de la familia, a ella que la amo con todo mi ser. A todos ustedes gracias por estar ahí, formando parte de mi familia. Y a mis compañeros de tesis y de post grado por que han sido el mejor complemento para haber alcanzado este logro.

Gracias a todos.

William Valencia Campo

CONTENIDO

	Pág.
1 TÍTULO DEL PROYECTO	7
1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 ANTECEDENTES.....	8
1.2 PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACION DEL PROBLEMA	9
1.3 SINTESIS	11
1.4 OBJETIVOS.....	12
2 MARCO TEÓRICO Y CONTEXTUAL.....	14
2.1 MEZCLA ASFÁLTICA.....	14
2.2 MEZCLA DENSA TIBIA	16
2.3 ESCORIA DE ALTO HORNO	16
2.4 ESTADO DEL ARTE.....	18
3 METODOLOGÍA.....	24
3.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	24
3.1.1 Agregados (agregado natural y escoria de alto horno)	24
3.1.2 Cemento asfaltico CA 60-70	28
3.1.3 Cemento asfáltico CA 60-70 modificado con HUSIL	32
3.1.4 Estabilización de la Escoria con Aditivo Químico	32

3.2	ENSAYOS A LA MEZCLA DE CONTROL O REFERENCIA.	33
3.3	EVALUACIÓN DE LA MEZCLA CON REEMPLAZO DEL MATERIAL PÉTREO POR ESCORIA CON Y SIN ESTABILIZAR.....	33
3.4	EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL ADITIVO HUSIL EN LAS MEZCLAS CON ESCORIA ESTABILIZADA Y SIN ESTABILIZAR.....	34
3.5	ANÁLISIS ESTADÍSTICO – ANOVA - DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.	34
3.6	EVALUACIÓN DE LAS MEZCLAS CON ESCORIA SIN ESTABILIZAR Y ESTABILIZADA POR MEDIO DEL ENSAYO CANTABRO DE PÉRDIDA POR DESGASTE.....	35
4	RESULTADOS Y ANALISIS	36
4.1	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	36
4.1.1	Agregados pétreos.....	36
4.1.2	Cemento asfáltico.....	37
4.2	ENSAYO MARSHALL MEZCLA ASFÁLTICA DE REFERENCIA O CONTROL.....	38
4.3	ENSAYO MARSHALL A MEZCLAS CON REEMPLAZO DEL MATERIAL PÉTREO POR ESCORIA DE ALTO HORNO CON Y SIN ESTABILIZAR.	40
4.4	EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL ADITIVO HUSIL EN LAS MEZCLAS CON ESCORIA ESTABILIZADA Y SIN ESTABILIZAR.....	42

4.4.1	Determinación de contenido de aditivo y temperatura de fabricación de la Mezcla Asfáltica Tibia WMA.....	43
4.4.2	Ensayo Marshall en mezclas asfálticas sin aditivo Husil.	43
4.4.3	Ensayo Marshall en mezclas asfálticas con aditivo Husil.....	45
4.4.4	Evaluación del empleo del aditivo Husil en la mezcla con reemplazo del material pétreo por escoria de alto horno sin estabilizar.	46
4.4.5	Evaluación del empleo del aditivo Husil en la mezcla con reemplazo del material pétreo por escoria de alto horno estabilizada.....	48
4.5	ANÁLISIS ESTADÍSTICO – ANOVA -.	49
4.6	ENSAYOS DE TRACCIÓN INDIRECTA.....	51
4.7	ENSAYO CANTABRO DE PÉRDIDA POR DESGASTE.....	52
5	CONCLUSIONES	54
6	BIBLIOGRAFÍA.....	56

1 TÍTULO DEL PROYECTO

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO MECÁNICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA
TIBIA MODIFICADA CON ESCORIA DE ALTO HORNO ESTABILIZADA CON UN
ADITIVO QUÍMICO

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Rondón, Zafra, Castro y Fernández (2015) publicaron un informe de investigación donde presentan los resultados obtenidos al evaluar el desempeño de una mezcla asfáltica tibia fabricada empleando un aditivo químico denominado HUSIL, el cual de acuerdo con los autores no ha sido utilizado a nivel comercial, ni es conocido por los productores de mezclas asfálticas. Dicho aditivo, disminuye la temperatura de fabricación de mezclas de concreto asfáltico tradicionales (MDC-10, MDC-19 y MDC-25 de acuerdo con el Instituto Nacional de Vías – INVIAS, 2013) en 30°C, mejorando adicionalmente su respuesta bajo carga monotónica y dinámica. MDC denota mezcla densa en caliente (concreto asfáltico). En dicho estudio, los agregados pétreos utilizados provinieron de fuentes de explotación natural. En el mundo a este tipo de mezclas se les denomina —Mezclas Asfálticas Tibias (WMA – Warm Mix Asphalt).

A diferencia del anterior estudio, un trabajo de grado de la Maestría en Infraestructura Vial de la Universidad Santo Tomás realizado por Ruiz (2018) evaluó el desempeño del aditivo HUSIL para la fabricación de una mezcla asfáltica tibia, empleando la granulometría de una MDC-25 y sustituyendo el agregado pétreo de origen natural por escoria de alto horno. El aditivo Husil actúa como una zeolita, espumando el asfalto durante el proceso de fabricación a aproximadamente 80° C.

Como hipótesis del estudio se debe mencionar, que la importancia del uso de un aditivo que emule el comportamiento de la Zeolita (aditivo HUSIL) y la escoria de alto horno radica principalmente en lograr mejorar o mantener las propiedades mecánicas que se obtienen en las mezclas asfálticas en caliente convencionales tipo MDC 19, mientras se reduce la temperatura de la mezcla a una tibia (al menos 20°C), constituyéndose en una alternativa ecológicamente viable como material para la conformación de capas asfálticas en pavimentos flexibles; lo que hace necesario experimentar el comportamiento de estos materiales en condiciones no exploradas en los estudios llevados a cabo con anterioridad.

En el presente estudio, a diferencia de los dos estudios mencionados con anterioridad, se llevó a cabo la estabilización química de las escorias de alto horno previo a la fabricación de la mezcla asfáltica tibia con el aditivo HUSIL. Lo anterior, debido a que las escorias de alto horno son materiales de alta porosidad y absorción, los cuales pueden ver debilitada su resistencia a la abrasión y al fracturamiento de partículas, al mismo tiempo que consumen mayor cantidad de asfalto. El objetivo es entonces, introducir dentro de los poros de las escorias, un aditivo químico que ocupe los vacíos con aire y que a su vez contribuya a mejorar su resistencia bajo carga mecánica. Así mismo, el aditivo escogido para el

presente estudio ha de reaccionar satisfactoriamente con el asfalto con el fin de mejorar propiedades como la cohesión y adherencia. Una vez estabilizadas las escorias, se reemplazó de manera proporcional la fracción gruesa del material pétreo natural por escoria de alto horno, y se varió la temperatura de fabricación empleando el aditivo HUSIL al 1% con respecto a la masa del asfalto (basados en los resultados reportados en Rondón et al. 2015, 2018). Como granulometría de referencia se empleó la de una mezcla MDC-19, ya que es la más utilizada en Colombia en la conformación de capas de rodadura. La respuesta mecánica de las mezclas se evaluó con base en la resistencia bajo carga monotónica (ensayos Marshall y tracción indirecta).

El estudio tiene un enfoque cuantitativo de tipo experimental, y de cohorte transversal, donde los ensayos realizados y el análisis de resultados se han elaborado siguiendo las especificaciones del INVIAS (2013), con una metodología que permitió obtener resultados confiables.

1.2 PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACION DEL PROBLEMA

Según cifras del Ministerio de Transporte - MINTRANSPORTE (2010), La red de carreteras del país, está constituida por aproximadamente 164 mil kilómetros, distribuida en 16.776 km de red primaria a cargo de la nación, de los cuales son 13.296 km a cargo del Instituto Nacional de Vías y 3.380 km concesionados; 147.500 km entre red secundaria y terciaria repartidos así: 72.761 km a cargo de los departamentos, 34.918 km a cargo de los municipios, 27.577 km del Instituto Nacional de Vías, y 12.251 km de los privados.

Po otra parte, el INVIAS resume el estado de la red vial a su cargo, clasificándola en vías pavimentadas y no pavimentadas. En la Tabla 1-1 se presenta el estado de la red vial nacional primaria a cargo del INVIAS a junio de 2014, donde se puede observar que gran parte de la malla vial primaria pavimentada y en afirmado a cargo del INVIAS se encuentra en mal y regular estado (44.19% y 82.15% respectivamente). A lo anterior se debe sumar que, del total de la red vial nacional a cargo del INVIAS, aproximadamente el 23.5% aún no ha sido pavimentado y, de acuerdo al MINTRANSPORTE (2008), la red secundaria y terciaria *“presenta un estado crítico y paulatinamente ha venido deteriorándose por la carencia de mantenimiento debido a los bajos recursos de que disponen los Departamentos y la Nación para inversión en infraestructura vía”*.

Tabla 1-1 Estado de la red vial nacional primaria.

Red Pavimentada					
ESTADO	MB	B	R	M	MM
Longitud [km]	1837,16	3020,66	2530,24	1253,04	63,97
Porcentaje [%]	21,1	34,7	29,07	14,39	0,73
Red Afirmada					
ESTADO	MB	B	R	M	MM
Longitud [km]	90,82	376,66	988,21	1003,43	159,74
Porcentaje [%]	3,47	14,38	37,73	38,32	6,10
Red Total					
ESTADO	MB	B	R	M	MM
Longitud [km]	1927,98	3397,32	3518,45	2256,47	223,71
Porcentaje [%]	13,03	30,00	31,07	19,93	1,98

MB: muy buena; B: buena; R: regular; M: mal; MM: muy mal.

Fuente: Instituto Nacional de Vías – INVIAS (2013).

En Colombia, gran parte de la red vial está compuesta por pavimentos flexibles, en razón a que estos permiten mayores deformaciones sin rotura, además de ser más económicos que otros pavimentos. Sin embargo, estos pavimentos presentan otros inconvenientes principalmente generados por las variaciones de temperatura, la erosión, las precipitaciones, las corrientes de agua, el creciente tráfico en las vías, y la capacidad portante del suelo que soporta la infraestructura vial, entre otros. A lo anterior hay que sumarle, de acuerdo a Torres y Noreña (2012), el actual incremento de la conciencia ambiental, el surgimiento de una regulación más estricta sobre las emisiones atmosféricas en los procesos de producción industriales, lo cual hace que cada vez ha sido mayor la preocupación de disminuir la energía que se emplea en los procesos de mezclado y puesta en sitio de las mezclas asfálticas en caliente, esto con el objeto de disminuir los gases de efecto invernadero que emiten los equipos utilizados dentro mencionados procesos.

Adicionalmente, Amézquita y Gantiva (2017), mencionan que adicional a esta problemática ambiental hay que considerar que Colombia en el año 2015 fue ubicado en el décimo lugar en productor mundial de agregados pétreos (gravas, gravillas, arenas y triturados), produciendo anualmente alrededor de 150 millones de toneladas, cifras que están por encima de la extracción de carbón registrada para el mismo año, la cual estuvo en el orden de 85 y 90 millones.

Además, la mezcla asfáltica es el principal componente estructural en un pavimento flexible, según Clavijo y Aranda, et al, pues con ella se construyen las

carpetas de rodadura, y por lo tanto, son las que se hallan directamente sometidas a las condiciones reales de carga y ambientales; es por esto que se han realizado diversas investigaciones en la búsqueda de mejorar las capacidades físico – mecánicas de las mezclas asfálticas; por lo que en el presente estudio, se generan insumos que nutren el conocimiento sobre las posibles modificaciones que se pueden realizar a las mezclas asfálticas, principalmente con el empleo de escorias de alto horno, lo que en resumen, busca generar soluciones en beneficio del medioambiente y mantener o mejorar las características mecánicas de la mezcla.

En el tema de mezclas asfálticas es conocido que la adición de algunos materiales produce modificaciones de sus propiedades mecánicas, químicas y reológicas, las cuales han sido estudiadas, especialmente por la comunidad académica y científica. Sin embargo, aún no se conoce un estudio que modifique una mezcla densa en caliente tipo MDC-19 reemplazando el material pétreo con escoria de alto horno previamente estabilizada con un aditivo químico que mejore su comportamiento bajo cargas mecánicas, además de agregar al cemento asfáltico un porcentaje de HUSIL, con el fin de disminuir la temperatura de mezclado y procurar mantener o mejorar las propiedades de la mezcla asfáltica resultante.

Además, reconociendo los resultados obtenidos en las diversas investigaciones que se han venido llevando a cabo desde la academia y principalmente en lo relacionado a las mezclas modificadas con residuos de la industria metalúrgica, es pertinente anunciar que con este estudio se da un paso importante en la tarea ampliar el rango de información orientada a identificar el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica modificada con escorias de alto horno estabilizadas químicamente, potencializando así el uso de uno de los residuos que se generan en la industria del acero y generándose una alternativa para la fabricación de una mezcla asfáltica modificada, que podrá emplearse en la intervención de las vías que faltan por construir en el país.

El presente estudio busca resolver el siguiente interrogante: ¿Cuál será el comportamiento mecánico bajo carga monotónica y la resistencia a la deformación permanente que experimentará una mezcla asfáltica densa en caliente MDC-19 cuando se varía la temperatura de mezclado empleando el aditivo HUSIL y reemplazando porcentualmente el material pétreo natural por escoria de alto horno estabilizada químicamente?

1.3 SINTESIS

En el presente estudio, a diferencia del reportado en los dos estudios relacionados anteriormente, se reemplazó parte del agregado pétreo natural (fracción gruesa) por escorias de alto horno (BFS – Blast Furnace Slag, provenientes de Acerías Paz del Río). Esto, intentando producir una mezcla asfáltica aún más amigable con

el medio ambiente. Se empleó como granulometría de referencia, la de una mezcla de concreto asfáltico tipo MDC-19 (utilizada ampliamente para la construcción de capas de carpeta asfáltica). Los materiales (Asfalto CA 60-70 y agregado pétreo) y el aditivo químico HUSIL fueron los mismos empleados en el estudio realizado en los dos estudios relacionados, el cual fue descrito con anterioridad. El presente estudio corresponde a fase continua a los estudios anteriores, en el cual se midió la resistencia bajo carga monotónica, y la composición volumétrica de la mezcla tibia fabricada a partir del reemplazo parcial de las fracciones gruesas del agregado pétreo natural por escoria de alto horno. Los ensayos ejecutados fueron el Marshall (INV. E-748-13), el de tracción indirecta (INV. E-725-13) y el ensayo cántabro (INV. E-760-13). Para el caso de la sustitución de la fracción gruesa del agregado natural por BFS, se llevó a cabo la sustitución del agregado por escoria de alto horno en los tamices de la fracción gruesa (1/2", 3/8" y No. 4). Como resumen se tiene que en este estudio se realizó la evaluación de la respuesta que experimentaron las mezclas al ser sometidas a cargas monotónicas y al daño por humedad al ser modificadas con escoria de alto horno estabilizada y sin estabilizar, y bajo el empleo del aditivo.

El presente documento en el segundo capítulo presenta de manera resumida un marco teórico con el ánimo de introducir al lector en la temática de estudio. En el tercer capítulo se presenta de manera clara la metodología empleada para la materialización de los objetivos propuestos para el presente trabajo de grado. En el capítulo 4 se realiza una descripción de los resultados de la fase experimental acompañados con su respectivo análisis. El capítulo 5 presenta las conclusiones del estudio, y, por último, se enuncian las referencias bibliográficas.

1.4 OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo de grado consistió en evaluar el comportamiento mecánico bajo carga monotónica que experimenta una mezcla asfáltica densa en caliente (MDC-19) cuando se varía la temperatura de fabricación, se sustituye el agregado pétreo por escoria de alto horno estabilizada químicamente y se adiciona Husil a la mezcla asfáltica. Como objetivos específicos se enuncian los siguientes:

- Evaluar la respuesta que experimentan las mezclas cuando se sustituye la fracción gruesa del agregado pétreo natural por escoria de alto horno con y sin estabilización química.
- Evaluar la influencia que tiene el aditivo químico sobre las escorias de alto horno. Asimismo, evaluar su influencia en la respuesta que experimenten las mezclas fabricadas con las escorias previamente estabilizadas.
- Medir la respuesta bajo carga monotónica y ensayo a tracción de las mezclas fabricadas empleando el aditivo HUSIL (con agregado natural, con escoria de

alto horno con y sin estabilización). Asimismo, determinar la reducción de la temperatura que se puede lograr en dichas mezclas cuando se emplea el aditivo químico.

- Comparar el desempeño mecánico de las mezclas asfálticas modificadas con Husil y las no modificadas con este aditivo, mediante el análisis de los ensayos de Estabilidad – Flujo y el análisis volumétrico (volúmenes y vacíos).
- Evaluar la resistencia a la disgregación de la mezcla, ante los efectos abrasivos y de succión entre la mezcla de control y las modificadas con BFS, mediante el ensayo Cántabro de pérdida por desgaste.
- Realizar un análisis estadístico ANOVA con el fin de identificar si los cambios en la propiedades son significativos como producto del uso de HUSIL, el aditivo químico estabilizador y la sustitución de agregado por escorias de alto horno.

2 MARCO TEÓRICO Y CONTEXTUAL

2.1 MEZCLA ASFÁLTICA

De acuerdo a Rodríguez et al, las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua de éste. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (Filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

Las mezclas asfálticas en caliente constituyen el tipo más generalizado de mezcla asfáltica y se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los agregados (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la temperatura ambiente.

La Tabla 2-1 permite observar las granulometrías típicas para mezclas densas en caliente, de acuerdo a las especificaciones del Instituto Nacional de Vías – INVIAS 2013.

Tabla 2-1. Granulometrías típicas para mezclas densas en caliente

TIPO DE MEZCLA	TAMIZ (mm / U.S. Standard)								
	25	19	12,5	9,5	4,75	2	0,425	0,18	0,075
	1"	3/4"	1/2"	3/8"	Nº 4	Nº 10	Nº 40	Nº 80	Nº 200
	% PASA								
MDC-25	100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
MDC-19		100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
MDC-10				100	65-87	43-67	16-29	9-19	5-10

Fuente: Instituto Nacional de Vías – INVIAS (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 450.2.1.

Las mezclas asfálticas Se emplean tanto en la construcción de carreteras, como de vías urbanas y aeropuertos, y se utilizan tanto para capas de rodadura como para capas inferiores de los firmes. Existen a su vez subtipos dentro de esta familia de mezclas con diferentes características. De acuerdo con Rondón y Reyes (2015), en Colombia estas mezclas son conocidas como MDC (mezclas densas en caliente), MSC (mezclas semi-densas en caliente), MGC (mezclas gruesas en caliente) y MAM (mezclas de alto módulo) (INVIAS, 2013, artículo 450-13). Se fabrican con asfaltos, aunque en ocasiones se recurre al empleo de asfaltos modificados, las proporciones pueden variar desde el 3% al 6% de asfalto en volumen de agregados pétreos.

Según Rondón y Reyes (2015), para el diseño de esta mezcla, cuando el tamaño máximo de partícula del agregado pétreo es inferior a 1", se realiza por medio del ensayo Marshall (AASHTO T 245, INV. E-748-13), teniendo en cuenta los criterios que se presentan en la Tabla 2-2 (INVIAS, 2013).

Tabla 2-2. Criterios para diseño de concreto asfáltico (ensayo Marshall) (INVIAS, 2013).

Características		Norma de ensayo INVIAS.	MDC, MSC, MGC			MAM
			NT1	NT2	NT3	
Compactación (golpes/cara)		E-748	50	75	75	75
Estabilidad mínima [N]		E-748	5000	7500	9000	15000
Flujo [mm]*		E-748	2-4	2-4	2-3.5	2-3
Estabilidad/Flujo [kN/mm]		E-748	2-4	3-5	3-6	-
Vacíos con aire (Va) [%]	Rodadura	E-736, 799	3-5	3-5	4-6	-
	Intermedia		4-8	4-8	4-7	4-6
	Base		-	5-8	5-8	4-6
Vacíos en los agregados (VAM) [%]	Mezclas 0	E-799	≥ 13	≥ 13	≥ 13	-
	Mezclas 1		≥ 14	≥ 14	≥ 14	≥ 14
	Mezclas 2		≥ 15	≥ 15	≥ 15	-
	Mezclas 3		≥ 16	≥ 16	≥ 16	-
Vacíos llenos de asfalto (VFA) [%] para rodadura e intermedia		E-799	65-80	65-78	65-75	63-75
Relación llenante/asfalto efectivo en peso		E-799	0,8-1,2			1,2-1,4
Concentración de llenante, valor máximo		E-745	Valor crítico			
Espesor promedio de película de asfalto, mínimo µm		E-741	7,5	7,5	7,5	7,5

*Mezclas asfálticas modificadas con polímeros podrán presentar un valor de flujo hasta de 5.0 mm siempre y cuando la relación estabilidad/flujo cumpla con los valores especificados.

Fuente: Instituto Nacional de Vías – INVIAS (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 450.2.1.

2.2 MEZCLA DENSA TIBIA

Torres (2012) plantea que las mezclas tibias se describen como aquellas que se producen a temperaturas menores que las mezclas en caliente, es decir entre 100°C y 135°C, su producción involucra nuevas tecnologías a partir de los cuales es posible producir y colocar los concretos asfálticos a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales.

Cualquiera sea el sistema empleado las condiciones que deben cumplir son: que no afecte adversamente al ligante asfáltico, y que permita obtener una mezcla asfáltica de similares o superiores propiedades que una convencional. Simultáneamente debe permitir un buen recubrimiento de partículas minerales por medio del asfalto a menores temperaturas que las convencionales.

De los documentos elaborados por Rondón y Reyes (2015) y Rondón et al. (2015), sobre mezclas asfálticas tibias, se puede establecer un resumen sobre las principales consideraciones a tener en cuenta en el estudio de mezclas asfálticas lo siguiente: De acuerdo con Bonaquist (2011) y Sterling (2012), la disminución mínima de la temperatura de fabricación de mezcla en la planta de asfaltos debe ser de 28°C para denominarse mezcla asfáltica tibia (WMA). La reducción de las temperaturas de mezclado y compactación traen consigo una disminución en la energía requerida para la elaboración de la mezcla y de las emisiones a la atmósfera (Bonaquist, 2011). De acuerdo con Gandhi (2008), Hearon y Diefenderfer (2008), las temperaturas de mezcla y compactación de WMA están entre 90-130°C y 100-135°C respectivamente. Investigadores como Goh y You (2008), Yan et al. (2010) mencionan que la temperatura de fabricación de mezclas WMA se encuentra en un rango entre 17 a 56°C y 30 a 50°C menor que aquella requerida para manufacturar mezclas asfálticas en caliente. Una observación similar es reportada por Silva et al. (2010) quien menciona que dicha disminución alcanza los 40°C. Según APAO (2003), Chowdhury y Button (2008) y You y Goh (2008), mezclas WMA generan menores emisiones contaminantes durante su proceso de fabricación y construcción en comparación con mezclas HMA, y el ahorro de energía es de aproximadamente 30%.

2.3 ESCORIA DE ALTO HORNO

Las escorias de alto horno (Blast Furnace Slag –BFS, por sus siglas en inglés) son desechos producto de la manufactura del acero en altos hornos, cuya composición la define la presencia de la Sílice, el óxido de Calcio, Magnesio y Aluminio. Dentro de los diversos tipos de escorias de alto horno se encuentran las que se enfrían lentamente al aire libre y las que son enfriadas de forma rápida tras el empleo de chorros de agua fría, teniéndose que las enfriadas al aire libre se vienen utilizando en la construcción como agregado pétreo mientras que las otras se emplean en la producción de cemento.

En la Tabla 2-3 se observa un resumen sobre la composición química de las escorias de alto horno.

Tabla 2-3. Compuestos químicos de la escoria de alto horno

Composición química de escorias de alto horno. Componente	Emery (1982)	Jones (1982)
CaO [%]	36-45	40
SiO ₂ [%]	33-42	36,8
Al ₂ O ₃ [%]	10-16	16
P [%]	-	-
MgO [%]	3-16	5,4
Na ₂ O [%]	-	-
S [%]	1-3	0,4
FeO [%]	0,3-0,2	0,2
Fe [%]	-	-
Fe ₂ O ₃ [%]	-	-
MnO [%]	0,2-1,5	0,5
TiO ₂ [%]	-	0,3
K ₂ O [%]	-	0,4

Fuente: Rondón y Reyes (2015)

Según Sánchez (2014), la producción de aceros en Colombia en el año 2012 se distribuyó así: Paz del Río, 350000 toneladas; Diaco, 480000 toneladas; Sidenal, 190000 toneladas; Acasa, 144000 toneladas y Sidoc, 102000 toneladas. Las cantidades mostradas anteriormente indican que la producción de escorias en el país es importante, por lo cual se ha estado indagando al respecto para darle un uso técnico y sostenible adecuado, teniendo en cuenta que la disposición de dichas escorias genera impactos ambientales sobre el suelo y las necesidades existentes de materiales seleccionados para la construcción de carreteras son altas.

Das (2007) y Shi (2004) establecen que las BFS contienen poco hierro, buena resistencia en contacto con ácidos, exhiben propiedades cementantes y composición química similar al clinker, lo cual las hace idóneas para su uso en la fabricación del cemento. Para el caso de mezclas asfálticas, el alto contenido de sílice es relacionado con dureza y resistencia mecánica (Muniandy et al. 2013), mientras que los óxidos de cal y aluminio ayudan a mejorar la compatibilidad y la adherencia entre el agregado y el asfalto (Pasandín and Pérez, 2015). Como ventajas de usar BFS en mezclas asfálticas se reportan: 1) son materiales con textura superficial rugosa y porosa que puede ayudar a mejorar la adherencia con el asfalto e incrementar la resistencia al deslizamiento (FHWA, 2008); 2) experimentan buena compatibilidad con el asfalto (Airey et al. 2004); 3) algunos estudios han reportado mejoras en la resistencia al daño por humedad, stripping y mayores estabilidades en el ensayo Marshall (FHWA, 2008); 4) menor peso

unitario. Por el contrario, como desventajas se han reportado (Airey et al., 2004; FHWA, 2008): 1) por ser agregados porosos, consumen más asfalto lo que incide en el costo; 2) generalmente son materiales de menor resistencia a la abrasión en comparación con agregados naturales convencionales; 3) mayores tiempos de secado durante la producción de mezclas en planta.

2.4 ESTADO DEL ARTE

En el plano internacional García (2010) adelantó una investigación con el fin de determinar, bajo las condiciones de agregados y asfalto ecuatorianos, la aplicabilidad de las mezclas asfálticas tibias que utilizan aditivos a base de ceras para reducir las temperaturas de mezcla y compactación; para ello aplicó en todas las briquetas realizadas el diseño de mezcla y los agregados de la Compañía Concreto y Prefabricados, usando tres mezclas (Asfalto Original compactado a 130°C, 2% Rediset compactado a 70°C y 2% Sasobit compactado a 110°C) y asfalto AC 20, considerando la medición de módulos a 20°C y 40°C, fallando 80 briquetas.

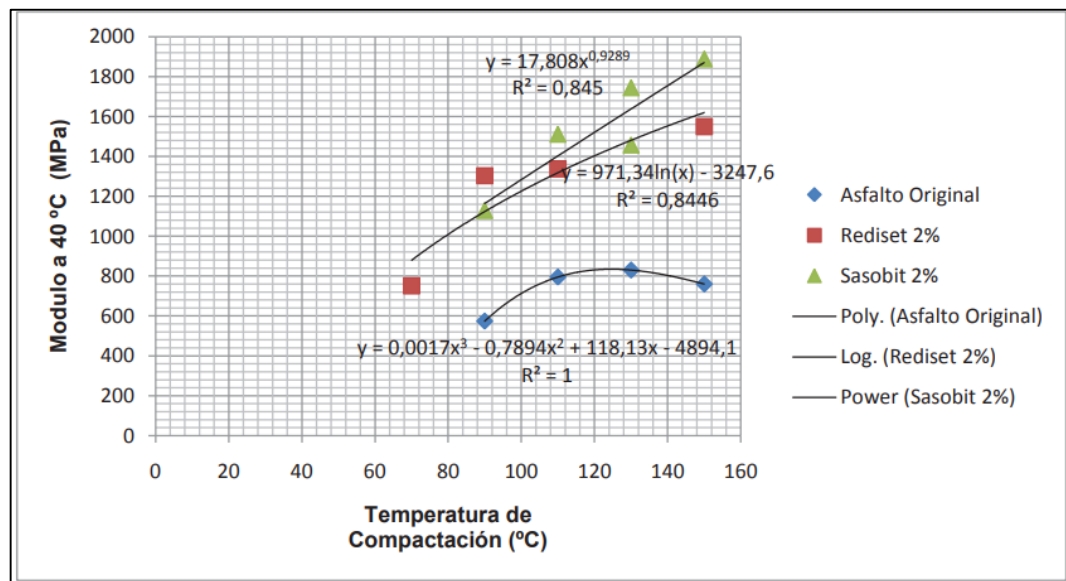


Figura 2-1. Módulo vs Temperatura de Compactación (García, 2010.)

Los resultados obtenidos le permitieron concluir que el asfalto ecuatoriano trabaja bien con aditivos de mezclas tibias y mecánicamente da buenos resultados, obteniendo mejor con el aditivo Rediset (ver Figura 2-1). Además, el uso del aditivo contribuye al ahorro de 160 galones de combustible para 40 toneladas de asfalto líquido.

Por su parte Bianchetto, Hacker y Fretes (2011), adelantaron estudios y ensayos de laboratorio con el objeto de diseñar una mezcla bituminosa en caliente con algunas propiedades genéricas singulares. Se trata de una SMA elaborada con fibras de celulosa aditivadas convenientemente a fin de disminuir la temperatura de mezclado y un ligante multigrado para permitir su utilización en regiones con gradientes térmicos pronunciados. De tal forma, es posible clasificar a esta mezcla como “SMA tibia multigrado”.

En este trabajo se expone la caracterización de los materiales componentes y los resultados volumétricos y mecánicos del producto final obtenido, realizándose además una serie de consideraciones acerca de las principales cualidades esperables en los pavimentos que se proyecten con esta tipología y de sus posibilidades de empleo: economía y sustentabilidad en la fabricación, incremento de la seguridad vial por elevada macrotextura superficial, vida útil prolongada y comportamiento optimizado en regiones con climas extremos debido a su menor susceptibilidad térmica.

Así mismo, Rodríguez (2004) realizó un estudio con el propósito principal de modificar el asfalto mediante el uso de aceite crudo de palma (ACP), para fabricar mezclas asfálticas tibias y establecer su desempeño en laboratorio y compararlas con las mezclas asfálticas en caliente. La mezcla utilizada corresponde a las denominadas mezclas de graduación densa, de tamaño máximo nominal del agregado de 1/2”.

El trabajo de laboratorio inició con la caracterización de los materiales a utilizar (asfalto, agregados), continuando con ensayos de caracterización para el asfalto modificado con diferentes porcentajes experimentales de Aceite Crudo de Palma, de esta manera seguir con los ensayos de viscosidad rotacional en el asfalto y el modificado con ACP.

A partir de lo anterior se eligió porcentajes que puedan ser los potenciales modificadores para la reducción de las temperaturas de producción de mezclas asfálticas de tal manera seguir con la realización del método Marshall, para las mezclas asfálticas en caliente (MAC) y mezclas asfálticas tibias (MAT) evaluando su comportamiento en cuanto a estabilidad y flujo Marshall. Se determinó a partir del análisis del comportamiento de la MAT, el porcentaje óptimo de ACP y el contenido de asfalto óptimo para fabricar mezclas tibias. Del análisis de los resultados se estableció que el ACP utilizado reduce la viscosidad del asfalto y por ende las temperaturas de mezcla y compactación, tal como puede verse en la Figura 2-2.

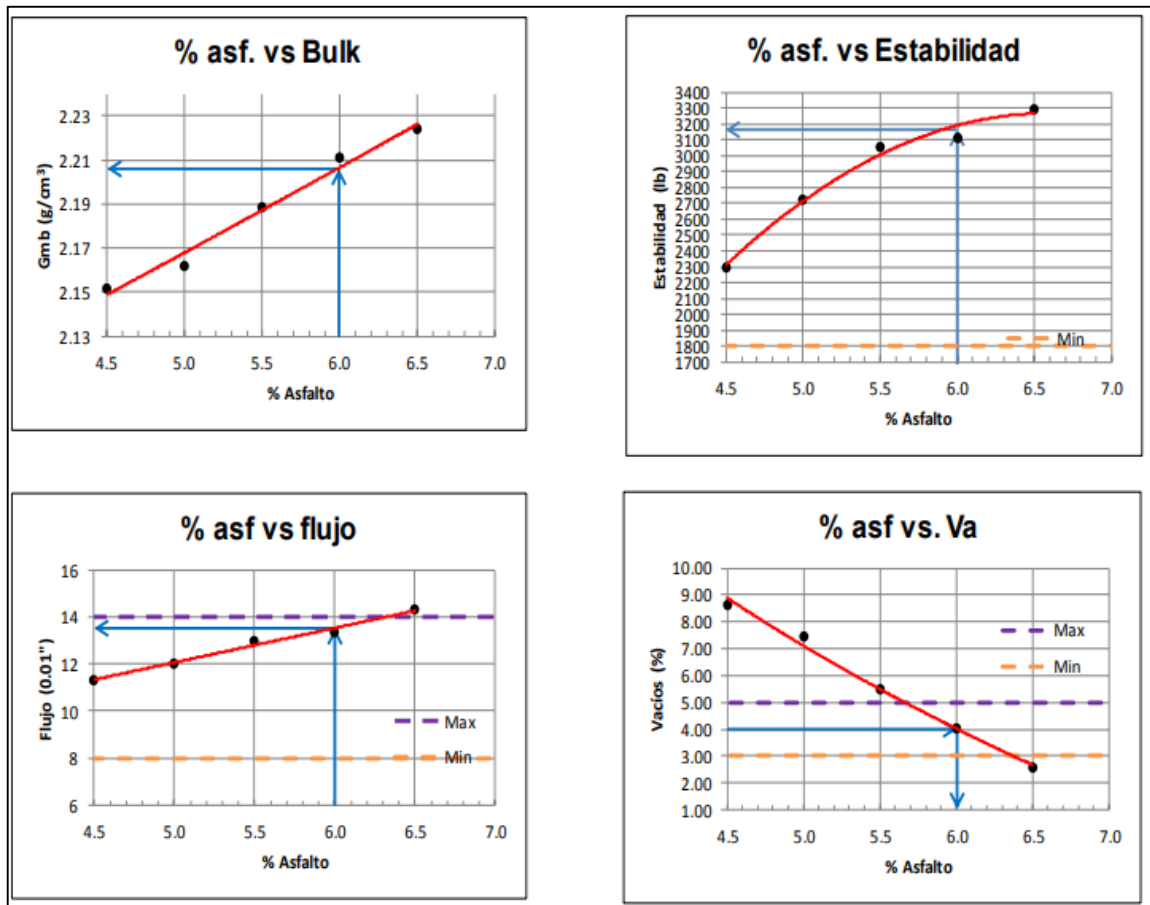


Figura 2-2. Curvas de diseño Marshall para MAT-1% (Rodríguez, 2004)

El desempeño estudiado en las mezclas asfálticas con asfalto modificado con ACP, son similares a las mezclas convencionales, estableciendo la viabilidad para su aplicación y uso.

De acuerdo al estudio realizado por Reza y Othman (2018), donde evaluaron la respuesta de las mezclas asfálticas tibias y pavimento asfáltico recuperado al emplear un aditivo sintético con el fin de disminuir las temperaturas de fabricación mejorando la manejabilidad durante este proceso. Los aditivos utilizados durante el estudio corresponden a productos comerciales y de uso en China, Malasia y otros países de medio oriente, las referencias utilizadas fueron RH-WMA y Evotherm®; donde RH-WMA corresponde a un aditivo a base de cera de polietileno, producido a partir de polietileno reticulado desarrollado por el Instituto de Investigación de la Carretera de China, Ministerio de Transporte y que está diseñado para reducir la viscosidad del asfalto a altas temperaturas, mientras que fortalece la estructura cristalina de asfalto a bajas temperaturas. Asimismo, Evotherm® hace parte una nueva generación de aditivos químicos para mezcla caliente de asfalto, el cual al ser agregado a la mezcla durante el proceso de

fabricación, por un lado permite que el asfalto recubra a los agregados con facilidad a temperaturas más bajas, y también lubrica las mezclas mejorando aún más, la trabajabilidad y la compactación.

De ese estudio se concluyó que, en la fabricación de las mezclas normales al disminuir su temperatura de fabricación, se evidencia la reducción de la trabajabilidad y aumento de la energía de compactación, situación que se invierte significativamente al emplear los aditivos, donde los resultados muestran que la energía de compactación se redujo sin afectar significativamente las características medidas mediante el ensayo Marshall como lo es la resistencia y los vacíos en la mezcla.

De otro lado, en el plano nacional, Suárez y Santos (2009) llevaron a cabo su trabajo de grado consiste en realizar una mezcla asfáltica usando una técnica para generar un asfalto duro con características de un asfalto (20/30), utilizando una porción óptima de un 20% en peso de asfáltica agregada al asfalto, ligante que se utiliza para mezclas asfálticas de alto modulo, la cual se preparó o combinó con otra técnica de fabricación en mezcla tibia, añadiendo a la sustancia bituminosa una porción óptima de zeolita para poder realizar el proceso de mezclado homogéneamente, adicionando un 50% en peso de los finos con zeolita, con el fin de reducir el impacto ambiental en la generación de humos y gases nocivos y un mejoramiento en el comportamiento mecánico de la mezcla elaborada.

Además de disminuir la temperatura y una mejor manejabilidad de la mezcla a una temperatura intermedia. Se elaboraron 18 probetas con tres diferentes temperaturas (120, 140, 160 °C), utilizando la granulometría de una mezcla asfáltica, de módulo alto (EME) a las cuales se les realizaron diferentes ensayos de laboratorio estandarizados por norma INVIAS Colombia para pavimentos, a excepción de modulo elástico bajo carga monotónica y CREEP sin confinar bajo una carga constante, los cuales fueron idealizados para efectos de la investigación.

Por su parte Ulloa y Ramírez (2006) realizaron una investigación cuyo objetivo principal fue establecer el comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica tibia, fabricada con asfalto modificado con ceras naturales. Las mezclas estudiadas tienen granulometrías MD-10 y MD-12 del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y fueron compactadas a las temperaturas de 110, 130 y 150 °C. Inicialmente se determinó la viscosidad del betún asfáltico modificado con cera de soya y carnauba, a diferentes porcentajes (1 al 5%), obteniendo así la influencia de este tipo de aditivos en la temperatura y la viscosidad (Ver Figura 2-3).

La primera parte del estudio consistió en establecer el porcentaje óptimo de cera a adicionar al asfalto en función de su viscosidad. Posteriormente fabricaron las mezclas con el óptimo de cera para determinar su comportamiento mecánico y

dinámico con los ensayos de RTI en estado seco y húmedo, así como el Módulo Resiliente.

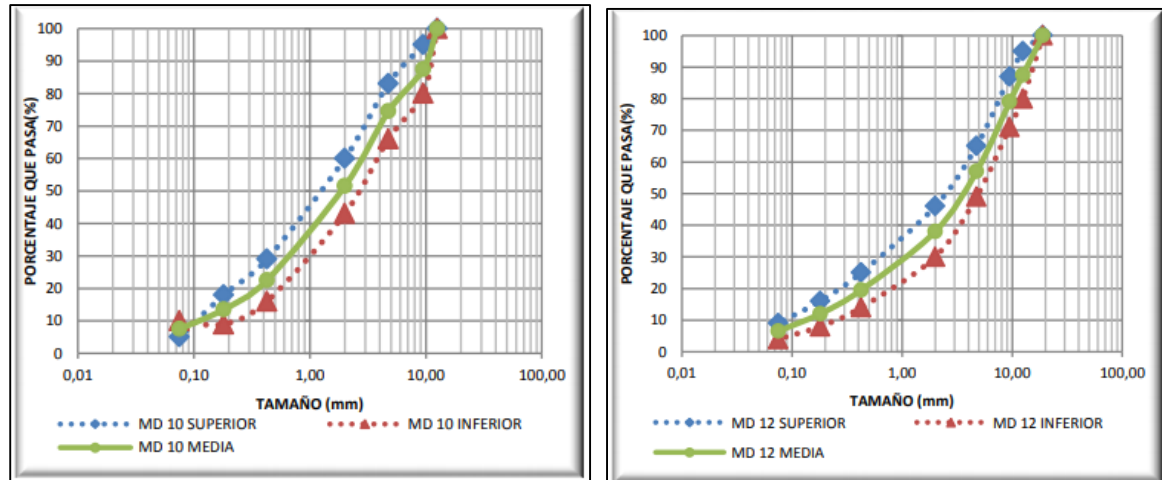


Figura 2-3. Curvas granulométricas, mezcla caliente MD10 (derecha) y MD12 (izquierda) del Instituto de Desarrollo Urbano. (Ulloa, C. M. y Ramírez, 2006)

De esta manera se seleccionó como porcentaje óptimo de adición de ceras del 2% para soya y de 5% para carnauba, de tal manera que no se comprometieran las características mecánicas del asfalto.

Recientemente Patiño (2017) se enfocó en evaluar la resistencia de una mezcla asfáltica (MDC-19, según INVIAS 2013), fabricada sustituyendo fracciones gruesa y fina de agregado pétreo natural, por escoria de alto horno. En el estudio fueron evaluadas las propiedades básicas correspondientes a caracterización de los materiales a usar, comportamiento y diseño Marshall (comportamiento baja carga monotónica), basados en las normas colombinas del Instituto Nacional de Vías 2013.

El estudio llevado a cabo evidenció, que el mejor comportamiento bajo carga monotónica, lo experimenta la mezcla asfáltica dónde fue reemplazada la fracción fina de agregado pétreo natural, por escoria de alto horno. Por otra parte, la respuesta de la mezcla asfáltica ante la sustitución de la fracción gruesa de la misma, genera aumento de vacíos en la mezcla, aumento en el contenido de cemento asfáltico y disminución en la resistencia mecánica.

Como complemento se tiene que en 2015 Rondón, Zafra, y Fernández et al, llevaron a cabo una investigación mediante la cual evaluaron la respuesta físico-mecánica y reológica que experimenta una mezcla asfáltica tibia desarrollada en laboratorio, empleando un aditivo líquido denominado HUSIL, en el estudio se realizó la caracterización dinámica de la mezcla asfáltica tibia desarrollada

mediante la modificación de un cemento asfáltico con HUSIL y se midió la resistencia al envejecimiento y al daño por humedad que experimenta la mezcla asfáltica desarrollada.

Como conclusiones del estudio se identificaron cambios significativos en las propiedades del asfalto modificado (incremento de la rigidez y mejoramiento del grado de funcionamiento del asfalto a temperaturas altas e intermedias de servicio), sumado a que la resistencia bajo carga monotónica de las mezclas asfálticas tibias fabricadas empleando el aditivo HUSIL en el ensayo de tracción indirecta es superior a la de referencia, así mismo el estudio evidenció que las mezclas tibias experimentan mayor resistencia al daño por humedad en comparación con las de referencia fabricadas a 150° C y mayor rigidez bajo carga cíclica y resistencia a la deformación permanente que las mezclas en caliente, adicional a eso el estudio también concluyó que la mezcla asfáltica tibia al ser fabricada a 30° C por debajo de la mezcla en caliente debe generar menor emisiones a la atmósfera y reducir el uso de combustibles en las plantas, lo que redundará en menor contaminación al medio ambiente.

De acuerdo con reportes del Banco Mundial en el año 2004, Colombia es uno de los países del mundo con mayor atraso en infraestructura vial. Entre las causas de la crisis vial se identifican entre otras: falta de recursos, desconocimiento del comportamiento de materiales, demoras excesivas en la terminación de contratos, topografía adversa, planeación equívoca, corrupción, falencias en la interventoría, deficiencia de materiales para construcción de pavimentos, continuo aumento de los límites legales de carga, inexistencia de apoyo por parte de la administración vial a la investigación y al desarrollo tecnológico.

3 METODOLOGÍA

El estudio desarrollado posee un enfoque cuantitativo y de tipo experimental, teniendo en cuenta que se llevaron a cabo ensayos a los materiales (agregados, pétreos y cemento asfáltico) y las mezclas asfálticas, que proporcionan información numérica la cual, al ser analizada e interpretada, permite identificar la mezcla que devela mejor comportamiento mecánico. Considerando los lineamientos establecidos en el artículo 450 del INVIAS (2013) para la elaboración de mezclas densas en caliente, el presente estudio desarrollará el proceso que se enuncia a continuación.

3.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

En esta etapa se caracterizaron los materiales (agregado pétreo, escoria de alto horno, cemento asfáltico convencional CA 60-70) que conforman las mezclas asfálticas analizadas en el presente documento, siguiendo los lineamientos especificados por el INVIAS (2013) en su artículo 400-13. Asimismo, considerando que se trabajó una mezcla densa en caliente (MDC-19) se hizo necesario ejecutar los siguientes controles en el laboratorio:

3.1.1 Agregados (agregado natural y escoria de alto horno)

Teniendo en cuenta que estos materiales se han venido estudiando y que corresponden a una serie de estudios que se vienen realizando, se llevaron a cabo los ensayos siguientes:

- *Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras (INV. E-230).* Este ensayo se emplea para estimar el porcentaje de partículas (entre 6.3 y 63 mm de diámetro) con formas alargadas y aplanadas de una muestra representativa del agregado grueso. La partícula se considera aplanada cuando tiene un espesor inferior a $\frac{3}{5}$ del espesor promedio de la muestra y las alargadas cuando tienen una longitud máxima superior a $\frac{9}{5}$ de la dimensión media de la muestra. Estas medidas de espesor y longitud se ejecutan empleando calibradores metálicos estandarizados (ver Figura 3-1). El procedimiento de ensayo es simple, para el caso del índice de aplanamiento, cada fracción de la muestra a medir se pesa y luego cada partícula de cada fracción se hace pasar por la abertura indicada en el calibrador de aplanamiento. Las partículas que pasen la abertura y aquellas que no lo hacen son separadas en recipientes diferentes para luego ser pesadas y por relación de masas se calcula el índice de partículas aplanadas. El procedimiento de cálculo de las

partículas alargadas es similar, sólo que en este caso cada partícula de cada fracción se mide en el calibrador de alargamiento.



Figura 3-1. Calibrador de partículas alargadas y aplanadas. Rondón y Reyes (2015).

- *Gravedad específica y absorción de agregados gruesos (INV. E-223).* Para el caso del agregado grueso, una muestra representativa de aproximadamente 5 kg previamente lavada se sumerge en agua limpia para saturarla durante un día. Una vez el material se encuentre saturado, se seca superficialmente con un trapo o paño y se pesa para obtener la masa superficialmente seca (mss). Luego el agregado se coloca nuevamente en una canastilla sumergida en agua a temperatura aproximada de 23 °C y se pesa para obtener la masa sumergida (ms). Por último, el material es retirado del agua y secado en un horno a 110°C durante 16 h para obtener la masa seca (md).
- *Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles (INV. E-218).* Este ensayo es empleado para medir la resistencia al desgaste por abrasión de la fracción gruesa del agregado pétreo. El ensayo consiste en introducir dentro del cilindro metálico de la máquina de Los Ángeles (Figura 3-2), una cantidad de material (seco y lavado) definida de acuerdo a la especificación según el tamaño máximo de la partícula de la mezcla a analizar. Para el presente estudio se emplearon 5 kg de agregado grueso cuyo tamaño máximo fue de 1". Dentro de la máquina, 12 esferas de acero (diámetro de 4.68 cm), cuya masa individual promedio es de 400 g, se mezclaron con el material. El cilindro metálico se hizo girar 500 veces y al final del ensayo se retiró el material pétreo de la máquina para luego ser lavado sobre el tamiz No. 12 del ensayo de granulometría por tamizado. El material retenido en este

tamiz fue secado en un horno a 110°C durante 16 a 24 horas y luego se pesó. La pérdida por desgaste por abrasión (% Desgaste) se calcula empleando la ecuación (3.1).

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \quad (3.1)$$

Donde P_1 y P_2 son la masa de la muestra seca antes y después del ensayo, respectivamente.



Figura 3-2. Máquina de Los Ángeles. Fuente: Rondón y Reyes (2015).

- *Determinación de la resistencia del agregado grueso al desgaste por abrasión utilizando el aparato Micro-Deval (INV. E-238).* Este ensayo permite medir la resistencia al desgaste por abrasión del agregado grueso. En el presente estudio se empleó una muestra de 1500 g de agregado grueso lavado y seco, que pasó el tamiz 1/2" y fue retenido en el tamiz 3/8". Esta muestra fue introducida dentro del cilindro metálico de la máquina Micro-Deval junto con 5 kg de esferas abrasivas normalizadas de 9.5 ± 0.5 mm de diámetro. El cilindro metálico se hizo girar 6000 veces y al final del ensayo se retiró el material pétreo de la máquina para luego ser lavado sobre el tamiz No. 16 del ensayo de granulometría por tamizado. El material retenido en este tamiz es secado en un horno a 110°C durante 16 a 24 horas y luego se pesa (ver Figura 3-3). La pérdida por desgaste por abrasión (% Desgaste) se calculó empleando la ecuación (3.2).

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (3.2)$$

Donde m_1 y m_2 son la masa de la muestra seca antes y después del ensayo, respectivamente.



Figura 3-3. Micro-Deval. Fuente: Rondón y Reyes (2015).

- Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (INV. E-227). Este ensayo empírico, visual y subjetivo sirve para evaluar el porcentaje de partículas de una muestra representativa del agregado grueso (partículas retenidas en el tamiz No. 4 y pasando el tamiz 3/8") que presenta caras fracturadas. Inicialmente la muestra seca y lavada se cuartea. La muestra a evaluar se pesa y luego se inspecciona visualmente cada partícula. Las partículas redondeadas y las fracturadas son colocadas en recipientes separados los cuales a su vez son pesados, y por diferencia de masas, se calcula el porcentaje que presenta caras fracturadas. El ensayo se puede ejecutar inspeccionando por un solo lado las partículas (una cara) o por ambos lados (dos caras).
- Pérdida en ensayo de solidez (INV. E-220-13). Ensayo que busca evaluar la resistencia del agregado pétreo a desintegrarse cuando, dentro de sus poros, el agua se expande por congelamiento. En teoría, es un ensayo que busca evaluar la resistencia del agregado pétreo al intemperismo. En el ensayo, una muestra del agregado pétreo se sumerge en sulfato de sodio o magnesio para luego ser secada en horno. En esta etapa del ensayo la sal dentro de los poros del agregado se deshidrata. En una etapa posterior se vuelve a sumergir la muestra, hidratándose nuevamente la sal dentro de los poros del agregado. La fuerza interna de expansión dentro de los poros que genera este proceso de rehidratación de la sal genera desintegración de la muestra.

- Equivalente de arena (INV. E-133). Ensayo utilizado para evaluar el contenido de partículas de tamaño de arcilla adheridas a una muestra de agregado pétreo fina (arena y limos). El exceso de partículas de tamaño de arcilla en una mezcla asfáltica es indeseable porque esta fracción empieza a reemplazar las partículas gruesas del agregado pétreo. Adicionalmente, el exceso de finos induce pérdida de adherencia con el asfalto y necesidad de incrementar el contenido de asfalto para aglomerarlo.
- Índice de plasticidad (INV. E-125, 126). Expresado como la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP) de un suelo. Los límites LP y LL de un suelo de tamaño de arcilla denotan el contenido de agua o humedad que se necesita adicionar a una muestra seca para que esta experimente plasticidad (pasar de un estado sólido a plástico) y para que comience a fluir como un líquido (pasar de un estado sólido a plástico) respectivamente. LP y LL son obtenidos empleando la cazuela de Casagrande y el método de los “rollitos” en el laboratorio. Si el IP es igual a cero, las partículas de tamaño de arcilla ensayadas adquieren la denominación de filler o llenante mineral y no experimentan plasticidad cuando se humedecen. Si, por el contrario, el IP adquiere una magnitud, significa que las partículas son arcillosas, y estas sí experimentan plasticidad al ser humedecidas. El IP también es utilizado como indicador de potencial de expansión de arcillas.

3.1.2 Cemento asfáltico CA 60-70

- *Penetración (25° C, 100 g, 5 s, INV. E-706)*. El ensayo de penetración se emplea para clasificar cementos asfálticos, así mismo también se puede usar para la estimación de la consistencia y rigidez. Este ensayo consiste en determinar la penetración en mm/10 que experimenta un cemento asfáltico a 25°C cuando se permite atravesar en él una aguja normalizada de 100 g durante 5 s (ver Figura 3-4).



Figura 3-4. Penetrómetro. Fuente: Rondón y Reyes (2015).

- *Punto de ablandamiento (INV. E-712).* Este parámetro se emplea para determinar la temperatura a la cual el cemento asfáltico pasa de un estado sólido a uno en el cual fluye como un líquido. Esta temperatura es muchas veces utilizada como indicador empírico de máxima temperatura de operación de las mezclas en servicio. Lo ideal es que la mezcla no experimente durante su vida útil en el pavimento dicha temperatura, ya que el ligante asfáltico, y por lo tanto la mezcla, experimentarían una gran disminución en su rigidez. Para su determinación se emplea el aparato del anillo y bola (R&B por sus siglas en inglés, ver Figura 3-5). En síntesis, el ensayo consiste en determinar la temperatura bajo la cual una esfera cilíndrica estándar atraviesa una lámina de asfalto colocada en un anillo especial del equipo.



Figura 3-5 Aparato de anillo y bola. Fuente Ruiz (2018)

- *Viscosidad (60°C, INV. E-716).* Ensayo empleado para medir la viscosidad del asfalto a diferentes temperaturas. También es utilizado para la determinación de las temperaturas de mezcla y compactación de concretos asfálticos. Para la determinación de la viscosidad se emplea el viscosímetro rotacional (ver Figura 3-6). Durante el ensayo, una muestra representativa de asfalto se coloca dentro de un recipiente termostáticamente controlado. Luego, un vástago cilíndrico aplica sobre la muestra un torque bajo velocidad constante de rotación. La magnitud del torque luego es traducida a unidades de viscosidad.



Figura 3-6 Viscosímetro rotacional. Fuente Ruiz (2018)

- *Ductilidad (25°C, 5cm/min) (INV. E-702).* Esta es una medida del límite al cual puede ser estirada una muestra de asfalto antes de que se rompa. El asfalto debe ser lo suficientemente dúctil para permitir dentro de la mezcla deformaciones importantes sin llegar a la falla. Para realizar el ensayo se emplea un Ductilímetro (ver Figura 3-7). La muestra luego es estirada hasta que ella rompa, midiendo en ese instante la longitud de estiramiento.



Figura 3-7 Ductilímetro. Fuente Ruiz (2018)

- *Punto de ignición (INV. E-709).* es la temperatura a la cual inflama el CA y se mide en un equipo denominado copa abierta de Cleveland (ver Figura 3-8). Entre mayor sea el punto de inflamación, menor es la probabilidad de experimentar problemas de combustión e inflamación durante los procesos de almacenamiento del CA y de fabricación de las mezclas en las plantas asfálticas.



Figura 3-8 Copa abierta de Cleveland. Fuente: Rondón y Reyes (2015).

- *Ensayo de película delgada (INV. E-720-13).* El ensayo de película delgada en RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test, ver Figura 3-9) es utilizado para evaluar la resistencia al envejecimiento a corto plazo del CA, entendiéndose por corto plazo aquel que experimenta el ligante durante los procesos de almacenamiento del CA, de fabricación de la mezcla en la planta asfáltica y de extensión y compactación en obra. De acuerdo Ruiz et al. El envejecimiento a largo plazo del CA es aquel que experimenta la mezcla asfáltica durante su vida útil o de servicio en el pavimento. Un CA envejecido genera disminución en la adherencia entre el agregado pétreo y el ligante (aumentando la probabilidad de incremento del fenómeno de stripping) y un cambio del comportamiento dúctil a frágil del ligante y de la mezcla asfáltica, acompañado de un incremento en su rigidez. En algunas ocasiones un leve envejecimiento del CA es deseable en las mezclas debido al incremento en rigidez, siempre y cuando el material no cambie su comportamiento dúctil a frágil bajo carga.



Figura 3-9 Horno RTFOT. Fuente: Rondón y Reyes (2015).

3.1.3 Cemento asfáltico CA 60-70 modificado con HUSIL

El CA 60-70 convencional se modificó adicionando 1% de aditivo HUSIL con respecto a la masa del asfalto, esta adición se realiza cuando el asfalto se encuentra a una temperatura 80° C y se realiza la mezcla por 5 minutos, continuando luego con el aumento de la temperatura hasta llegar a la que se quiere evaluar, esto se define con base en los estudios reportados en Rondón et al. (2015, 2016, 2017). Sobre el CA modificado se realizan los mismos ensayos que se emplean sobre el CA convencional mencionados con anterioridad y la temperatura de fabricación se define de acuerdo a la evaluación a realizar.

3.1.4 Estabilización de la Escoria con Aditivo Químico

Ruiz (2018) en su trabajo de investigación concluyó que las escorias de alto horno (BFS) por ser materiales con mayor porosidad y absorción, los vacíos con aire aumentan en la mezcla analizada. Lo que para el presente trabajo hace parte de las variables a medir y corregir, por lo que se hizo necesario el empleo de un aditivo químico para llevar a cabo la estabilización de la escoria de Alto Horno, minimizando los poros en esta y contrarrestar así la absorción generada en estos granulares y buscando así mejorar la calidad de la mezcla.

EL aditivo químico seleccionado para este trabajo fue el cemento hidráulico, componente del que se ha experimentado y referenciado en otros trabajos, sobre su excelente comportamiento, adicional a eso es un material con excelente desempeño al entrar en contacto con el asfalto y sufre alteraciones considerables al presenciar altas temperaturas, que puedan afectar negativamente a la mezcla asfáltica y sus componentes principales.

Es importante tener en cuenta que, al momento de realizarse la estabilización, se presenta una disminución del contenido de asfalto en la mezcla, variando así las características físicas de esta, viéndose reflejado en la respuesta mecánica que ofrecen las mezclas modificadas con la escoria de alto horno.

Con el fin de infiltrar el aditivo químico escogido dentro de los poros de la escoria de alto horno, se fabricaron lechadas del cemento con agua y se sumergieron en ella las escorias durante al menos tres horas. Luego las escorias se sacaron y se dejaron en reposo por al menos una semana hasta que secó el cemento dentro de los poros.

3.2 ENSAYOS A LA MEZCLA DE CONTROL O REFERENCIA.

Con el fin de obtener el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla de control (agregado pétreo natural y asfalto CA 60-70 sin modificar) se fabricaron cinco briquetas compactadas a 75 golpes por cara para porcentajes de asfalto de 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%, siguiendo los lineamientos del ensayo Marshall (INV. E-748). Una vez identificado el contenido óptimo de asfalto, se procedió a fabricar otras seis briquetas Marshall con dicho contenido para realizar el ensayo de tracción indirecta (INV. E-725) sobre muestras secas (3 briquetas) y sumergidas en agua (3 briquetas), por tres temperaturas, con el fin de evaluar el daño por humedad, calculando la relación entre la condición saturada y seca (TIS/TID). La granulometría de las mezclas es la establecida por INVIAS (2013) para mezclas tipo MDC-19 (ver Tabla 3-1). Las temperaturas de fabricación y compactación de las briquetas se escogen con base en el ensayo de viscosidad realizado al CA 60-70, cumpliendo con el rango especificado para mezclas del tipo denso (viscosidad de mezcla de 170 cp y de compactación de 280 cp). En total en esta fase se fabricaron 20 briquetas para el ensayo Marshall y 6 para el ensayo de tracción indirecta (26 en total).

Tabla 3-1. Granulometría franja central, mezcla MDC-19

Tamiz		% que pasa	% Retenido	% Retenido Acumulado
Normal	Alternativo			
19.0 mm	3/4"	100	0	0
12.5 mm	1/2"	87.5	12.5	12.5
9.5 mm	3/8"	79	8.5	21
4.75 mm	No. 4	57	22	43
2.00 mm	No. 10	37	20	63
0.425 mm	No. 40	19.5	17.5	80.5
0.180 mm	No. 80	12.5	7	87.5
0.075 mm	No. 200	6	6.5	94

Fuente: Instituto Nacional de Vías – INVIAS (2013).

3.3 EVALUACIÓN DE LA MEZCLA CON REEMPLAZO DEL MATERIAL PÉTREO POR ESCORIA CON Y SIN ESTABILIZAR.

De acuerdo a la granulometría base (Tabla 3-1) definida para las mezclas asfálticas se realizó el reemplazo de la fracción gruesa del material pétreo natural por escoria de alto horno en porcentajes de material retenido de 12.5% (sustitución del tamiz 1/2"), 21% (sustitución tamices 1/2" y 3/8") y 43% (sustitución tamices 1/2", 3/8" y No. 4). Estos reemplazos se realizaron con relación a la masa y tienen como finalidad definir la mezcla que mejor comportamiento presenta al realizar las tres sustituciones. Se fabricaron briquetas Marshall empleando el contenido óptimo de asfalto determinado en la fase anterior (numeral 0). Se fabricaron cinco briquetas

por cada porcentaje de sustitución compactadas a 75 golpes para la ejecución del ensayo Marshall. En total en esta fase se fabricaron 35 briquetas Marshall (5 briquetas con la granulometría convencional y 5 briquetas por 3 reemplazos del material granular por escoria con y sin estabilizar).

3.4 EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL ADITIVO HUSIL EN LAS MEZCLAS CON ESCORIA ESTABILIZADA Y SIN ESTABILIZAR.

En esta fase, se elaboraron nuevas briquetas Marshall, pero fabricándolas empleando el aditivo HUSIL, agregado al asfalto durante el proceso de mezcla y sin este, definido el porcentaje de sustitución del material pétreo natural por escoria de alto horno y el porcentaje óptimo de asfalto. Las temperaturas de fabricación fueron 150°C, 140°C, 130°C y 120°C teniendo en cuenta los resultados del ensayo de viscosidad, con el fin de evaluar el efecto de la disminución de la temperatura sobre la resistencia bajo carga monotónica en los ensayos Marshall y tracción indirecta. En esta fase se realizaron ensayos Marshall y tracción indirecta sobre mezclas fabricadas con y sin emplear HUSIL y basadas en los resultados obtenidos de las fases descritas anteriormente, de donde se evaluaron las mezclas de control y las de mejor comportamiento con reemplazo de agregado natural por escoria con y sin estabilización. En síntesis, en esta fase se fabricaron 120 briquetas (4 temperaturas x 5 briquetas x 3 tipos de mezcla - con y sin HUSIL -) para el ensayo Marshall y 48 para tracción indirecta (3 briquetas x 2 temperaturas x 3 tipos de mezcla x con y sin HUSIL).

3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO – ANOVA - DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

Con el fin de evaluar estadísticamente los efectos significativos de las variables al generar cambio en la composición de las mezclas, se realizó el análisis de la varianza utilizando un modelo lineal a un nivel de confianza del 95%, presentando así la existencia o no de cambios significativos al emplear escoria de alto horno estabilizada y sin estabilizar y adicionando el aditivo Husil.

ANOVA es una técnica estadística que señala si dos variables (una independiente y otra dependiente) están relacionadas en base a si las medias de la variable dependiente son diferentes en las categorías o grupos de la variable independiente. Es decir, señala si las medias entre dos o más grupos son similares o diferentes

3.6 EVALUACIÓN DE LAS MEZCLAS CON ESCORIA SIN ESTABILIZAR Y ESTABILIZADA POR MEDIO DEL ENSAYO CANTABRO DE PÉRDIDA POR DESGASTE.

Identificada la temperatura de mezclado para las mezclas con el aditivo HUSIL, se determina el valor de la pérdida por desgaste de las mezclas asfálticas empleando la máquina de Los Ángeles, para lo cual se fabricaron briquetas Marshall empleando el contenido óptimo de asfalto determinado y para las temperaturas de 150°C y 125°C, para la mezcla convencional sin aditivo HUSIL y para mezclas con aditivo HUSIL con reemplazo del agregado por escoria de alto horno con o sin estabilizar. En total en esta fase se fabricaron 4 briquetas Marshall.

4 RESULTADOS Y ANALISIS

4.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

4.1.1 Agregados pétreos

En la Tabla 4-1 y la Tabla 4-2 se presentan los valores obtenidos de los ensayos de caracterización ejecutados al agregado pétreo natural y a la escoria de alto horno (BFS).

A razón de los resultados obtenidos en la Tabla 4-1 se puede resaltar que: 1) el agregado pétreo natural presenta características dentro del rango de cumplimiento del requisito de calidad que exigen las especificaciones (INVIAS, 2013) para fabricar mezclas de concreto asfáltico; 2) En cuanto al desgaste por impacto y por abrasión, la fracción gruesa presenta una buena resistencia, así como su respuesta al fracturamiento de partículas; 3) la forma que presentan las partículas es óptima para la fabricación de mezclas asfálticas (caras redondeadas y fracturadas); 5) en las partículas finas no se encuentra contaminación por materiales indeseables como arcilla, materia orgánica y polvo.

Tabla 4-1. Caracterización del agregado pétreo.

Ensayo	Método	Requisito	Resultado
Gravedad específica agregados gruesos	AASHTO T 84-00	-	2,64
Adsorción agregado grueso	AASHTO T 85-91	-	2,01%
Gravedad específica agregados fino	AASHTO T 84-00	-	2,52
Adsorción agregado fino	AASHTO T 85-91	-	1,76%
Equivalente de arena	INV. E-133-13	50% mínimo	70%
Caras fracturadas a una cara	INV. E-227-13	75% mínimo	92%
Límites líquido y plástico	INV. E-125, 126	0%	0%
Partículas planas y alargadas	INV. E-240-13	10% máximo	7,5%
Ataque en sulfato de magnesio	INV. E-220-13	18% máximo	10,3%
Microdeval	INV. E-238-13	25% máximo	21,2%
10% de finos (resistencia en seco)	INV. E-224-13	90 kN mínimo	121 kN
10% de finos (relación húmeda/seco)		75% mínimo	87%
Resistencia en Máquina de los Ángeles	INV. E-218, 219	35% máximo	22,9%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-2. Gravedad específica de los agregados.

Ensayo	Método	Valor
Gravedad específica / absorción (1/2")	AASHTO T 84-00	1,55/3,73%
Gravedad específica / absorción (3/8")	AASHTO T 85-91	1,72/3,73%
Resistencia en la máquina de Los Ángeles, 500 revoluciones	INV. E-218, 219	39,7%
Micro-Deval	INV. E-238-13	27,9%
10% de finos (seco)	INV. E-224-13	108 kN
Caras fracturadas: una cara	INV. E-227-13	94%
Partículas alargadas	INV. E-240-13	3,3%
Partículas planas		5,2%
Índice de plasticidad	ASTM D 4318-00	No plástico

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4-2 se observa que al igual que el agregado natural, la BFS presenta buena resistencia al desgaste por abrasión por fricción entre partículas y al fracturamiento bajo carga monotónica en los ensayos Micro-Deval y 10% de finos. Sin embargo, tal como se reporta en la literatura de referencia (p.e., Airey et al., 2004; FHWA, 2008), la BFS analizada es un material que experimenta baja resistencia al desgaste por abrasión en la máquina de Los Ángeles. Asimismo, se observa, al igual que en el material natural, que la BFS presenta partículas con formas ideales (redondeadas, pero con caras fracturadas) y ningún contenido de arcilla, materia orgánica o exceso de polvo.

La Tabla 4-3 muestra que el cemento incrementa la gravedad específica de las partículas de la BFS, así como su resistencia al desgaste por abrasión en la máquina de Los Ángeles y el ensayo Micro-Deval. Por otro lado, el cemento ayuda a recubrir los poros de la BFS, disminuyendo la absorción.

4.1.2 Cemento asfáltico

Con el fin de caracterizar el asfalto CA 60-70, se realizaron los ensayos básicos definidos en la especificación (INVIAS, 2013), tal como se puede evidenciar en la Tabla 4-3. Donde se evidencia que al igual que el agregado pétreo, el asfalto cumple los requisitos de calidad que se establecen en la especificación (INVIAS, 2013) para fabricar mezclas de concreto asfáltico.

Tabla 4-3. Características del CA empleado

ENSAYO	MÉTODO	UNIDAD	CA 60-70	RESULTADO
Ductilidad (25°C, 50 mm/min)	INV E-702	Cm	100 min	>118,5
Penetración (25°C, 100 g, 5s)	INV E-706	0.1 mm	60 min	60
Punto de ignición y punto de llama mediante la copa abierta de Cleveland.	INV E-709	°C	230 min	Punto de ignición: 298° C Punto de llama: 310° C
Punto de ablandamiento	INV E-712	°C	-	44°C

Fuente: Elaboración propia

4.2 ENSAYO MARSHALL MEZCLA ASFÁLTICA DE REFERENCIA O CONTROL

Luego de realizar los ensayos al agregado pétreo y a los cementos asfálticos (con y sin modificación), se fabricaron cinco briquetas (compactadas a 75 golpes por cara) para cada porcentaje de asfalto de 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%, con el fin de realizar el diseño Marshall de la mezcla MDC-19 convencional de referencia (sin aditivo y sin sustitución de pétreos naturales por escoria de alto horno). Para fabricar esta mezcla, las temperaturas de fabricación y compactación de las briquetas fueron de 150°C y 140°C, respectivamente. Estas temperaturas fueron escogidas con base en el ensayo de viscosidad realizado al CA 60-70, cumpliendo con el rango especificado para mezclas del tipo denso (viscosidad de mezcla de 170 cp y de compactación de 280 cp). La gravedad específica bulk y el contenido de vacíos de las mezclas fueron medidos con base en la especificación de ensayo ASTM D2726.

La Tabla 4-4 presenta el resumen de la distribución de la granulometría para cada mezcla, variando el contenido de asfalto empleado entre 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%.

Tabla 4-4. Distribución de masas de asfalto y agregados pétreos para mezcla MDC-19.

TAMIZ	Tamiz [mm]	% PASA	% RETENIDO	CA=4,5%	CA=5,0%	CA=5,5%	CA=6,0%
				(54 g)	(60 g)	(66 g)	(72 g)
				Masa del agregado (g)			
3/4"	19,00	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1/2"	12,50	87,5	12,5	143,3	142,5	141,8	141,0
3/8"	9,50	79,0	8,5	97,4	96,9	96,4	95,9
4	4,75	57,0	22,0	252,1	250,8	249,5	248,2
10	2,00	37,0	20,0	229,2	228,0	226,8	225,6

Tabla 4-4. Distribución de masas de asfalto y agregados pétreos para mezcla MDC-19.

TAMIZ	Tamiz [mm]	% PASA	% RETENIDO	CA=4,5%	CA=5,0%	CA=5,5%	CA=6,0%
				(54 g)	(60 g)	(66 g)	(72 g)
				Masa del agregado (g)			
40	0,43	19,5	17,5	200,6	199,5	198,5	197,4
80	0,18	12,5	7,0	80,2	79,8	79,4	79,0
200	0,075	6,0	6,5	74,5	74,1	73,7	73,3
FONDO	-	0,0	6,0	68,8	68,4	68,0	67,7

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4-5 presenta el resumen de los resultados del ensayo Marshall ejecutado sobre la mezcla de control, esta mezcla corresponde a una composición convencional sin el empleo de escoria de alto horno ni adición de aditivos, así mismo en la Figura 4-1 a-d. se referencian los resultados de manera esquemática. Los resultados obtenidos sobre todas las muestras ensayadas se reportan en el ANEXO 1. Con base en los resultados reportados del ensayo Marshall se establece como porcentaje óptimo de asfalto 5.3%. Este contenido de asfalto fue definido con base en los criterios establecidos en INVIAS (2013), los cuales se relacionaron en la Tabla 2-2.

Tabla 4-5. Resumen del ensayo Marshall ejecutado sobre la mezcla de referencia.

CA [%]	Estabilidad [kN]	Flujo [mm]	E/F [kN/mm]	Densidad Bulk [g/cm ³]	Vacíos en la mezcla [%]	Vacíos en agregados [%]
4,5	11,26	3,99	2,82	2,242	6,77	16,74
5,0	12,12	3,81	3,18	2,266	5,12	16,31
5,5	12,41	3,73	3,33	2,287	3,53	15,96
6,0	11,31	4,24	2,67	2,299	2,35	15,98

Fuente: Elaboración propia

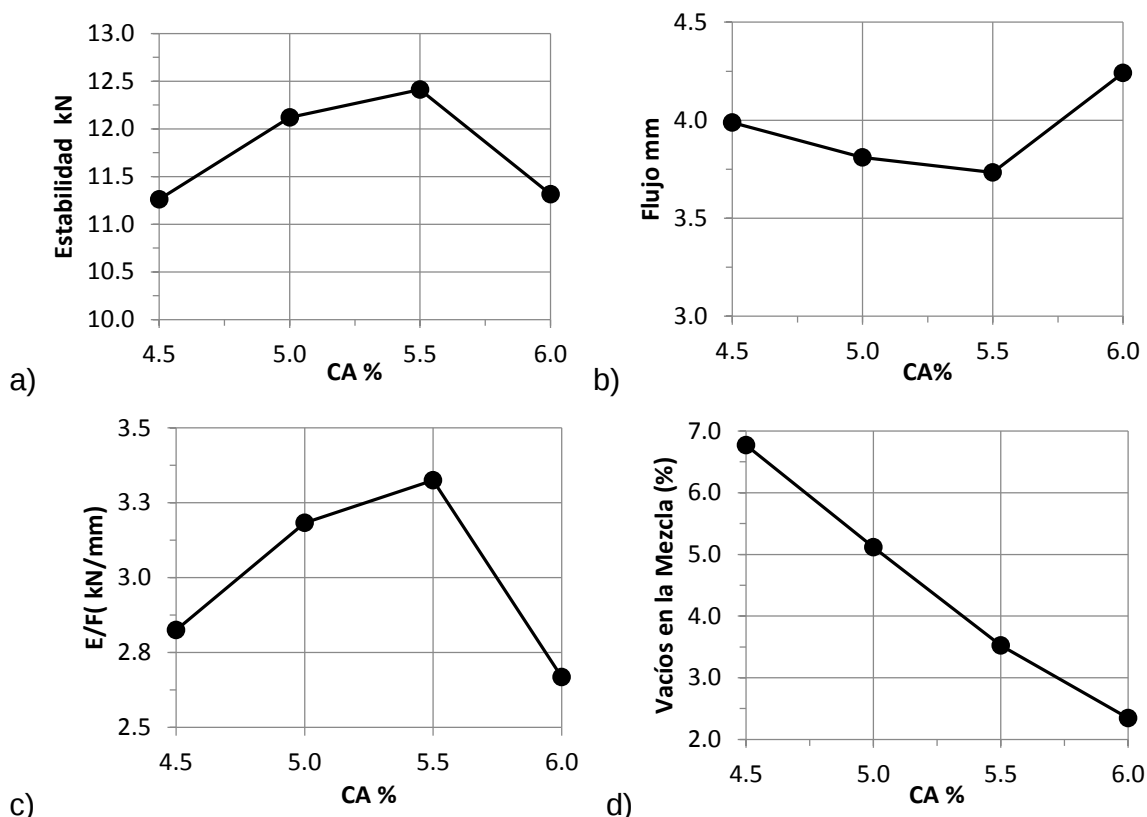


Figura 4-1. Resumen del ensayo Marshall ejecutado sobre la mezcla de referencia MDC-19, Estabilidad – E, b) Flujo – F, c) E/F y d) vacíos en la mezcla. (Elaboración propia)

4.3 ENSAYO MARSHALL A MEZCLAS CON REEMPLAZO DEL MATERIAL PÉTREO POR ESCORIA DE ALTO HORNO CON Y SIN ESTABILIZAR.

Una vez definido el porcentaje óptimo de asfalto en 5.3%, se llevó a cabo el ensayo Marshall a las mezclas asfálticas, realizando el reemplazo de la fracción gruesa del material pétreo natural por escoria de alto horno (con y sin proceso de estabilización con cemento) en porcentajes de 13.5% (sustitución del tamiz 1/2"), 21% (sustitución tamices 1/2" y 3/8") y 43% (sustitución tamices 1/2", 3/8" y No. 4). La Tabla 4-6 muestra el resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 4-6. Resultados ensayo Marshall – Mezcla con reemplazo por escoria.

Tipo	Densidad bulk [g/cm ³]	Vacíos [%]	Estabilida d [kN]	E/F [kN/mm]	VMA [%]	VFA [%]
Convencional	2,28	4,05	12,70	3,43	16,00	74,71
1/2" - Escoria	2,08	8,06	12,05	3,75	18,98	57,51
1/2", 3/8" - Escoria	1,99	9,60	12,56	3,56	20,03	52,08
1/2", 3/8", No. 4 - Escoria	1,87	10,34	11,55	2,92	20,12	48,66

Tabla 4-6. Resultados ensayo Marshall – Mezcla con reemplazo por escoria.

Tipo	Densidad bulk [g/cm³]	Vacíos [%]	Estabilida d [kN]	E/F [kN/mm]	VMA [%]	VFA [%]
1/2" - Cemento	2,10	7,84	14,89	4,41	18,82	58,35
1/2", 3/8" - Cemento	2,04	8,01	14,55	3,98	18,67	57,11
1/2", 3/8", No. 4 - Cemento	1,92	9,50	13,30	3,36	19,53	51,41

Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-2 presenta esquemáticamente la respuesta de la mezcla asfáltica al reemplazar el material granular grueso por escoria de alto horno (con y sin proceso de estabilización con cemento) en las diferentes composiciones. Se observa con claridad, que, al reemplazar el agregado grueso por escoria de alto horno, los vacíos en la mezcla incrementan. Lo anterior es debido a que las escorias poseen una mayor porosidad superficial y absorción, lo que aumenta la solicitud de asfalto. Este contenido de vacíos disminuye al estabilizar las escorias con cemento, ya que dicho material recubre superficialmente los espacios vacíos de la escoria, disminuyendo su absorción, tal como fue presentado en la Tabla 4-1 y la Tabla 4-2. A pesar de la mayor porosidad, las mezclas con reemplazo de los tamices de 1/2" y 1/2" + 3/8" por escoria, experimentan mayor E/F con respecto a la mezcla de control, y dicho parámetro es mayor para el caso de las escorias estabilizadas con cemento. La respuesta de la mezcla con sustitución de los tamices de 1/2" + 3/8" + No.4 por escorias no fue satisfactoria, ya que los parámetros de resistencia bajo carga monotónica disminuyen notablemente. Por lo anteriormente expuesto, y teniendo en cuenta reemplazar la mayor cantidad posible de escoria, en las etapas posteriores se utilizará la BFS sustituyendo los tamices 1/2"+3/8".

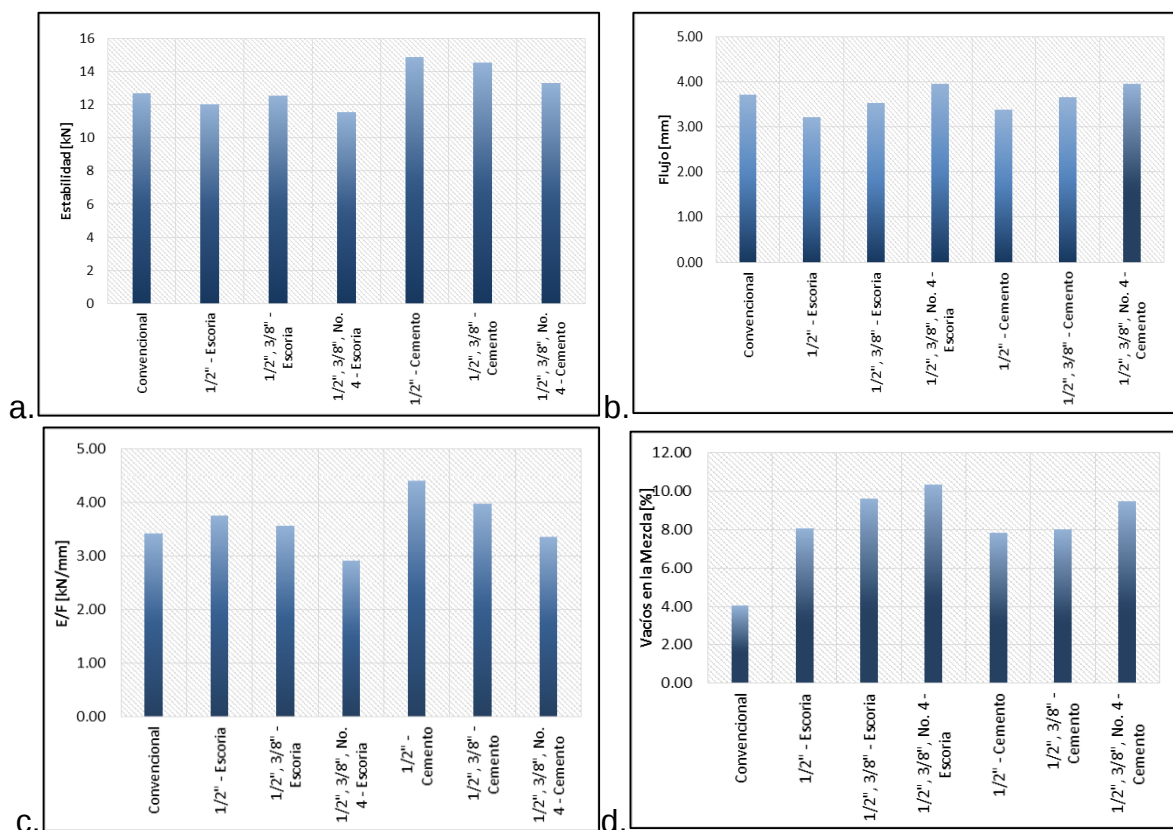


Figura 4-2. Resumen del ensayo Marshall ejecutado sobre la mezcla con escoria. Estabilidad – E, b) Flujo – F, c) E/F y d) vacíos en la mezcla. (Elaboración propia)

Es importante mencionar que al definir el reemplazo de las fracciones de material retenido por los tamices 1/2" y 3/8" de material granular grueso por escoria de alto horno en este proyecto, se busca generar unas condiciones favorables desde el punto de vista de la mejora en la rigidez y disminución de los vacíos en la mezcla, es por eso que aunque no se cumpla con el parámetro relacionado con los vacíos en la mezcla, la misma condición especial de la mezcla que se está estudiando, no se distancia del rango requerido y permite plantear la necesidad de definir las especificaciones acorde a estas mezclas obtenidas.

Al obtenerse mayor rigidez Marshall e incremento de la porosidad de la mezcla, puede sacarse provecho de estas mezclas al entenderse el beneficio que se genera en lo relacionado con la fricción superficial entre el neumático y el pavimento.

4.4 EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL ADITIVO HUSIL EN LAS MEZCLAS CON ESCORIA ESTABILIZADA Y SIN ESTABILIZAR.

Con el fin de evaluar el efecto que genera el uso del aditivo Husil en las mezclas asfálticas con reemplazo del material granular grueso por escoria de alto horno

con y sin estabilizar, se llevó a cabo el ensayo Marshall para dichas mezclas sin y con el uso del aditivo Husil.

4.4.1 Determinación de contenido de aditivo y temperatura de fabricación de la Mezcla Asfáltica Tibia WMA.

Con base en estudios previos reportados por Rondón et al. (2015a, 2016, 2017), el porcentaje de aditivo escogido es de 1% con respecto a la masa del asfalto y se escogió disminuir la temperatura de mezcla en 30°C. En el caso de la investigación relacionada, se tiene que los investigadores emplearon el mismo agregado pétreo, asfalto y aditivo (HUSIL) para realizar sus estudios.

4.4.2 Ensayo Marshall en mezclas asfálticas sin aditivo Husil.

La Tabla 4-7 presenta el resumen de los resultados obtenidos al evaluar el comportamiento de las mezclas al disminuir la temperatura de mezclado. Las temperaturas de fabricación utilizadas fueron 150°C, 140°C, 130°C y 120°C y las briquetas se fabricaron empleando el porcentaje óptimo de asfalto de 5.3% definido anteriormente y relacionado en el numeral 4.2 y se emplearon para la mezcla convencional, la mezcla con empleo de escoria de alto horno estabilizado con cemento y sin estabilizar. En esta etapa no se empleó el aditivo Husil.

Tabla 4-7. Resumen del ensayo Marshall ejecutado sobre las mezclas variando la temperatura de fabricación y CA 5.3%. Sin Husil

Tipo	Estabilidad [kN]	E/F [kN/mm]	Densidad bulk [g/cm ³]	Vacíos en la Mezcla [%]	VMA [%]	VFA [%]
Convencional - 150°C	12,70	3,43	2,28	3,98	15,94	75,01
Convencional - 140°C	12,06	3,11	2,26	5,11	16,92	69,84
Convencional - 130°C	10,95	2,76	2,23	6,33	17,99	64,84
Convencional - 120°C	10,41	2,46	2,19	7,70	19,20	59,87
1/2", 3/8" - Escoria - 150°C	12,56	3,56	1,98	9,86	20,26	51,36
1/2", 3/8" - Escoria - 140°C	10,62	2,97	2,06	9,30	20,06	53,66
1/2", 3/8" - Escoria - 130°C	9,61	2,57	1,97	10,39	20,73	49,86
1/2", 3/8" - Escoria - 120°C	8,60	2,13	1,85	11,39	21,06	45,93
1/2", 3/8" - Cemento - 150°C	14,55	3,98	2,03	8,17	18,81	56,60
1/2", 3/8" - Cemento - 140°C	14,39	3,86	2,09	8,30	19,22	56,83
1/2", 3/8" - Cemento - 130°C	13,58	3,62	2,02	8,70	19,28	54,89
1/2", 3/8" - Cemento - 120°C	12,76	3,18	1,92	9,51	19,55	51,33

Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-3 a-c. referencia los resultados de manera esquemática, obtenidos sobre todas las muestras ensayadas y que se reportan en el ANEXO 2. Se observa de manera lógica, que al disminuir la temperatura de fabricación, la resistencia bajo carga monotónica de las mezclas disminuye y el contenido de vacíos aumenta. Lo anterior es debido a que al disminuir la temperatura de fabricación, la viscosidad del asfalto incrementa, dificultando los procesos de mezclado y compactación de las mezclas. La mezcla de control experimenta menor contenido de vacíos, ya que las escorias presentan mayor porosidad y absorción. A pesar de lo anterior, las mezclas que emplearon escorias estabilizadas con cemento desarrollaron mayor resistencia bajo carga monotónica. Es decir, el cemento ayudó a disminuir los vacíos y la porosidad de la escoria, y reaccionó bien con el asfalto.

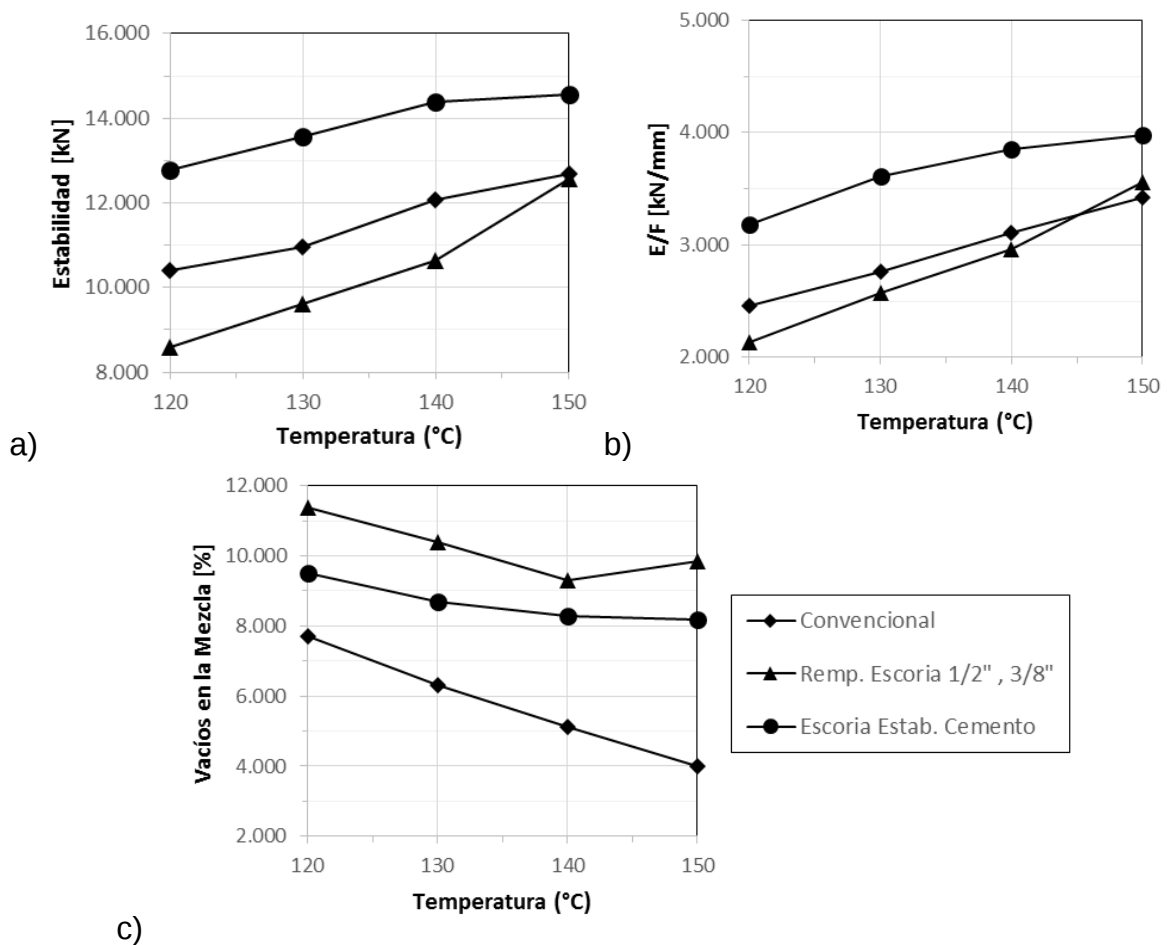


Figura 4-3. Influencia de la temperatura en el ensayo Marshall sobre las mezclas asfálticas sin Husil. a) Estabilidad – E, b) E/F y c) vacíos en la mezcla. (Elaboración propia)

4.4.3 Ensayo Marshall en mezclas asfálticas con aditivo Husil.

La Tabla 4-8 presenta el resumen de los resultados obtenidos al evaluar el comportamiento de las mezclas al disminuir la temperatura de mezclado. Las temperaturas de fabricación fueron 150°C, 140°C, 130°C y 120°C y las briquetas se fabricaron empleando el porcentaje óptimo de asfalto de 5.3% definido anteriormente y relacionado en el numeral 4.2 y se emplearon para la mezcla convencional, la mezcla con empleo de escoria de alto estabilizado con cemento y sin estabilizar adicionando a estas cemento asfáltico con aditivo Husil en 1%.

La Figura 4-4 a-c. muestra los resultados en forma gráfica y esquemática, obtenidos sobre todas las muestras ensayadas y que se reportan en el ANEXO 2. En términos general, la tendencia que experimentan las mezclas al emplear el aditivo Husil es similar a la descrita con anterioridad para el caso de las mezclas que no lo emplearon. Sin embargo, el aditivo ayuda a disminuir notoriamente los vacíos con aire y a aumentar la rigidez y resistencia bajo carga monotónica en las mezclas. Lo anterior se hace evidente comparando los resultados presentados en las Tablas 4-7 y 4-8, y las Figuras 4-3 y 4-4. Estos cambios obtenidos son debidos principalmente a que el aditivo incrementa la rigidez y el grado de funcionamiento del asfalto a altas temperaturas de servicio. Adicionalmente, dicho aditivo espuma el asfalto a aproximadamente 80 °C, mejorando los procesos de recubrimiento de los agregados (trabajabilidad y mezclado) y compactación.

Tabla 4-8. Resumen del ensayo Marshall ejecutado sobre las mezclas variando la temperatura de fabricación y CA 5.3%. Con Husil.

Tipo	Estabilidad [kN]	E/F [kN/mm]	Densidad bulk [g/cm ³]	Vacíos en la Mezcla [%]	VMA [%]	VFA [%]
Convencional - 150°C	12,70	3,43	2,28	3,98	15,94	75,01
Convencional - 140°C	13,63	3,73	2,27	4,57	16,45	72,23
Convencional - 130°C	12,93	3,49	2,25	5,45	17,22	68,36
Convencional - 120°C	12,38	3,29	2,22	6,53	18,17	64,07
1/2", 3/8" - Escoria - 150°C	12,56	3,56	1,98	9,86	20,26	51,36
1/2", 3/8" - Escoria - 140°C	12,37	3,58	2,08	8,08	18,99	57,44
1/2", 3/8" - Escoria - 130°C	11,75	3,28	1,99	9,71	20,12	51,75
1/2", 3/8" - Escoria - 120°C	11,17	2,99	1,88	10,01	19,83	49,51
1/2", 3/8" - Cemento - 150°C	14,55	3,98	2,03	8,17	18,81	56,60
1/2", 3/8" - Cemento - 140°C	15,94	4,42	2,11	7,44	18,46	59,71
1/2", 3/8" - Cemento - 130°C	14,98	4,10	2,04	8,06	18,72	56,95
1/2", 3/8" - Cemento - 120°C	13,94	3,71	1,93	8,69	18,81	53,82

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se observa que las mezclas con escorias estabilizadas fabricadas a 120 °C presentan mayor resistencia y rigidez Marshall que la mezcla de control

fabricada a 150 °C, cuando se emplea el aditivo. Es decir, el aditivo permite disminuir la temperatura de fabricación de las mezclas en al menos 30 °C.

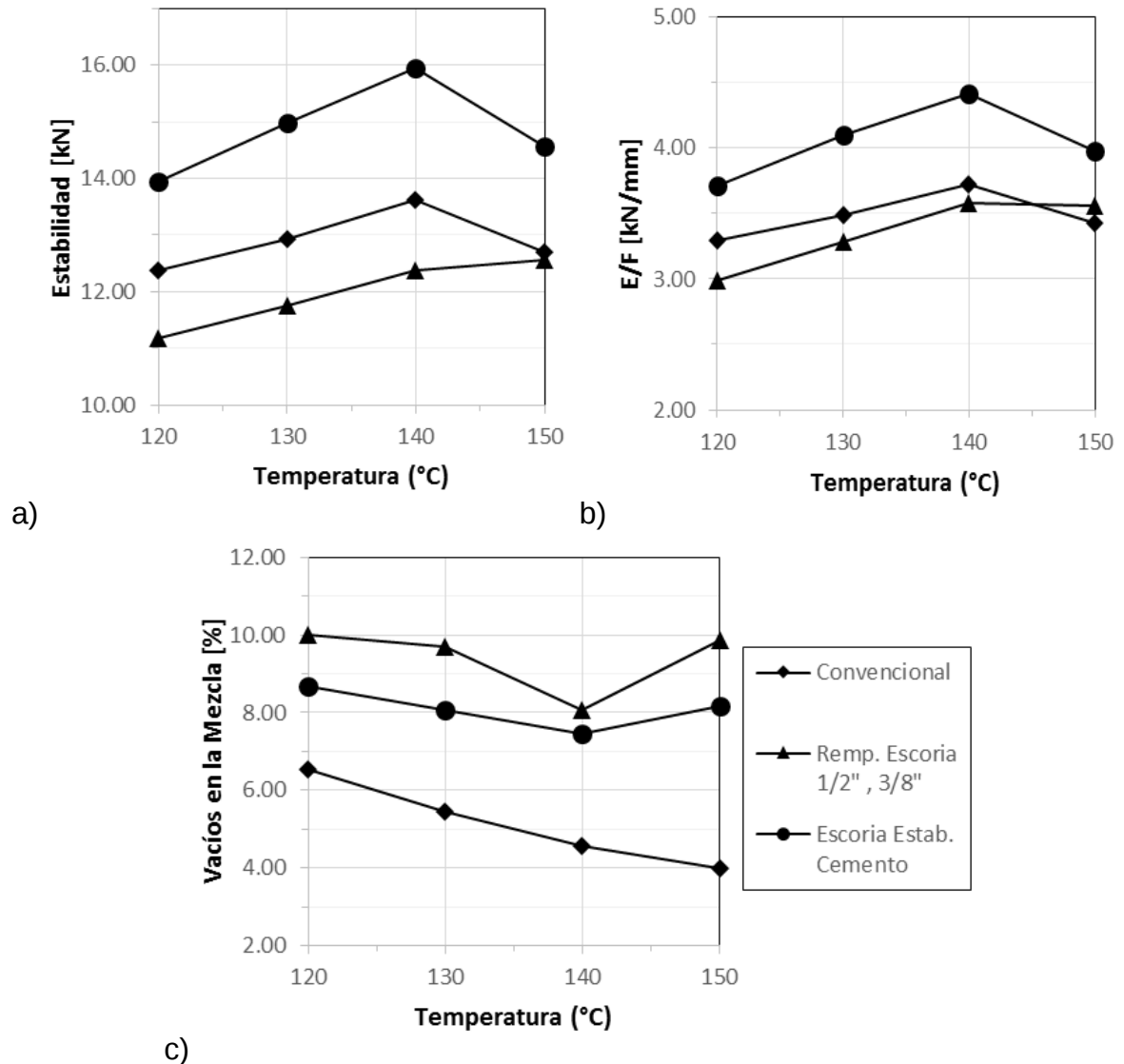


Figura 4-4. Influencia de la temperatura en el ensayo Marshall sobre las mezclas asfálticas con Husil. a) Estabilidad – E, b) E/F y c) vacíos en la mezcla. (Elaboración propia)

4.4.4 Evaluación del empleo del aditivo Husil en la mezcla con reemplazo del material pétreo por escoria de alto horno sin estabilizar.

La Tabla 4-9 presenta el resumen de los resultados obtenidos al evaluar el comportamiento de las mezclas al disminuir la temperatura de mezclado y

presentados de manera independiente en la Tabla 4-7 y Tabla 4-8 y realizados para la mezcla convencional, la mezcla con empleo de escoria de alto horno estabilizado con cemento y sin estabilizar, sin y con uso del aditivo Husil.

Tabla 4-9. Resumen del ensayo Marshall ejecutado sobre las mezclas variando la temperatura de fabricación y CA 5.3%, con y sin Husil.

Tipo	Mezclas sin Aditivo Husil			Mezclas con Aditivo Husil		
	Estabilidad [kN]	E/F [kN/mm]	Vacíos en la Mezcla [%]	Estabilidad [kN]	E/F [kN/mm]	Vacíos en la Mezcla [%]
Convencional - 150°C	12,70	3,43	3,98	12,70	3,43	3,98
Convencional - 140°C	12,06	3,11	5,11	13,63	3,73	4,57
Convencional - 130°C	10,95	2,76	6,33	12,93	3,49	5,45
Convencional - 120°C	10,41	2,46	7,70	12,38	3,29	6,53
1/2", 3/8" - Escoria - 150°C	12,56	3,56	9,86	12,56	3,56	9,86
1/2", 3/8" - Escoria - 140°C	10,62	2,97	9,30	12,37	3,58	8,08
1/2", 3/8" - Escoria - 130°C	9,61	2,57	10,39	11,75	3,28	9,71
1/2", 3/8" - Escoria - 120°C	8,60	2,13	11,39	11,17	2,99	10,01
1/2", 3/8" - Cemento - 150°C	14,55	3,98	8,17	14,55	3,98	8,17
1/2", 3/8" - Cemento - 140°C	14,39	3,86	8,30	15,94	4,42	7,44
1/2", 3/8" - Cemento - 130°C	13,58	3,62	8,70	14,98	4,10	8,06
1/2", 3/8" - Cemento - 120°C	12,76	3,18	9,51	13,94	3,71	8,69

Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-5 a-c. muestra los resultados en forma gráfica y esquemática, obtenidos sobre todas las muestras ensayadas y que se reportan en el ANEXO 2. Se hace evidente el aumento de la resistencia bajo carga monotónica de las mezclas con aditivo Husil, esta evaluación se realiza sobre mezclas con reemplazo por escoria sin estabilizar, asimismo se observa la disminución de los vacíos en la mezcla, ratificando el análisis presentado en los numerales 4.4.2 y 0.

Se reitera que al obtenerse mayor rigidez Marshall e incremento de la porosidad de la mezcla, puede sacarse provecho de estas mezclas al entenderse el beneficio que se genera en lo relacionado con la fricción superficial entre el neumático y el pavimento.

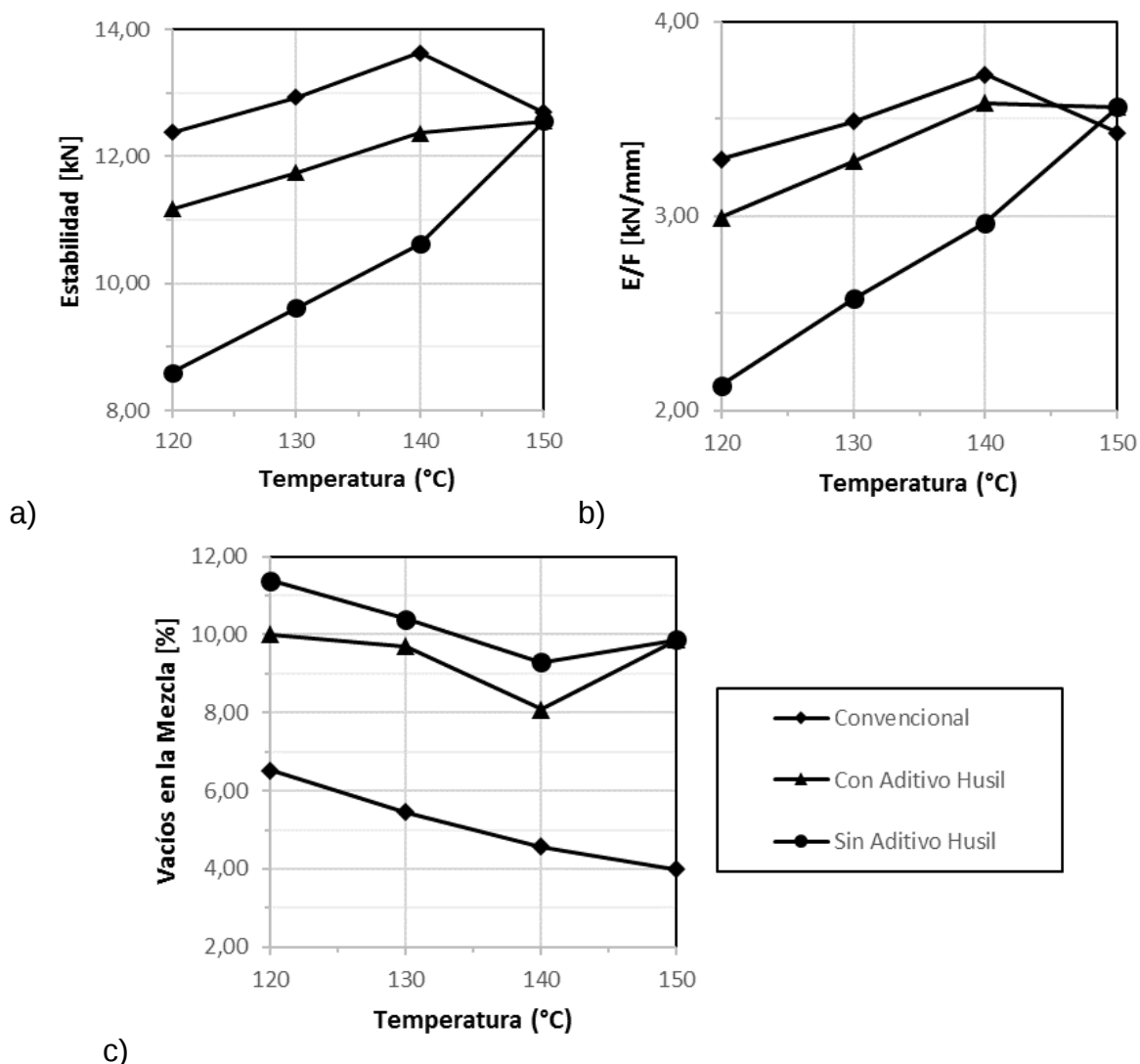


Figura 4-5. Influencia del aditivo sobre las mezclas asfálticas con reemplazo por escoria de alto horno sin estabilizar, sin y con aditivo Husil. a) Estabilidad – E, b) E/F y c) vacíos en la mezcla. (Elaboración propia)

4.4.5 Evaluación del empleo del aditivo Husil en la mezcla con reemplazo del material pétreo por escoria de alto horno estabilizada.

Al igual que en el numeral 4.4.4, se presenta la Figura 4-6 a-c. muestra los resultados en forma gráfica y esquemática, obtenidos sobre todas las muestras ensayadas y que se reportan en el ANEXO 2. Ahí se observa y ratifica el aumento de la resistencia bajo carga monotónica de las mezclas al emplear aditivo Husil, aun superando la respuesta de la mezcla de control, esta evaluación se realiza sobre mezclas con reemplazo por escoria estabilizada, lo que favorece la respuesta de estas mezclas al evaluar los vacíos en ella.

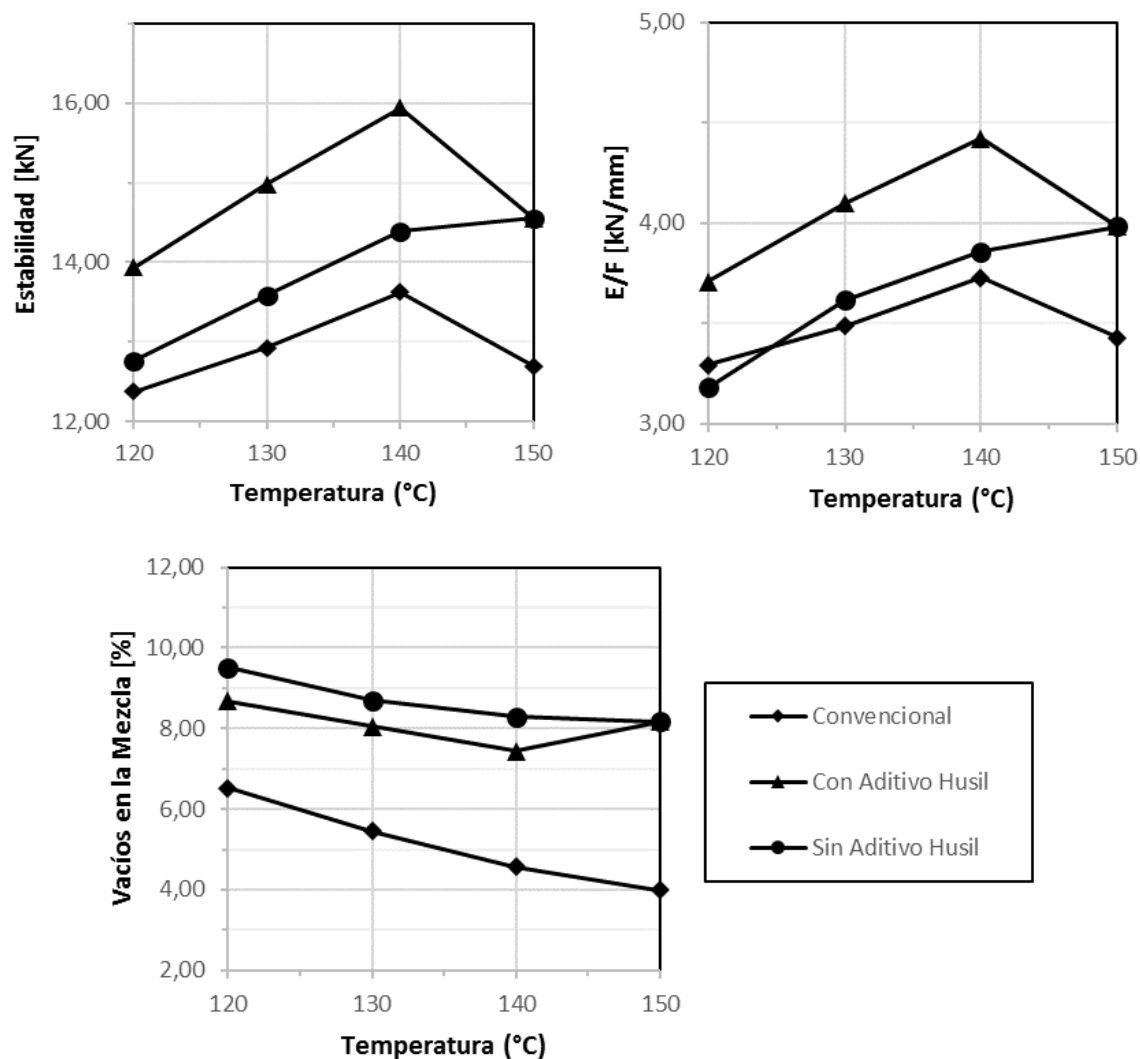


Figura 4-6. Influencia del aditivo sobre las mezclas asfálticas con reemplazo por escoria de alto horno estabilizada, sin y con aditivo Husil. a) Estabilidad – E, b) E/F y c) vacíos en la mezcla. (Elaboración propia)

4.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO – ANOVA -.

Con el fin de evaluar estadísticamente los efectos significativos de las variables al generar cambio en la composición de las mezclas, se realizó el análisis de la varianza utilizando un modelo lineal a un nivel de confianza del 95%, presentando así la existencia o no de cambios significativos al emplear escoria de alto horno estabilizada y sin estabilizar y adicionando el aditivo Husil.

La Tabla 4-10 presenta el resumen de los resultados del análisis ANOVA llevado a cabo con la información presentada en la Tabla 4-9, y que muestra la significancia

de los cambios en los resultados obtenidos al reemplazar el granular natural por escoria de alto horno sin estabilizar y estabilizada.

En contraste, la rigidez medida a través de la Estabilidad presenta, para el caso donde se compara la mezcla convencional con la mezcla con reemplazo por escoria de alto horno sin estabilizar que, los cambios son significativos, eso mismo se evidencia para los vacíos en la mezcla y ya cambia con la relación E/F, donde de acuerdo al análisis, los cambios no son significativos. Este análisis sirve como soporte a los resultados presentados en la Tabla 4-7.

Tabla 4-10. Resumen Análisis ANOVA de las Mezclas sin Husil.

Variable	Comparativo	F	Probabilidad	Valor crítico para F	Significancia
Estabilidad [kN]	Convencional / Reemp. 1/2", 3/8"	10.58	0.05	10.13	SI
	Convencional / Reemp. 1/2", 3/8" - E-C	204.67	0.00	10.13	SI
	Convencional / Reemp. 1/2", 3/8" / Reemp. 1/2", 3/8" - E-C	45.99	0.00	5.14	SI
E/F [kN/mm]	Convencional / Reemp. 1/2", 3/8"	1.83	0.27	10.13	NO
	Convencional / Reemp. 1/2", 3/8" - E-C	135.12	0.00	10.13	SI
	Convencional / Reemp. 1/2", 3/8" / Reemp. 1/2", 3/8" - E-C	36.04	0.00	5.14	SI
Vacíos en la Mezcla [%]	Convencional / Reemp. 1/2", 3/8"	83.60	0.00	10.13	SI
	Convencional / Reemp. 1/2", 3/8" - E-C	31.33	0.01	10.13	SI
	Convencional / Reemp. 1/2", 3/8" / Reemp. 1/2", 3/8" - E-C	56.61	0.00	5.14	SI

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados presentados en Tabla 4-11 se tiene que los cambios generados en la mezcla al emplear el aditivo Husil son representativos, principalmente en la rigidez de la mezcla, permitiendo así la reducción de la temperatura de fabricación en 30°C sin desmejorar esta característica en la mezcla.

Tabla 4-11. Resumen Análisis ANOVA de las Mezclas con Husil.

Variable	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F	Significancia
Estabilidad [kN]	56.05	5.10	4.05	0.01	2.72	Si
E/F [kN/mm]	4.82	0.44	2.59	0.06	2.72	No
Vacios en la Mezcla [%]	96.12	8.74	25.92	0.00	2.72	Si

Fuente: Elaboración propia

4.6 ENSAYOS DE TRACCIÓN INDIRECTA

La Tabla 4-12 presenta los resultados del ensayo de tracción indirecta ejecutado sobre la mezcla asfáltica densa en caliente MDC-19 de referencia y las modificadas con aditivo HUSIL y empleo de escorias de alto horno estabilizadas y sin estabilizar. Estos ensayos fueron realizados con base en la especificación AASHTO T 283-03.

Tres muestras de cada mezcla fueron ensayadas bajo condición seca (S) y las otras tres en condición húmeda (W, sumergidas en agua obteniendo un grado de saturación entre 75–80%). Con los resultados del ensayo se calculó la resistencia al daño por humedad TSR mediante la relación W/S. Cada ensayo se realizó sobre seis muestras.

Tabla 4-12. Resumen del ensayo de Tracción Indirecta

Mezcla	Condición de la muestra		ITS/ITD TSR (%)
	Seco ITD (kPa)	Sumergido ITS (kPa)	
Convencional-150°C	1002,0	836,0	83,4
1/2", 3/8" - Escoria-150°C	970,0	748,5	77,2
1/2", 3/8" - Escoria-C-150°C	1142,6	977,1	85,5
Convencional-125°C	898,8	707,6	78,7
1/2", 3/8" - Escoria-125°C	877,4	661,1	75,3
1/2", 3/8" - Escoria-C-125°C	1025,7	856,8	83,5
Convencional-125°C-H	991,8	815,6	82,2
1/2", 3/8" - Escoria-125°C-H	960,9	743,8	77,4
1/2", 3/8" - Escoria-C-125°C-H	1106,5	948,4	85,7

Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-7 permite observar el comportamiento de las mezclas al ser sometidas a tracción indirecta. C en la figura significa Cemento, E escoria y H Husil. De

manera lógica se observa que la resistencia de las mezclas bajo condición saturada disminuye con respecto a la condición seca. Se observa un aumento significativo en la resistencia a tracción de las mezclas tanto en seco como saturadas cuando las escorias son estabilizadas con cemento. Lo anterior, a pesar que dichas mezclas presentan mayor contenido de vacíos con respecto a la convencional. Asimismo, se observa que el aditivo ayuda a aumentar también dichas resistencias. Se reporta un incremento notable en la resistencia a tracción indirecta de la mezcla fabricada con el aditivo y con sustitución de escoria estabilizada a 125°C cuando se compara con la mezcla de control fabricada a 150°C. En definitiva, se tiene que las mezclas asfálticas con empleo de aditivo HUSIL y escorias de alto horno estabilizadas con cemento presentan una mayor resistencia al daño por humedad y a tracción indirecta bajo condición seca y húmeda con respecto a la convencional de referencia. Esta situación permite evidenciar que el aditivo HUSIL podría estar mejorando la tensión superficial entre el agregado pétreo y el asfalto actuando como un aditivo anti-stripping, así mismo se le puede atribuir esta mejora en la condición a la presencia de cemento como estabilizante de la escoria de alto horno.

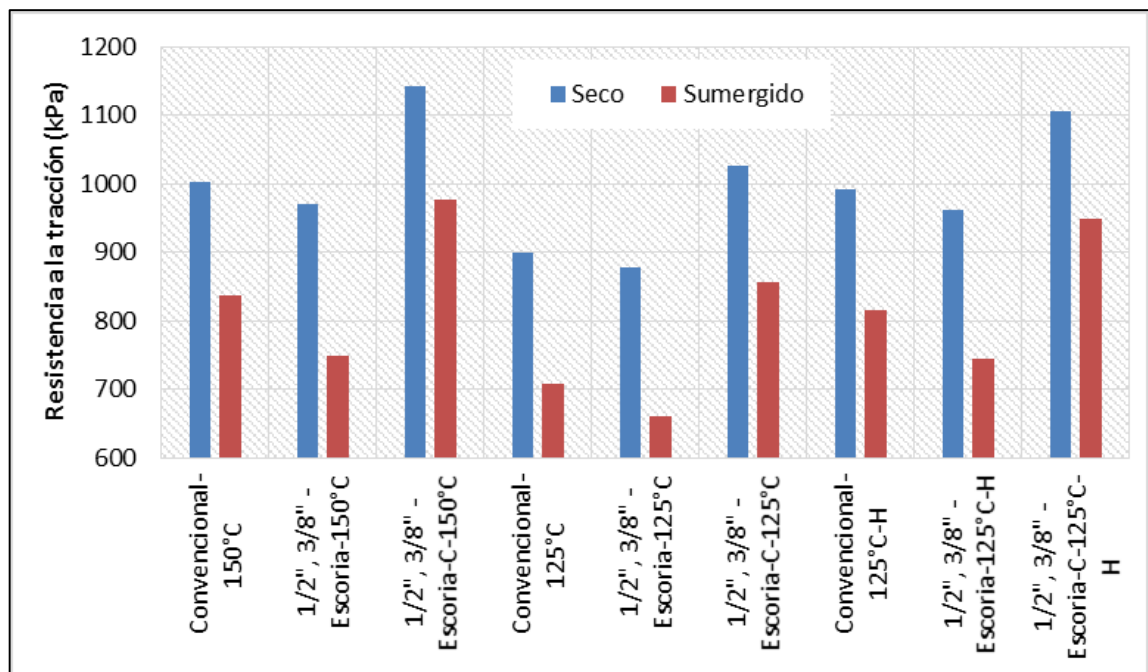


Figura 4-7. Influencia del aditivo Husil sobre las mezclas asfálticas ante el ensayo de Tracción Indirecta. (Elaboración propia)

4.7 ENSAYO CANTABRO DE PÉRDIDA POR DESGASTE

Con el fin de valorar indirectamente la cohesión, así como la resistencia a la disgregación de la mezcla, ante los efectos abrasivos y de succión originados por

el tráfico, se evaluó la respuesta de la mezcla asfáltica convencional fabricada a 150°C y 125°C y las modificadas con aditivo HUSIL y reemplazo de escoria de alto horno estabilizada con cemento y sin estabilizar, cuyos resultados se presentan en la Tabla 4-13. La Figura 4-8 permite observar que la mezcla asfáltica modificada con aditivo HUSIL y con reemplazo de granulares por escoria de alto horno estabilizada con cemento y fabricada a una temperatura de 125°C, presenta una igual respuesta ante el desgaste al compararla con la mezcla convencional sin aditivo ni reemplazo en sus granulares y fabricada a 150°C.

Tabla 4-13. Resumen del ensayo Cantabro de pérdida por desgaste.

Rev.	Convencional-150		Convencional-125		1/2", 3/8"- E-125-H		1/2", 3/8"-E-C-125-H	
	Masa [g]	Pérdida [%]	Masa [g]	Pérdida [%]	Masa [g]	Pérdida [%]	Masa [g]	Pérdida [%]
0	1195,2	0,00	1188,7	0,00	1152,1	0,00	1167	0,00
300	1127,9	5,63	1087,3	8,53	1047,5	9,08	1098,1	5,90
500	1079,9	9,65	1034,1	13,01	1001,3	13,09	1055,6	9,55
1000	987,4	17,39	941	20,84	899,9	21,89	977,6	16,23

Fuente: Elaboración propia

Al presentarse mayores vacíos en las mezclas modificadas con HUSIL y reemplazo de granulares por escoria de alto horno, podría pensarse que estas mezclas se verían expuestas a una mayor abrasión y disgregación, pero los resultados muestran que su comportamiento es similar al de una mezcla convencional, con el componente que la temperatura de mezclado se puede disminuir al emplear el aditivo HUSIL, sin desmejorar su rigidez.

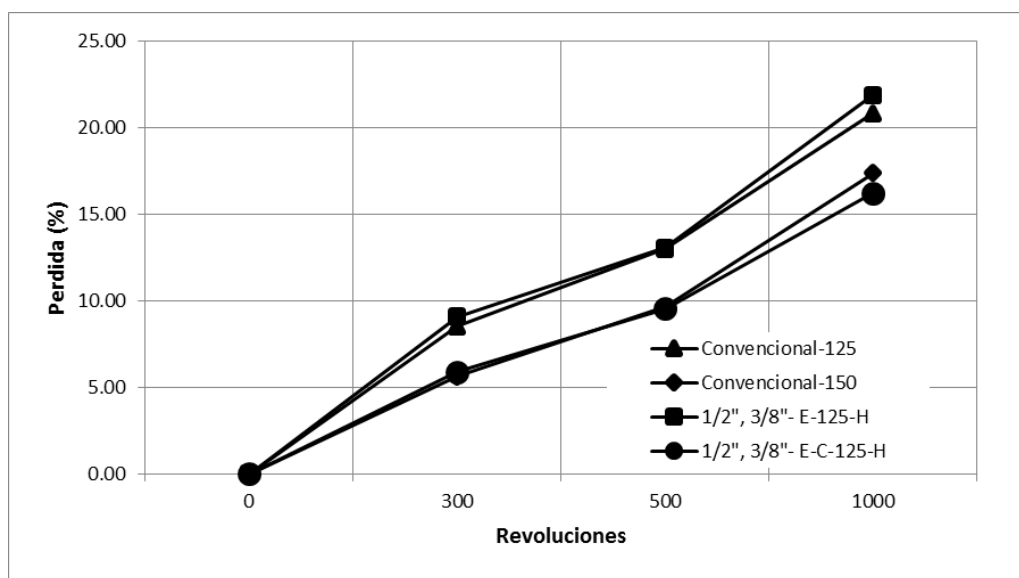


Figura 4-8. Influencia del aditivo y la escoria ante abrasión en la mezcla asfáltica de control MDC-19 y las modificadas a 125°C. (Elaboración propia)

5 CONCLUSIONES

A razón de que ya se han realizado estudios de modificación de mezcla densa en caliente MDC-19, este estudio presenta una novedad al evaluarse el comportamiento de las mezclas al reemplazar parte de sus granulares por escoria de alto horno estabilizada y adicionando un aditivo HUSIL, esto mejorando las deficiencias encontradas en estudios anteriores relacionadas con el aumento de vacíos en la mezcla y la necesidad de disminuir la temperatura de mezclado sin desmejorar la resistencia a las cargas monotónicas, a razón de esto se puede concluir del presente estudio lo siguiente:

- Teniendo en cuenta que las escorias de alto horno representan mayor porosidad y absorción, los vacíos de aire en la mezcla aumentan con relación a una mezcla convencional, fenómeno que se controla significativamente al estabilizar este material con cemento, generando así también un incremento en rigidez bajo carga monotónica (estabilidad, relación estabilidad/flujo, tracción indirecta bajo condición seca y saturada, y relación ITS/ITD) con relación a la mezcla de control.
- Al evaluarse las mezclas con diferentes porcentajes de reemplazo del material granular grueso por escoria de alto horno, se tiene que al realizar el reemplazo en las fracciones de los tamices 1/2" y 3/8", se presenta una mejor respuesta al equilibrar los resultados que se evidencian en los resultados al medir la rigidez (Estabilidad), el Flujo y los vacíos en la mezcla, teniendo en cuenta que en este estudio se busca emplear el mayor porcentaje posible de escoria en la mezcla.
- La mezcla asfáltica tibia al ser fabricada a 125°C (25°C por debajo de la mezcla convencional) debe generar menores emisiones a la atmósfera. Asimismo, se espera que reduzca el uso de combustibles en las plantas de fabricación.
- Aunque el contenido de aditivo agregado a la mezcla es bajo (1% con respecto a la masa del asfalto), se reportan cambios significativos en las propiedades del asfalto modificado (incremento de la rigidez).
- El aditivo HUSIL permite reducir la temperatura de la mezcla en 25° C, logrando propiedades volumétricas similares, y ligeramente mayor resistencia bajo carga monotónica en el ensayo Marshall con respecto a la mezcla en caliente de referencia MDC fabricada a 150° C. Asimismo, el aditivo al ser utilizado en una proporción de 1% con respecto a la masa del asfalto permitió disminuir el volumen de vacíos con aire (sobre las mezclas con BFS) y aumentar la rigidez del asfalto.

- Empleando el aditivo, se puede disminuir la temperatura de fabricación de las mezclas en 25°C y obtener un material con mayor resistencia a la tracción indirecta (seco y sumergido en agua) y al daño por humedad (en comparación con la mezcla de control) para sustitución de la fracción gruesa del agregado natural por escoria de alto horno de tamaño 1/2" + 3/8".
- Las mezclas tibias fabricadas a 125 °C experimentaron mayor resistencia al daño por humedad en comparación con la de referencia fabricada a 150 ° C.
- El mejor comportamiento se logra cuando se disminuye la temperatura de mezcla a 125°C, se emplea el aditivo y se sustituye la fracción gruesa del agregado pétreo en los tamices 1/2" y 3/8" por escoria de alto horno estabilizada con cemento. Bajo dicha condición, la mezcla experimenta un aumento importante en la rigidez (bajo carga monotónica), en la resistencia al daño por humedad y en la resistencia a la disgregación de la mezcla con respecto a la de control.
- Teniendo en cuenta que las especificaciones definidas para la fabricación de mezclas tibias con el empleo de escoria de alto horno no se encuentran reglamentadas y/o definidas, el presente estudio permite concluir la necesidad de avanzar en esta tarea, una vez que se ha venido fortaleciendo desde la academia por medio de investigaciones como la aquí presentada y cuyos resultados generan un aporte significativo, es así como se requiere que se estudie la posibilidad de materializar la normativa que defina los parámetros de cumplimiento a la hora de fabricar este tipo de mezclas, así como se ha hecho con las mezclas modificadas con asfalto caucho y otros.

6 BIBLIOGRAFÍA

AIREY, G. D., COLLOP, A. C., and THOM, N. H. (2004). Mechanical performance of asphalt mixtures incorporating slag and glass secondary aggregates. Proc. 8th Conf. Asph.Pav.South. Africa (CAPSA'04).

AMÉZQUITA, J. D. y GANTIVA, C. D. Modificación de un concreto asfáltico MDC-19 mediante la sustitución del llenante mineral natural por calamina, Tesis de pregrado. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, 2017.

BIANCHETTO, H. D.; HACKER, E. y FRETES, N. Desarrollo en laboratorio de una mezcla tibia SMA multigrado: consideraciones tecnológicas, ambientales y de seguridad vial. Universidad Tecnológica Nacional. Argentina, 2011.

BONAQUIST, R. (2011). Mix design practices for warm mix asphalt, National Cooperative Highway Research Program - NCHRP Report 691, Washington DC: Transportation Research Board.

CASTILLO, S. y ÁLVAREZ, R. (2001). Análisis comparativo de mezclas modificadas con diferentes asfaltos empleando granulometrías: densa, semidensa y abierta, empleando la rueda de Hamburgo, Tesis de especialización. México: Universidad de Veracruz.

CHOWDHURY, A., and BUTTON, J. W. (2008). A review of warm mix asphalt, Report No. SWUTC/08/473700-00080-1. College Station: Texas Transportation Institute.

FHWA - Federal Highway Administration Research and Technology. (2008). Coordinating, developing, and delivering highway transportation innovations - User guidelines for waste and byproduct materials in pavement construction, Report Publication Number: FHWA-RD-97-148.

GANDHI, T., AMIRKHANIAN, S. (2008). Laboratory simulation of warm mix asphalt (WMA) binder aging characteristics. In Airfield and Highway Pavements 2008, ASCE, 195-204.

GARCÍA, M. L. Comparación del comportamiento mecánico de mezcla asfáltica tibia y mezcla asfáltica, Tesis de grado para obtener el título de ingeniero civil. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Guayaquil, 2010.

GOH, S. W., YOU, Z. (2008). Resilient modulus and dynamic modulus of warm mix asphalt. In GeoCongress 2008, ASCE, 1000-1007.

HEARON, A., DIEFENDERFER, S. (2008). —Laboratory evaluation of warm asphalt properties and performance. II Airfield & Highway Pavements 2008, ASCE, 182-194.

INVIAS - Instituto Nacional de Vías. Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras. Bogotá D.C., Colombia. 2013.

MIRÓ, R., CENTENO, M., MARTÍNEZ, A. y PÉREZ, F. (2007). Evaluación de los métodos de reciclado y rehabilitación de firmes a partir del análisis de los tramos experimentales del proyecto europeo PARAMIX. Revista Infraestructura Vial, 19 (18); pp. 15-23.

MUNIANDY, R., ABURKABA, E., and MAHDI, L. (2013). Effect of mineral filler type and particle size on asphalt-filler mastic and stone mastic asphalt laboratory measured properties. Australian J. Basic Appl. Sci., 7(11), 475-487.

PASANDÍN, A.R. and PÉREZ, I. (2015). The influence of the mineral filler on the adhesion between aggregates and bitumen. International Journal of Adhesion & Adhesives, 58, 53–58.

PATÍÑO, D. F. Evaluación de la resistencia bajo carga monotónica de una mezcla asfáltica, fabricada con escoria de alto horno, Tesis de pregrado. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, 2017.

REZA, S., OTHMAN, M., and GUNGAT, L. (2018). Evaluation of asphalt mixture behavior incorporating warm mix additives and reclaimed asphalt pavement. Journal of traffic and transportation engineering, 5 (3), 181-196.

RODRÍGUEZ, J. A. Análisis de desempeño de mezclas asfálticas tibias. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Ecuador, 2004.

RONDÓN, H. A. y REYES, F. A. (2015a). Pavimentos – Materiales, Construcción y Diseño. Editorial ECOE, Bogotá D.C., Colombia. ISBN: 978-958-771-175-2.

RONDÓN, H. A., ZAFRA, C. A., CASTRO, W. y FERNÁNDEZ, W. (2015). Desarrollo de una Mezcla Asfáltica Tibia bajo Criterios Técnicos y Medioambientales. Informe Final - Proyecto de Investigación aprobado según Convocatoria Pública No. 014-13 del CIDC, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C.

RONDÓN, H. A., ZAFRA, C. A., y FERNÁNDEZ, W. (2018). Desarrollo de una Mezcla Asfáltica Tibia bajo Criterios Técnicos y Medioambientales. Ed. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Libro resultado de investigación, Bogotá D.C. ISBN: 978-958-787-000-8.

RONDÓN, H. A., NOGUERA, J. A. and REYES, F. A. (2015a). A review of warm mix asphalt technology: technical, economical and enviromental aspects. *Ingeniería e Investigación*, 35(3), 5-18.

RONDÓN, H. A., LEÓN, O. I. y FERNÁNDEZ, W. D. (2017). Behavior of a warm mix asphalt made in an asphalt plant. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(1), 153-174.

RONDÓN, H. A., FERNÁNDEZ, W. D. and ZAFRA, C. (2016). Behavior of a warm mix asphalt using a chemical additive to foam the asphalt binder. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, 78, 129-138.

RUIZ, J. F. (2018). Evaluación de la resistencia mecánica bajo carga monotónica y la rigidez bajo carga cíclica de una mezcla asfáltica tibia fabricada con sustituciones parciales de agregado pétreo por escoria de alto horno. Trabajo de Maestría en Infraestructura Vial, Universidad Santo Tomás, Bogotá D.C. Colombia. 2018

SÁNCHEZ ABRIL, H. M. Estado del arte sobre las escorias negras de horno de arco eléctrico y sus aplicaciones en pavimentos. V Congreso Internacional De Ingeniería Civil USTA-Tunja. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, 2014.

SHI, C. (2004). Steel slag - its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(3), 230-236.

SILVA, H. M., OLIVEIRA, R. M., PERALTA, J., and ZOOROB, S. E. (2010). Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents. *Il Constr. Buil. Mater.*, 24(9), 1621-1631.

SUAREZ ROBLES, J.A. y SANTOS VARGAS, M.A. Mezclas asfálticas producto de la combinación de técnicas en mezclas de alto modulo y mezclas tibias. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2009.

TORRES VELANDIA, E.G. y NOREÑA, A.J. Mezclas tibias: una nueva tecnología para el mejoramiento de las mezclas asfálticas convencionales, Trabajo de grado. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, 2012.

ULLOA, C. M. y RAMÍREZ, A. M. Comportamiento de mezclas asfálticas fabricadas con adición de ceras naturales. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, 2006.

YAN, J., CAO, Y., ZHU, T., CAI, M., CAO, Z., HUANG, W., Dong, Q. (2010). Shanghai experience with warm mix asphalt. *Il GeoShanghai 2010 International Conference, ASCE*, 97-102.

YOU, Z., and GOH, S. W. (2008). Laboratory evaluation of warm mix asphalt: a preliminary study. *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 1(1), 34-40.

ANEXO 1. RESULTADOS ENSAYOS PARA DISEÑO DE MEZCLA MDC-19.



PINZ - LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES
INTERV. - INSPECT. - LAB/TA - ING. CIVIL

ENSAYO MARSHALL (INV. E-748-13) - CONCRETO ASFÁLTICO

PROYECTO	TESIS MAESTRÍA JORGE ROMERO - WILLIAM VALENCIA	
TEMPERATURA DE MEZCLA	150°C	
TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN	135° - 140°C	
No. DE GOLPES POR CAPA	75 GOLPES	
PROCEDENCIA AGREGADOS PETREOS	CONCRESCOL	Gs.A.PETREOS 2,64 - 2,52
TIPO DE CEMENTO ASFALTICO	60-70	Gs. ASFALTO 1,012

Briqueta No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tipo de Mezcla	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19
% Asfalto	4,5%	4,5%	4,5%	4,5%	4,5%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%
Altura Briqueta (cm)	6,6	6,6	6,5	6,6	6,6	6,5	6,5	6,5	6,5	6,6
Peso briqueta en aire Seca (g)	1181	1184	1182	1180	1177	1193	1185	1194	1190	1190
Peso briqueta en aire SSS (g)	1183	1186	1184	1182	1179	1195	1187	1195	1191	1192
Peso briqueta en agua (g)	657	658	657	656	653	669	663	668	665	668
Lectura de carga (KN)	1189	1202	1176	1165	1213	1242	1267	1272	1290	1255
Flujo (1/100")	155	155	160	155	160	150	145	150	155	150

LA LECTURA DE CARGA SE DEBE MULTIPLICAR POR LA CONSTANTE DE CALIBRACION DEL ANILLO (45,1) PARA EXPRESAR LA ESTABILIDAD EN kN

OBSERVACIONES	DISEÑO CONVENCIONAL MDC - 19

Lebta:

Jay. Saez S.

Revisó:

PINZ LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES



PINZ - LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES
INTERV. - INSPECT. - LAB/TA - ING. CIVIL

ENSAYO MARSHALL (INV. E-748-13) - CONCRETO ASFÁLTICO

PROYECTO TESIS MAESTRÍA JORGE ROMERO - WILLIAM VALENCIA
TEMPERATURA DE MEZCLA 150°C
TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN 135° - 140°C
No. DE GOLPES POR CAPA 75 GOLPES
PROCEDENCIA AGREGADOS PETREOS CONCRESCOL Gs. A. PETREOS 2,64 - 2,52
TIPO DE CEMENTO ASFALTICO 60-70 Gs. ASFALTO 1,012

Briqueta No.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tipo de Mezcla	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19
% Asfalto	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%
Altura Briqueta (cm)	6,4	6,4	6,5	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4
Peso briqueta en aire Seca (g)	1193	1194	1189	1199	1195	1193	1191	1200	1197	1194
Peso briqueta en aire SSS (g)	1194	1195	1190	1200	1196	1194	1192	1201	1198	1195
Peso briqueta en agua (g)	671	672	673	677	672	675	674	679	677	676
Lectura de carga (KN)	1245	1268	1252	1288	1260	1179	1113	1144	1129	1191
Flujo (1/100")	150	145	145	145	150	165	165	170	165	170

LA LECTURA DE CARGA SE DEBE MULTIPLICAR POR LA CONSTANTE DE CALIBRACION DEL ANILLO (45,1) PARA EXPRESAR LA ESTABILIDAD EN lb

OBSERVACIONES DISEÑO CONVENCIONAL MDC - 19

Labita: Fay. Saucedo S.

Revisó: PINZ LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES

**ANEXO 2. RESULTADOS ENSAYOS A MEZCLAS MODIFICADAS Y MEZCLA
DE CONTROL.**



PINZ - LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES
INTERV. - INSPECT. - LAB/TA - ING. CIVL

ENSAYO MARSHALL (INV. E-748-13) - CONCRETO ASFÁLTICO

PROYECTO	TESIS MAESTRÍA JORGE ROMERO - WILLIAM VALENCIA		
TEMPERATURA DE MEZCLA	150°C		
TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN	135° - 140°C		
No. DE GOLPES POR CAPA	75 GOLPES		
PROCEDENCIA AGREGADOS PETREOS	CONCRESCOL	Gs.A.PETREOS	2,84 - 2,52
TIPO DE CEMENTO ASFALTICO	60-70	Gs. ASFALTO	1,012

Briqueta No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tipo de Mezcla	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19
% Asfalto	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%
Altura Briqueta (cm)	6,5	6,5	6,4	6,4	6,5	6,9	7,0	7,0	7,0	6,9
Peso briqueta en aire Seca (g)	1198	1194	1192	1194	1197	1168	1171	1172	1174	1165
Peso briqueta en aire SSS (g)	1197	1195	1193	1195	1198	1170	1173	1176	1178	1170
Peso briqueta en agua (g)	672	673	671	672	672	609	613	615	613	610
Lectura de carga (KN)	13,21	13,17	12,83	13,11	12,93	13,9	13,91	13,95	13,84	13,97
Flujo (1/100")	150	140	150	150	140	125	125	130	130	130

LA LECTURA DE CARGA SE DEBE MULTIPLICAR POR LA CONSTANTE DE CALIBRACION DEL ANILLO (45,1) PARA EXPRESAR LA ESTABILIDAD EN lb

OBSERVACIONES	1 A 5 = CONVENCIONAL
	6 A 10 = CAMBIO TAMIZ 1/2" POR ESCORIA

Lab'ta:

Jay. S. S.

Reviso:

PINZ LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES



PINZ - LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES
INTERV. - INSPECT. - LAB/TA - ING. CIVL

ENSAYO MARSHALL (INV. E-748-13) - CONCRETO ASFÁLTICO

PROYECTO	TESIS MAESTRÍA JORGE ROMERO - WILLIAM VALENCIA		
TEMPERATURA DE MEZCLA	150°C		
TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN	135° - 140°C		
No. DE GOLPES POR CAPA	75 GOLPES		
PROCEDENCIA AGREGADOS PETREOS	CONCRESCOL	Gs.A.PETREOS	2,64 - 2,52
TIPO DE CEMENTO ASFALTICO	60-70	Gs. ASFALTO	1,012

	SIN ESTABILIZAR									
Briqueta No.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tipo de Mezcla	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19
% Asfalto	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%
Altura Briqueta (cm)	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,1	7,1	7,2	7,1	7,2
Peso briqueta en aire Seca (g)	1119	1114	1123	1126	1117	1090	1089	1086	1102	1096
Peso briqueta en aire SSS (g)	1124	1118	1128	1130	1122	1093	1094	1089	1106	1100
Peso briqueta en agua (g)	559	555	568	568	559	514	507	505	517	515
Lectura de carga (KN)	14,84	14,52	14,6	14,52	14,71	13,72	13,96	13,94	13,98	13,79
Flujo (1/100")	140	145	140	135	135	150	160	160	155	155

LA LECTURA DE CARGA SE DEBE MULTIPLICAR POR LA CONSTANTE DE CALIBRACION DEL ANILLO (45,1) PARA EXPRESAR LA ESTABILIDAD EN lb

OBSERVACIONES	11 A 15 = REEMPLAZO TAMIZ 1/2 Y 3/8 POR ESCORIA
	16 A 20 = REEMPLAZO TAMIZ 1/2 - 3/8 Y No. 4 POR ESCORIA

Lab/ta: Fay. Saeed S.

Reviso: PINZ LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES



PINZ - LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES
INTERV. - INSPECT. - LAB/TA - ING. CIVIL

ENSAYO MARSHALL (INV. E-748-13) - CONCRETO ASFÁLTICO

PROYECTO	TESIS MAESTRÍA JORGE ROMERO - WILLIAM VALENCIA		
TEMPERATURA DE MEZCLA	150°C		
TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN	135° - 140°C		
No. DE GOLPES POR CAPA	75 GOLPES		
PROCEDENCIA AGREGADOS PETREOS	CONCRESCOL	Gs.A.PETREOS	2,64 - 2,52
TIPO DE CEMENTO ASFALTICO	60-70	Gs. ASFALTO	1,012

ESTABILIZADAS CON CEMENTO										
Briqueta No.	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tipo de Mezcla	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19
% Asfalto	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%
Altura Briqueta (cm)	6,9	6,9	7,0	6,9	7,0	7,1	7,0	7,1	7,0	7,1
Peso briqueta en aire Seca (g)	1184	1187	1186	1191	1190	1182	1181	1184	1180	1188
Peso briqueta en aire SSS (g)	1191	1191	1190	1195	1193	1193	1188	1191	1186	1193
Peso briqueta en agua (g)	625	622	626	628	626	611	607	611	607	610
Lectura de carga (KN)	17,46	16,79	17,15	17,2	17,05	16,78	17,06	17,66	16,99	17,43
Flujo (1/100")	130	135	135	135	130	140	150	145	140	145

LA LECTURA DE CARGA SE DEBE MULTIPLICAR POR LA CONSTANTE DE CALIBRACION DEL ANILLO (45,1) PARA EXPRESAR LA ESTABILIDAD EN lb

OBSERVACIONES	21 A 25 = CEMENTO TAMIZ 1/2
	26 A 30 = CEMENTO TAMIZ 1/2 Y 3/8

Lab/ta: Ing. Daniel S.

Revisó: PINZ LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES



PINZ - LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES
INTERV. - INSPECT. - LAB/TA - ING. CIVIL

ENSAYO MARSHALL (INV. E-748-13) - CONCRETO ASFÁLTICO

PROYECTO	TESIS MAESTRÍA JORGE ROMERO - WILLIAM VALENCIA		
TEMPERATURA DE MEZCLA	150°C		
TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN	135° - 140°C		
No. DE GOLPES POR CAPA	75 GOLPES		
PROCEDENCIA AGREGADOS PETREOS	CONCRESCOL	Gs.A.PETREOS	2,64 - 2,52
TIPO DE CEMENTO ASFALTICO	60-70	Gs. ASFALTO	1,012

Briqueta No.	ESTABILIZADAS CON CEMENTO									
	31	32	33	34	35					
Tipo de Mezcla	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19					
% Asfalto	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%					
Altura Briqueta (cm)	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1					
Peso briqueta en aire Seca (g)	1048	1108	1119	1122	1132					
Peso briqueta en aire SSS (g)	1056	1114	1121	1128	1137					
Peso briqueta en agua (g)	508	540	544	539	543					
Lectura de carga (KN)	15,65	16,03	15,93	15,95	15,71					
Flujo (1/100")	150	155	160	155	160					

LA LECTURA DE CARGA SE DEBE MULTIPLICAR POR LA CONSTANTE DE CALIBRACION DEL ANILLO (45,1) PARA EXPRESAR LA ESTABILIDAD EN lb

OBSERVACIONES	31 A 35 = CEMENTO
	TAMIZ 1/2 - 3/8 Y No. 4 POR ESCORIA SATURADA

Lab/ta: Jay. L. S.

Reviso: PINZ LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES



PINZ - LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES
INTERV. - INSPECT. - LAB/TA - ING. CIVL

ENSAYO MARSHALL (INV. E-748-13) - CONCRETO ASFÁLTICO

PROYECTO	TESIS MAESTRÍA JORGE ROMERO - WILLIAM VALENCIA		
TEMPERATURA DE MEZCLA	140°C - 130°C - 120°C		
TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN	130°C - 120°C - 110°C		
No. DE GOLPES POR CAPA	75 GOLPES		
PROCEDENCIA AGREGADOS PETREOS	CONCRESCOL	Gs.A.PETREOS	2,64 - 2,52
TIPO DE CEMENTO ASFALTICO	60-70	Gs. ASFALTO	1,012

Briqueta No.	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Tipo de Mezcla	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19
% Asfalto	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%
Altura Briqueta (cm)	6,4	6,5	6,4	6,5	6,4	6,6	6,6	6,5	6,5	6,6
Peso briqueta en aire Seca (g)	1193	1199	1194	1193	1189	1192	1194	1190	1191	1191
Peso briqueta en aire SSS (g)	1195	1201	1195	1194	1191	1194	1195	1192	1193	1192
Peso briqueta en agua (g)	667	669	668	664	663	660	658	658	657	658
Lectura de carga (KN)	12,34	12,12	12,52	12,28	12,42	11,55	11,67	11,42	11,40	11,52
Flujo (1/100")	150	155	155	150	155	155	160	155	155	155

LA LECTURA DE CARGA SE DEBE MULTIPLICAR POR LA CONSTANTE DE CALIBRACION DEL ANILLO (45,1) PARA EXPRESAR LA ESTABILIDAD EN lb

OBSERVACIONES	36 A 40 = 140°C CONVENCIONAL
	41 A 45 = 130°C CONVENCIONAL

Lab/ta:

Jay. Saeed S.

Reviso:

PINZ LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES



PINZ - LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES
INTERV. - INSPECT. - LAB/TA - ING. CIVL

ENSAYO MARSHALL (INV. E-748-13) - CONCRETO ASFÁLTICO

PROYECTO	TESIS MAESTRÍA JORGE ROMERO - WILLIAM VALENCIA		
TEMPERATURA DE MEZCLA	140°C - 130°C - 120°C		
TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN	130°C - 120°C - 110°C		
No. DE GOLPES POR CAPA	75 GOLPES		
PROCEDENCIA AGREGADOS PETREOS	CONCRESCOL	Gs.A.PETREOS	2,64 - 2,52
TIPO DE CEMENTO ASFALTICO	60-70	Gs. ASFALTO	1,012

Briqueta No.	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
Tipo de Mezcla	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19
% Asfalto	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%
Altura Briqueta (cm)	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Peso briqueta en aire Seca (g)	1192	1194	1190	1191	1191	1174	1178	1173	1182	1184
Peso briqueta en aire SSS (g)	1194	1195	1192	1193	1192	1178	1183	1177	1186	1187
Peso briqueta en agua (g)	652	653	651	650	652	607	610	606	612	610
Lectura de carga (KN)	10,84	11,22	11,16	10,96	11,04	12,12	12,45	12,61	12,40	12,33
Flujo (1/100")	170	165	165	165	170	140	145	140	140	140

LA LECTURA DE CARGA SE DEBE MULTIPLICAR POR LA CONSTANTE DE CALIBRACION DEL ANILLO (45,1) PARA EXPRESAR LA ESTABILIDAD EN lb

OBSERVACIONES	46 A 50 = 120°C CONVENCIONAL
	51 A 55 = REEMPLAZO TAMIZ 1/2 Y 3/8 POR ESCORIA SIN ESTABILIZAR 140°C

Lab/ta:

Jay. Saeed S.

Reviso:

PINZ LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES



PINZ - LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES
INTERV. - INSPECT. - LAB/TA - ING. CIVL

ENSAYO MARSHALL (INV. E-748-13) - CONCRETO ASFÁLTICO

PROYECTO	TESIS MAESTRÍA JORGE ROMERO - WILLIAM VALENCIA		
TEMPERATURA DE MEZCLA	140°C - 130°C - 120°C		
TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN	130°C - 120°C - 110°C		
No. DE GOLPES POR CAPA	75 GOLPES		
PROCEDENCIA AGREGADOS PETREOS	CONCRESCOL	Gs.A.PETREOS	2,64 - 2,52
TIPO DE CEMENTO ASFALTICO	60-70	Gs. ASFALTO	1,012

Briqueta No.	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65
Tipo de Mezcla	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19
% Asfalto	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%
Altura Briqueta (cm)	7,1	7,0	7,1	7,0	7,1	7,2	7,2	7,1	7,1	7,2
Peso briqueta en aire Seca (g)	1122	1116	1129	1135	1125	1115	1121	1103	1113	1117
Peso briqueta en aire SSS (g)	1127	1122	1134	1140	1131	1120	1126	1108	1118	1122
Peso briqueta en agua (g)	559	555	563	563	562	517	519	509	516	517
Lectura de carga (KN)	11,54	11,23	11,34	11,20	11,43	10,32	10,55	10,25	10,33	10,42
Flujo (1/100")	150	145	145	145	150	160	160	160	155	160

LA LECTURA DE CARGA SE DEBE MULTIPLICAR POR LA CONSTANTE DE CALIBRACION DEL ANILLO (45,1) PARA EXPRESAR LA ESTABILIDAD EN lb

OBSERVACIONES	56 A 60 = REEMPLAZO TAMIZ 1/2 Y 3/8 POR ESCORIA SIN ESTABILIZAR 130°C
	61 A 65 = REEMPLAZO TAMIZ 1/2 Y 3/8 POR ESCORIA SIN ESTABILIZAR 120°C

Lab/ta:

Jay. S. S.

Reviso:

PINZ LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES



PINZ - LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES
INTERV. - INSPECT. - LAB/TA - ING. CIVL

ENSAYO MARSHALL (INV. E-748-13) - CONCRETO ASFÁLTICO

PROYECTO	TESIS MAESTRÍA JORGE ROMERO - WILLIAM VALENCIA		
TEMPERATURA DE MEZCLA	140°C - 130°C - 120°C		
TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN	130°C - 120°C - 110°C		
No. DE GOLPES POR CAPA	75 GOLPES		
PROCEDENCIA AGREGADOS PETREOS	CONCRESCOL	Gs.A.PETREOS	2,64 - 2,52
TIPO DE CEMENTO ASFALTICO	60-70	Gs. ASFALTO	1,012

Briqueta No.	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
Tipo de Mezcla	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19
% Asfalto	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%
Altura Briqueta (cm)	7,0	6,9	6,9	6,9	7,0	7,1	7,0	7,1	7,1	7
Peso briqueta en aire Seca (g)	1190	1186	1189	1192	1187	1175	1180	1183	1186	1177
Peso briqueta en aire SSS (g)	1194	1190	1195	1197	1192	1180	1184	1187	1190	1181
Peso briqueta en agua (g)	624	620	626	625	623	600	599	601	603	599
Lectura de carga (KN)	16,77	16,52	16,44	16,69	16,39	15,87	15,98	16,21	16,11	16,00
Flujo (1/100")	150	145	145	145	150	145	155	145	145	150

LA LECTURA DE CARGA SE DEBE MULTIPLICAR POR LA CONSTANTE DE CALIBRACION DEL ANILLO (45,1) PARA EXPRESAR LA ESTABILIDAD EN lb

OBSERVACIONES	66 A 70 = REEMPLAZO TAMIZ 1/2 Y 3/8 POR ESCORIA ESTABILIZADA
	140°C (CEMENTO)
	71 A 75 = REEMPLAZO TAMIZ 1/2 Y 3/8 POR ESCORIA ESTABILIZADA
	130°C (CEMENTO)

Lab/ta:

Jay. Saez

Revisó:

PINZ LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES



PINZ - LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES
INTERV. - INSPECT. - LAB/TA - ING. CIVIL

ENSAYO MARSHALL (INV. E-748-13) - CONCRETO ASFÁLTICO

PROYECTO	TESIS MAESTRÍA JORGE ROMERO - WILLIAM VALENCIA		
TEMPERATURA DE MEZCLA	140°C - 130°C - 120°C		
TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN	130°C - 120°C - 110°C		
No. DE GOLPES POR CAPA	75 GOLPES		
PROCEDENCIA AGREGADOS PETREOS	CONCRESCOL	Gs.A.PETREOS	2,64 - 2,52
TIPO DE CEMENTO ASFALTICO	60-70	Gs. ASFALTO	1,012

Briqueta No.	76	77	78	79	80					
Tipo de Mezcla	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19	MDC-19					
% Asfalto	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%	5,3%					
Altura Briqueta (cm)	7,1	7,1	7,0	7,0	7,1					
Peso briqueta en aire Seca (g)	1117	1125	1114	1131	1130					
Peso briqueta en aire SSS (g)	1122	1130	1118	1135	1134					
Peso briqueta en agua (g)	537	543	538	545	544					
Lectura de carga (KN)	15,12	14,86	15,23	15,15	14,98					
Flujo (1/100")	155	160	160	160	155					

LA LECTURA DE CARGA SE DEBE MULTIPLICAR POR LA CONSTANTE DE CALIBRACION DEL ANILLO (45,1) PARA EXPRESAR LA ESTABILIDAD EN lb

OBSERVACIONES	76 A 80 = REEMPLAZO POR ESCORIA DE 1/2 Y 3/8 ESTABILIZADA CON CEMENTO 120°C

Labita: Jay. S. S.

Reviso: PINZ LAB
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES

**ANEXO 3 . RESUMEN DE RESULTADOS ENSAYO A TRACCIÓN DIRECTA
CONDICIÓN SECA.**

Muestra	Convencional-150			1/2", 3/8"- E-150			1/2", 3/8"- E-C-150			Convencional-125			1/2", 3/8"- E-125		
	0 %			21 %			21 %			0 %			21 %		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Altura [cm]	6,40	6,46	6,45	6,83	6,88	6,85	6,95	7,00	6,94	6,59	6,60	6,58	6,97	6,95	6,94
	6,40	6,46	6,45	6,83	6,88	6,85	6,95	7,00	6,94	6,59	6,60	6,58	6,97	6,95	6,94
	6,40	6,46	6,45	6,83	6,88	6,85	6,95	7,00	6,94	6,59	6,60	6,58	6,97	6,95	6,94
	6,40	6,46	6,45	6,83	6,88	6,85	6,95	7,00	6,94	6,59	6,60	6,58	6,97	6,95	6,94
Altura Prom. [cm]	6,400	6,460	6,450	6,830	6,880	6,850	6,950	7,000	6,940	6,590	6,600	6,580	6,970	6,950	6,940
Diámetro [cm]	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16
Carga máx. [kN]	10,32	10,45	10,11	10,33	10,83	10,67	12,84	12,55	12,70	9,43	9,57	9,36	9,77	9,63	9,81
Resistencia [kPa]	1010,4	1013,6	982,1	947,7	986,3	976,0	1157,6	1123,4	1146,6	896,6	908,6	891,3	878,3	868,2	885,7
Resistencia prom. [kPa]	1002,0			970,0			1142,6			898,8			877,4		
Desviación [kPa]	17,3			20,0			17,5			8,8			8,8		
Desviación [%]	1,73			2,06			1,53			0,98			1,00		

Muestra	1/2", 3/8"- E-C-125			Convencional-125-H			1/2", 3/8"- E-125-H			1/2", 3/8"- E-C-125-H		
	21 %			0%			21 %			21 %		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Altura [cm]	6,94	6,92	6,91	6,55	6,53	6,55	6,92	6,90	6,93	6,90	6,92	6,90
	6,94	6,92	6,91	6,55	6,53	6,55	6,92	6,90	6,93	6,90	6,92	6,90
	6,94	6,92	6,91	6,55	6,53	6,55	6,92	6,90	6,93	6,90	6,92	6,90
	6,94	6,92	6,91	6,55	6,53	6,55	6,92	6,90	6,93	6,90	6,92	6,90
Altura Prom. [cm]	6,940	6,920	6,910	6,550	6,530	6,550	6,920	6,900	6,930	6,900	6,920	6,900
Diámetro [cm]	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16
Carga máx. [kN]	11,35	11,52	11,13	10,38	10,53	10,16	10,66	10,37	10,79	12,33	12,22	12,04
Resistencia [kPa]	1024,8	1043,1	1009,3	993,0	1010,4	971,9	965,2	941,7	975,6	1119,7	1106,5	1093,4
Resistencia prom. [kPa]	1025,7			991,8			960,9			1106,5		
Desviación [kPa]	16,9			19,3			17,4			13,2		
Desviación [%]	1,65			1,94			1,81			1,19		

**ANEXO 4 RESUMEN DE RESULTADOS ENSAYO A TRACCIÓN DIRECTA
CONDICIÓN HUMEDA.**

Muestra	Convencional-150			1/2", 3/8"- E-150			1/2", 3/8"- E-C-150			Convencional-125			1/2", 3/8"- E-125		
	0 %			21 %			21 %			0 %			21 %		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Altura [cm]	6,42	6,45	6,43	6,87	6,88	6,86	6,98	6,94	6,96	6,61	6,55	6,57	6,98	6,97	6,94
	6,42	6,45	6,43	6,87	6,88	6,86	6,98	6,94	6,96	6,61	6,55	6,57	6,98	6,97	6,94
	6,42	6,45	6,43	6,87	6,88	6,86	6,98	6,94	6,96	6,61	6,55	6,57	6,98	6,97	6,94
	6,42	6,45	6,43	6,87	6,88	6,86	6,98	6,94	6,96	6,61	6,55	6,57	6,98	6,97	6,94
Altura Prom. [cm]	6,420	6,450	6,430	6,870	6,880	6,860	6,980	6,940	6,960	6,610	6,550	6,570	6,980	6,970	6,940
Diámetro [cm]	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16
Carga máx. [kN]	8,66	8,39	8,70	8,34	8,23	8,05	10,84	10,72	11,00	7,44	7,23	7,61	7,35	7,29	7,40
Resistencia [kPa]	845,2	815,1	847,8	760,7	749,5	735,3	973,1	967,9	990,3	705,3	691,6	725,8	659,8	655,4	668,1
Resistencia prom. [kPa]	836,0			748,5			977,1			707,6			661,1		
Desviación [kPa]	18,2			12,7			11,7			17,2			6,5		
Desviación [%]	2,18			1,70			1,20			2,43			0,98		

Muestra	1/2", 3/8"- E-C-125			Convencional-125-H			1/2", 3/8"- E-125-H			1/2", 3/8"- E-C-125-H		
	21 %			0 %			21 %			21 %		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Altura [cm]	6,95	6,90	6,92	6,50	6,52	6,51	6,90	6,90	6,94	6,93	6,90	6,93
	6,95	6,90	6,92	6,50	6,52	6,51	6,90	6,90	6,94	6,93	6,90	6,93
	6,95	6,90	6,92	6,50	6,52	6,51	6,90	6,90	6,94	6,93	6,90	6,93
	6,95	6,90	6,92	6,50	6,52	6,51	6,90	6,90	6,94	6,93	6,90	6,93
Altura Prom. [cm]	6,950	6,900	6,920	6,500	6,520	6,510	6,900	6,900	6,940	6,930	6,900	6,930
Diámetro [cm]	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16
Carga máx. [kN]	9,57	9,56	9,27	8,54	8,25	8,63	8,11	8,19	8,32	10,33	10,69	10,40
Resistencia [kPa]	862,8	868,1	839,4	823,2	792,9	830,6	736,5	743,7	751,2	934,0	970,8	940,3
Resistencia prom. [kPa]	856,8			815,6			743,8			948,4		
Desviación [kPa]	15,3			20,0			7,4			19,6		
Desviación [%]	1,79			2,46			0,99			2,07		

**ANEXO 5. RESUMEN DE RESULTADOS ENSAYO CANTABRO DE PÉRDIDA
POR DESGASTE.**

	Convencional-150		Convencional-125		1/2", 3/8"- E-125-H		1/2", 3/8"- E-C-125-H	
Revoluciones	Masa [g]	Pérdida [%]	Masa [g]	Pérdida [%]	Masa [g]	Pérdida [%]	Masa [g]	Pérdida [%]
0	1195,2	0,00	1188,7	0,00	1152,1	0,00	1167	0,00
300	1127,9	5,63	1087,3	8,53	1047,5	9,08	1098,1	5,90
500	1079,9	9,65	1034,1	13,01	1001,3	13,09	1055,6	9,55
1000	987,4	17,39	941	20,84	899,9	21,89	977,6	16,23