UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA:
INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL

TEMA:
MEJORAMIENTO DE LA CARPETA ASFÁLTICA A BASE DE ESCORIA SIDERÚRGICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES (MEZCLA ASFÁLTICA)

AUTOR:
DANILO RAMIRO LÓPEZ CAIZA

TUTOR:
NELSON EDY ÁLVAREZ SÁNCHEZ

Quito, agosto del 2017

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo Danilo Ramiro López Caiza, con documento de identificación N° 171697817-4, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud que soy el autor del trabajo de titulación intitulado: MEJORAMIENTO DE LA CARPETA ASFÁLTICA A BASE DE ESCORIA SIDERÚRGICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES (MEZCLA ASFÁLTICA), mismo que ha sido desarrollado para optar el título de: ingeniero civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, agosto del 2017

Danilo Ramiro López Caiza

CI: 1716978174

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el articulo académico, MEJORAMIENTO DE LA CARPETA ASFÁLTICA A BASE DE ESCORIA SIDERÚRGICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES (MEZCLA ASFÁLTICA), realizado por Danilo Ramiro López Caiza, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, agosto del 2017

_____

Nelson Edy Álvarez Sánchez

CI: 1703661205

MEJORAMIENTO DE LA CARPETA ASFÁLTICA A BASE DE ESCORIA SIDERÚRGICA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES

(MEZCLA ASFÁLTICA)

IMPROVEMENT OF THE ASPHALT FOLDING BASED ON SCORIA STEEL FOR FLEXIBLE FLOORING

(ASPHALT MIXTURE)

Danilo López – Caiza [1], Nelson Álvarez – Sánchez [2]

Resumen

En nuestro país se han venido desarrollando investigaciones con el objetivo de mejorar el comportamiento y durabilidad de la carpeta asfáltica.
La facultad dirigió la investigación en la reutilización de escoria siderúrgica como parte del agregado, en la mezcla asfáltica, lo que derivó positivamente y sustentablemente su aplicabilidad técnica, científica, en un importante aporte al mejoramiento de sus características y sobre todo a su período de durabilidad.
Para el análisis del comportamiento de las mezclas, el estudio partió del diseño de una mezcla asfáltica en caliente (patrón) mediante el método Marshall, la misma que sirvió de referencia para la comparación de sus propiedades físico – mecánicas con respecto a

Abstract

In the world and in our country, research has been carried out in order to improve the behavior and durability of the asphaltic folder of the different roads designed for the intercommunication of the towns. From the asphaltic one, it is necessary to have the same effect as the one of the asphalt mixture, which is positively and sustainably derived from its technical and scientific applicability. Folder and especially to its period of durability.
For the analysis of the behavior of the mixtures, the study was based on the design of a hot asphalt mixture (standard) by the Marshall method, which served as reference for the comparison of its physical - mechanical properties with respect to asphalt mixtures added with Certain percentages by weight and / or volume of slag.

[1] Facultad de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Campus Sur – Quito, Ecuador – Autor para correspondencia: danilo.r.lopez.c@hotmail.com.
[2] Facultad de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Campus Sur – Quito, Ecuador – Magister en Ingeniería Vial

mezclas asfálticas adicionadas con ciertos porcentajes en peso y/o volumen de escoria.
Concluyendo en dos escenarios tentativos al compararlos con la muestra “A” (muestra patrón), para el diseño de la mezcla asfáltica con escoria siderúrgica, como son la muestra “B” y “E”.
Conforme a los resultados obtenidos y su relación a la Estabilidad – Fluencia, adecuada capaz de mantener su forma bajo cargas repetidas, haciendo de este un pavimento flexible idóneo para las carreteras del Ecuador. Se determinó la muestra “B” para su diseño.
Dicha muestra cumple con los parámetros de diseño establecidos con proporciones del 37.80% de agregado grueso (escoria), 48.87% de agregado intermedio – fino, 5.53% de Filler y un 7.8% de cemento asfáltico AC – 20. Permitiendo de esta manera dar una alternativa de solución en su reutilización y su problemática referente a su ubicación y depósito final de la escoria siderúrgica.

Mezcla Asfáltica: Recibe el nombre de aglomerado asfáltico y/o hormigón asfáltico y/o concreto bituminoso, por su conformación de agregados pétreos clasificados en proporciones idóneas y exactas, fusionadas uniformemente con un ligante como el cemento asfáltico o las emulsiones asfálticas. La función de las mezclas asfálticas, es de ofrecer una resistencia adecuada a las solicitaciones derivadas del tránsito vehicular.

Agregado Pétreo: Partículas de roca o agregados minerales, constituyen un mayor porcentaje de una mezcla asfáltica patrón, es de material duro e inerte, razón por la cual sus características son muy importantes

Concluding in two tentative scenarios when comparing them with sample "A" (standard sample), for the design of the asphalt mixture with steel slag, as sample "B" and "E".
According to the results obtained and its relation to Stability - Fluency, adequate able to maintain its shape under repeated loads, making this a flexible pavement suitable for Ecuadorian highways. Sample "B" was determined for its design.
This sample complies with the design parameters established with proportions of 37.80% of coarse aggregate (slag), 48.87% of intermediate - fine aggregate, 5.53% of Filler and 7.8% of AC - 20 asphalt cement.
Allowing this way to give an alternative solution in its reuse and its problematic concerning its location and final deposit of steel slag.

Asphalt Mixture: It receives the name of asphalt concrete and / or asphalt concrete and / or bituminous concrete, by its formation of stony aggregates classified in ideal and exact proportions, fused uniformly with a binder such as asphalt cement or asphalt emulsions. The function of the asphalt mixtures, is to offer adequate resistance to the stresses derived from vehicular traffic.

Aggregate Stoned: Rock particles or mineral aggregates, constitute a greater percentage of a standard asphalt mixture, is of hard and inert material, reason why its characteristics are very important for the final quality of the mixture. Slag Steel: Non-metallic rough material of mineral origin consisting of calcium silicates and ferrites, combined with iron, aluminum, calcium and magnesium fused oxides, by-product of the smelting and purification of metals, generated in steel kilns.

para la calidad final de la mezcla.

Escoria Siderúrgica: Material rugoso no metálico de origen mineral que se compone de silicatos de calcio y ferritas, combinados con óxidos fundidos de hierro, aluminio, calcio y magnesio, subproducto de la fundición y purificación de metales, generado en hornos siderúrgicos.

Cemento Asfáltico AC – 20: Cemento asfáltico obtenido del proceso de la separación del petróleo para aislar soluciones volátiles así como sus aceites. Su viscosidad varia con la temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelentes ligantes, pues al ser calentados se disuelven, lo que les permite cubrir totalmente las partículas del material pétreo proporcionando características de consistencia.

Slag Steel: Non-metallic rough material of mineral origin consisting of calcium silicates and ferrites, combined with iron, aluminum, calcium and magnesium fused oxides, by-product of the smelting and purification of metals, generated in steel kilns.

Asphaltic Cement AC - 20: Asphalt cement obtained from the process of petroleum distillation to separate volatile solvents and part of their oils. Its viscosity varies with temperature and between its components, the resins produce adhesion with the stony materials, being excellent binders, because when heated they dissolve, allowing them to completely cover the particles of the stone material providing consistency characteristics.

1 Introducción

En el Ecuador como en otros países, se ha podido observar que los pavimentos diseñados y construidos para nuestras vías no cumplen eficientemente con las especificaciones técnicas y normas establecidas para el efecto, razón por la cual podemos afirmar que las carpetas se deterioran prematuramente, ocasionando el encarecimiento de los mantenimientos y muchas veces el mal estado de la red vial.

Debido al deterioro prematuro que sufre esta carpeta y por lo tanto el alto costo en el mantenimiento ordinario, en especial en zonas de alta pluviosidad, el gobierno nacional está reemplazando la capa de rodadura de pavimento asfáltico por una carpeta de hormigón hidráulico. Este cambio de carpeta, implica también una incidencia importante en costos.

Esta realidad de la red vial del Ecuador, hace que desde la academia se busque alternativas para el mejoramiento de las propiedades físico – mecánicas de la carpeta de rodadura diseñada y construida de pavimento asfáltico.

1.1 Fundamentación

Las plantas generadoras de escoria siderúrgica y los gobiernos seccionales no han encontrado alguna forma de reutilización y de comercialización de estos desechos especiales producto de fundición del hierro a altas temperaturas, constituyendo en una problemática especial el asunto de ubicación y su depósito final.

En la actualidad las empresas dedicadas a la fundición metalúrgica están preocupadas en dar solución al depósito final de sus desechos (escoria), razón por la cual requieren de estudios, investigaciones y elaboración de proyectos que procuren el tratamiento y reúso de escorias generados de la fundición metálica.

1.2 Definiciones

Mediante la presente investigación se pretende reutilizar la escoria en el posible mejoramiento de las mezclas asfálticas en caliente, lo que derivará de ser positiva y sustentable su aplicabilidad técnica, científica y económica, en un importante aporte al mejoramiento de las características de la carpeta asfáltica y sobre todo a su período de durabilidad.

1.3 Revisión de Literatura

Estudios revisados demuestran que la escoria posee cualidades muy interesantes para su empleo en la carpeta asfáltica. Propiedades físico – mecánicas como: la dureza del material, grado de compactación, resistencia al desgaste, son propiedades que le dan rigidez y resistencia a la capa de rodadura, a más de propiedades hidráulicas como: la impermeabilidad, y velocidad de flujo, así como la forma angulosa de sus elementos, su limpieza por estar exentas de materia orgánica o terrosa, su buena adhesividad a los ligantes bituminosos y la rugosidad constante, son propiedades de interés en la técnica de los pavimentos [3].

Los principales precedentes propuestos al uso de la escoria fueron como agregado en los firmes de carreteras así como también en la construcción vial de varios países. El aumento de la producción y la evolución de las características estructurales de bases y pavimentos, han modificado las exigencias de este material industrial y ha dado lugar a una diversidad de usos.

En el campo obra pública y la edificación, las escorias podrían

utilizarse en la industria del cemento y como árido para hormigón.

1.4 Formulación de objetivos y establecimiento de hipótesis

1.4.1 Objetivos

Utilización de escoria siderúrgica, producto de la fundición de hierro como agregado de mezclas asfálticas en caliente, para el mejoramiento de las propiedades de la carpeta asfáltica en las vías de nuestro país.
Determinar, mediante el Método Marshall, bajo norma ASTM D1559 [1], las propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica a las cuales se les añade un porcentaje de escoria como parte de sus agregados.
Diseñar la mezcla asfáltica en diferentes proporciones de escoria para su respectiva comparación, entre una mezcla asfáltica normal y una mezcla asfáltica con el agregado de diferentes porcentajes de escoria siderúrgica.
Comparar las propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica patrón sin escoria con las propiedades de la mezcla asfáltica con porcentajes de escoria.
Determinar el porcentaje óptimo de escoria en la mezcla asfáltica.

1.4.2 Hipótesis

La adición de escoria siderúrgica a mezclas asfálticas en caliente, permite mejorar las propiedades físico-mecánicas de la carpeta de pavimento asfáltico y por lo tanto llegar al período de diseño y disminuir costos por mantenimientos ordinarios.
En definitiva, la implementación de nuevos agregados en la elaboración de mezclas asfálticas permitirá y garantizará la funcionalidad y durabilidad de las obras viales en el Ecuador.

2 Materiales y Métodos

2.1 Toma de muestras y procedimiento

Determinación de propiedades físico-mecánicas de los materiales en laboratorio

Los materiales propuestos en la mezcla asfáltica deben ser sometidos a una serie de ensayos en el laboratorio del cual se obtendrá información fundamental sobre las características, ya que es necesario conocer su naturaleza, así como el comportamiento físico-mecánico y de esta forma analizar la influencia que producen al ser integrados en el diseño de la mezcla asfáltica, de acuerdo a las normas MOP-001-F-2002.

Metodología del Muestreo - Método de Cuarteo

Es la forma de realizar un muestreo para los agregados previo al ensayo de granulometría. El objetivo es contar con agregados de características homogéneas.

2.1.1 Agregados

Los agregados pétreos, también conocidos como partículas de roca o agregados minerales, constituyen un mayor porcentaje de una mezcla patrón, es de material duro e inerte, razón por la cual sus características son muy importantes para la calidad final de la mezcla.
El proceso de trituración se lo realiza para obtener agregados de diferentes tamaños, los mismos que presentan mejores propiedades de adherencia de

acuerdo a la forma del agregado triturado.

El método de muestreo se lo realizará directamente en las pilas de almacenamiento de la planta trituradora RIPCONCIV, cuya planta proveedora trabaja bajo normas del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN).

Sus agregados fueron tomados en tres partes, la primera de la parte superior, la segunda del punto medio y la última del fondo de la pila de tal manera que represente un buen muestreo.

Se procedió a determinar sus características físico – mecánicas del material.

2.1.1.1 Granulometría y tamaño adecuado

La granulometría es una de las características más importantes de los agregados que afecta la estabilidad y funcionalidad de las mezclas

En las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes, MOP-001-F 2002, Tabla 405.5-1, establece requisitos de graduación de los agregados pétreos, donde la mezcla de los agregados pétreos deberá cumplir con los límites máximos y mínimos establecidos.

Tabla 1. Límites máximos y mínimos de graduación de los agregados

TAMIZ		Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices			
		3/4" 19.00 mm	1/2" 12.70 mm	3/8" 9.50 mm	Nº4 4.75 mm
1"	25.40 mm	100	-	-	-
3/4"	19.00 mm	90 - 100	100	-	-
1/2"	12.70 mm	-	90 - 100	100	-
3/8"	9.50 mm	56 - 80	-	90 - 100	100
Nº4	4.75 mm	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 -100
Nº8	2.36 mm	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100
Nº16	1.18 mm	-	-	-	40 - 80
Nº30	0.60 mm	-	-	-	25 - 65
Nº50	0.30 mm	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40
Nº100	0.15 mm	-	-	-	3 - 20
Nº200	0.075 mm	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10

Fuente: Normas MOP-001-F-2002

En las Tablas 2, 3, 4 y 6 se detallan las cantidades granulométricas, porcentajes de los agregados así como también de la escoria siderúrgica que serán utilizados en el diseño de la mezcla asfáltica, por medio del ensayo granulométrico.

Tabla 2. Granulometría del agregado grueso (3/4" – N°4)

GRANULOMETRÍA AGREGADO GRUESO							
TAMIZ	plg	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8
	mm	25.40	19.00	12.70	9.50	4.75	2.36
Peso Retenido Parcial	g	0	18	5214	2358	6132	2364
Peso Retenido Acumulado	g	0	18	5232	7572	8490	8496
Retenido	%	0.00	0.21	61.15	88.50	99.23	99.30
Que pasa	%	100.00	99.79	38.85	11.50	0.77	0.70
PESO TOTAL MUESTRA	=	8556	g				

GRANULOMETRÍA AGREGADO GRUESO							
TAMIZ	plg	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	Pasa N°200
	mm	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075	Pasa 0.075
Peso Retenido Parcial	g	6134	2366	6144	2370	6150	2406
Peso Retenido Acumulado	g	8498	8500	8510	8514	8520	8556
Retenido	%	99.32	99.35	99.46	99.51	99.58	100.00
Que pasa	%	0.68	0.65	0.54	0.49	0.42	0.00
PESO TOTAL MUESTRA	=	8556	g				

A continuación las Figuras 1, 2, 3, y 4 representan gráficamente las curvas granulométricas de los agregados y de la escoria siderúrgica, obtenidas de los ensayos granulométricos.

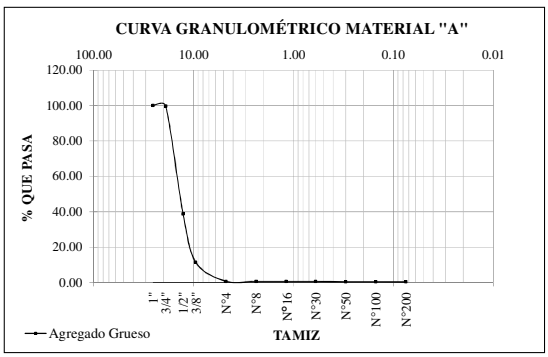

Figura 1. Curva granulométrica agregado grueso

Tabla 3. Granulometría del agregado intermedio (N°8 – N°200)

GRANULOMETRÍA AGREGADO INTERMEDIO							
TAMIZ	plg	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°16
	mm	19.00	12.70	9.50	4.75	2.36	1.18
Peso Retenido Parcial	g	0	4	6	1926	1522	2804
Peso Retenido Acumulado	g	0	4	10	1932	3448	4326
Retenido	%	0.00	0.07	0.17	32.05	57.20	71.77
Que pasa	%	100.00	99.93	99.83	67.95	42.80	28.23
PESO TOTAL MUESTRA	=	6028	g				

GRANULOMETRÍA AGREGADO INTERMEDIO						
TAMIZ	plg	N°30	N°50	N°100	N°200	Pasa N°200
	mm	0.60	0.30	0.15	0.075	Pasa 0.075
Peso Retenido Parcial	g	2044	3236	2308	3510	2518
Peso Retenido Acumulado	g	4848	5280	5544	5818	6028
Retenido	%	80.42	87.59	91.97	96.52	100.00
Que pasa	%	19.58	12.41	8.03	3.48	0.00
PESO TOTAL MUESTRA	=	6028	g			

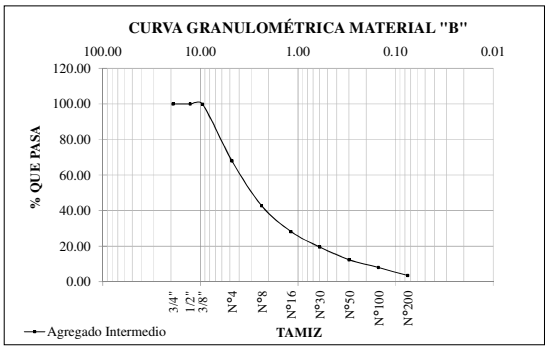

Figura 2. Curva granulométrica agregado intermedio

Tabla 4. Granulometría del agregado fino – arena
(N°50 – Pasa N°200)

GRANULOMETRÍA AGREGADO FINO - ARENA						
TAMIZ	plg	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°16
	mm	12.70	9.50	4.75	2.36	1.18
Peso Retenido Parcial	g	0	8.5	70.4	140.9	267.87
Peso Retenido Acumulado	g	0	8.5	78.9	211.3	408.77
Retenido	%	0.00	0.55	5.14	13.76	26.62
Que pasa	%	100.00	99.45	94.86	86.24	73.38
PESO TOTAL MUESTRA	=	1535.72	g			

GRANULOMETRÍA AGREGADO FINO - ARENA						
TAMIZ	plg	N°30	N°50	N°100	N°200	Pasa N°200
	mm	0.60	0.30	0.15	0.075	Pasa 0.075
Peso Retenido Parcial	g	384.2	645.41	666.82	788.92	746.8
Peso Retenido Acumulado	g	652.07	1029.61	1312.23	1455.74	1535.72
Retenido	%	42.46	67.04	85.45	94.79	100.00
Que pasa	%	57.54	32.96	14.55	5.21	0.00
PESO TOTAL MUESTRA	=	1535.72	g			

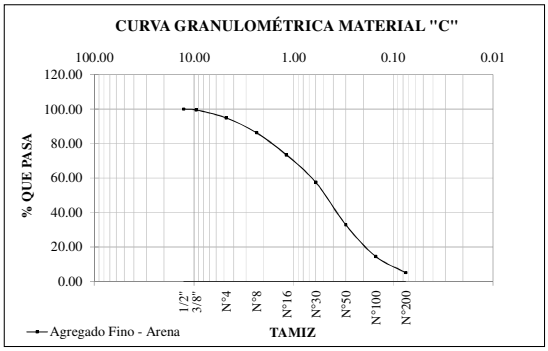

Figura 3. Curva granulométrica fino- arena

2.1.1.2 Ensayos de los agregados

Los agregados pétreos deben cumplir con ensayos que determinen propiedades físico – mecánicas y cumplir los límites establecidos en las normas de diseño:

Tabla 5. Ensayos de agregado grueso, intermedio, fino – arena

ENSAYO	AGREGADO				
	Unidad	Grueso	Intermedio	Fino - Arena	Max.	Normas
Gravedad Específica y Absorción	g/cm³	2.706	2.700	2.717	-	ASTM 12 ASTM C-129
Abrasión o Desgaste de los agregados	%	19.38	35.98	34.30	40.00	INEN 860 MOP-001-F-2002
Humedad de los agregados	%	4.95	7.18	3.87	-	ASTM C-566
Peso Volumétrico o Unitario	g/cm³	1.45	1.64	1.36	-	ASTM C-29

Fuente: Elaboración propia

2.1.2 Escoria siderúrgica

La escoria es un material no metálico derivado de la mezcla de óxidos y silicatos fundidos, subproducto de la fundición y purificación de metales, generado en hornos siderúrgicos.

El periodo de formación de la escoria es muy corto a diferencia de los agregados naturales [2].

Fueron obtenidos de la planta fundidora FUNTEIN ubicada en la Mitad del Mundo, cuya planta proveedora trabaja bajo normas metalográficas requeridas de acuerdo a las normas ASTM.

Se procedió a determinar sus características físico – mecánicas del material.

2.1.2.1 Granulometría y tamaño adecuado

Tabla 6. Granulometría del agregado fino – arena
(1" – Pasa N°200)

GRANULOMETRÍA ESCORÍA SIDERÚRGICA

TAMIZ	plg	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8
	mm	38.1	25.40	19.00	12.70	9.50	4.75	2.36
Peso Retenido Parcial	gr	0	900	3070	9810	6670	12800	7003.78
Peso Retenido Acumulado	gr	0	900	3970	12880	16480	19470	19803.8
Retenido	%	0.00	4.50	19.85	64.40	82.40	97.35	99.02
Que pasa	%	100.00	95.50	80.15	35.60	17.60	2.65	0.98
PESO TOTAL MUESTRA	=	20000	g					

GRANULOMETRÍA ESCORÍA SIDERÚRGICA

TAMIZ	plg	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	Pasa N°200
	mm	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075	Pasa 0.075
Peso Retenido Parcial	gr	12865	7017.58	12878.8	7035.38	12903.3	7096.71
Peso Retenido Acumulado	gr	19868.8	19882.6	19896.4	19914.2	19938.7	20000
Retenido	%	99.34	99.41	99.48	99.57	99.69	100.00
Que pasa	%	0.66	0.59	0.52	0.43	0.31	0.00
PESO TOTAL MUESTRA	=	20000	g				

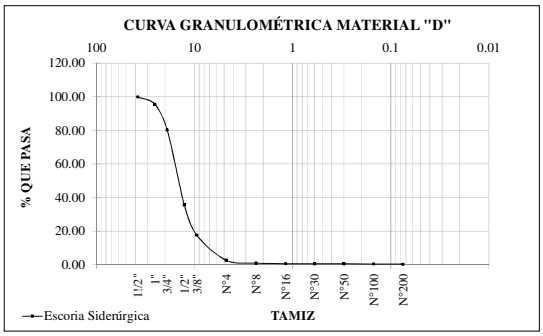

Figura 4. Curva granulométrica escoria siderúrgica

2.1.2.2 Ensayos de la escoria siderúrgica

La escoria siderúrgica debe cumplir con ensayos que determinen su calidad y verificar los límites establecidos en las normas y especificaciones de diseño:

Tabla 7. Ensayos de la escoria siderúrgica

ENSAYO	ESCORIA SIDERÚRGICA			
	Unidad	Material	Max.	Normas
Gravedad Específica y Absorción	g/cm³	2.584	-	ASTM 12 ASTM C-129
Abrasión o Desgaste de los agregados	%	34.30	40.00	INEN 860 MOP-001-F-2002
Humedad de los agregados	%	4.95	-	ASTM C-566
Peso Volumétrico o Unitario	g/cm³	1.02	-	ASTM C-29

2.1.3 Cemento Asfáltico AC – 20

Los asfaltos son sustancias de color negro o pardo oscuro, que pueden ser liquidas, semisólidas o sólidas, cuyos componentes son hidrocarburos solubles en sulfuro de carbono procedentes de yacimientos naturales u obtenidos como residuo del tratamiento de la destilación del petróleo, cuyas cualidades y propiedades físicas y químicas sean óptimos para un gran número de aplicaciones, como son en diseño de mezclas asfálticas, techos y otros usos especiales.

Fue obtenido de la planta asfáltica ECUFALTO, cuya planta proveedora trabaja bajo normas del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN).

Actualmente algunos países han reformado los parámetros del sistema para poder efectuar las especificaciones de acuerdo a sus necesidades.

En la Tabla 8 se presenta las especificaciones que se manejan actualmente en el Ecuador.

Tabla 8: Requisitos para clasificar el asfalto

ANÁLISIS Y VERIFICACIÓN SEGÚN ASTM D 3381

PARÁMETROS	Requerimiento AC - 20		ENSAYOS AL RESIDUO RTOF Requerimiento AR - 800	
	MIN	MAX	MIN	MAX
Punto de inflamación (°C)	232	-		
Viscosidad a 135°C (Centistokes)	300	-	400	-
Penetración a 25°C, 100g, 5s (1/10cm)	60	-	20	-
% Original de Penetración a 25°C, 100g, 5s (1/10cm)	-	-	50	-
Viscosidad a 60°C (Poises)	1600	2400	6000	10000
Ductilidad, 25°C, 5cm por minuto (cm)	100	-	75	-

Fuente: Normas MOP-001-F-2002

2.2 Mezcla asfáltica estándar

La mezcla estándar en el diseño asfáltico en caliente, es la más utilizada en Ecuador debido a que los componentes de la mezcla como: el ligante bituminoso y agregados incluyendo el polvo mineral, son sometidos a temperaturas que oscilan entre los 135ºC y 160ºC.

Para obtener el porcentaje tentativo de ligamento asfáltico se procede a la mezcla con los agregados (grueso,

intermedio y fino). La mezcla asfáltica debe permanecer dentro de la faja granulométrica de tolerancia, para ello debe tomarse en cuenta porcentajes apropiados de sus componentes cumpliendo normas y condiciones de diseño.

Tabla 9: Mezcla porcentual de agregados

MEZCLAS DE AGREGADOS							
TAMIZ	plg	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8
	mm	25.40	19.00	12.50	9.52	4.75	2.36
Material (Grueso)	A	100.00	99.79	38.85	11.50	0.77	0.70
Material (Intermedio)	B	100.00	100.00	99.93	99.83	67.95	42.80
Material (Fino - Arena)	C	100.00	100.00	100.00	99.45	94.86	86.24
MEZCLA		100.00	99.97	92.01	88.25	65.94	48.19
Retenido Acumulado	%	0.00	0.03	7.99	11.75	34.06	51.81
Retenido Parcial	%	0.00	0.03	7.96	3.76	22.31	17.76
Peso	g	0.00	0.33	95.56	45.07	267.71	213.08
Peso Acumulado	g	0.00	0.33	95.89	140.95	408.66	621.75
Especificación	Min	--	100	90	--	44	28
Especificación	Max	--	100	100	--	74	58
TAMIZ	plg	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8
	mm	25.40	19.00	12.70	9.52	4.75	2.36
Especificación	Min	100	100	90	71	44	28
Especificación	Max	100	100	100	90	74	58
TOLERANCIA	±	8%	8%	8%	7%	7%	6%
TAMIZ	plg	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8
	mm	25.40	19.00	12.50	9.52	4.75	2.36
Esp. Tolerancia	Min	108.00	107.97	99.37	94.43	70.56	51.08
Esp. Tolerancia	Max	92.00	91.97	84.65	82.08	61.33	45.30

MEZCLAS DE AGREGADOS							
TAMIZ	plg	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	Pasa N°200
	mm	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075	Pasa 0.075
Material (Grueso)	A	0.68	0.65	0.54	0.49	0.42	
Material (Intermedio)	B	28.23	19.58	12.41	8.03	3.48	
Material (Fino - Arena)	C	73.38	57.54	32.96	14.55	5.21	
MEZCLA		35.94	26.61	16.00	8.68	3.52	
Retenido Acumulado	%	64.06	73.39	84.00	91.32	96.48	3.52
Retenido Parcial	%	12.25	9.33	10.60	7.32	5.16	3.52
Peso	g	146.98	111.99	127.25	87.87	61.96	42.20
Peso Acumulado	g	768.73	880.72	1007.97	1095.84	1157.80	1200
Especificación	Min	--	--	5	--	2	--
Especificación	Max	--	--	21	--	10	--
TAMIZ	plg	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	Pasa N°200
	mm	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075	Pasa 0.075
Especificación	Min	17	11	5	3	2	
Especificación	Max	39	29	21	14	10	
TOLERANCIA	±	6%	5%	5%	4%	3%	
TAMIZ	plg	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	
	mm	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075	
Esp. Tolerancia	Min	38.10	27.94	16.80	9.03	3.62	
Esp. Tolerancia	Max	33.78	25.28	15.20	8.33	3.41	

Para la obtención del porcentaje tentativo de ligamento asfáltico se procedió a realizar iteraciones en su porcentaje de granulometría de cada material a utilizar en la mezcla, cumpliendo los límites de tolerancia máximos y mínimos establecidos por la norma MOP-001-F 2002.

Dando como resultado de las iteraciones, un 13% de material grueso, un porcentaje de 62% de material intermedio, y un 25% de material fino arena.

Tabla 10: Mezcla porcentual de agregados

PORCENTAJE DE LA MEZCLA			
Material (Grueso)	A	0.13	13%
Material (Intermedio)	B	0.62	62%
Material (Fino - Arena)	C	0.25	25%
PORCENTAJE		=	100%

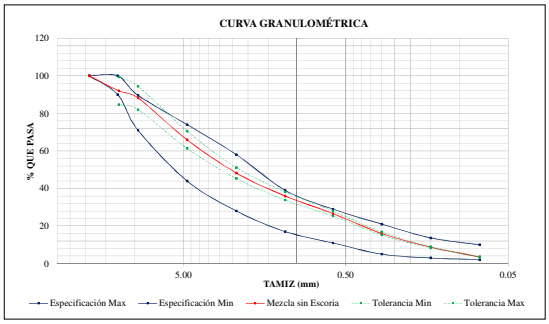

Figura 5: Curva granulométrica de la mezcla asfáltica patrón

Utilizaremos el Método Francés para obtener el área superficial o superficie especifica de los agregados (S), basado en el análisis granulométrico del agregado, dando directamente el porcentaje de cemento asfaltico, con respecto a la mezcla total, conforme a la siguiente relación [5].

$$S = 0.17G + 0.33g + 2.30A + 12a + 135f \quad (1)$$

Donde:

S = Área Superficial o Superficie Específica de los agregados
G = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz 1/2" y se retiene en el tamiz 3/4"
g = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz 3/8" y se retiene en el tamiz N° 4

A = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz Nº 4 y se retiene en el tamiz N° 50
a = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz Nº 50 y se retiene en el tamiz N° 200
f = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz Nº 200

Esta ecuación se empleó a partir de la combinación de los diferentes tipos de agregados, para de esta manera determinar el porcentaje de ligamento asfáltico:

Tabla 11: Método Francés para determinar el cemento asfáltico tentativo

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ASFALTO			
G	(mayor a 3/8) =	11.75 %	0.117
g	(3/8 - # 4) =	22.31 %	0.223
A	(# 4 - # 50) =	49.94 %	0.499
a	(# 50 - # 200) =	12.49 %	0.125
f	(menor a # 200) =	3.52 %	0.035
S	0.17G+0.33g+2.3A+12a+135f =	7.49	
M	(3.75 - 4.25) =	4.00	
P	$M * S^{\frac{1}{5}} =$	6.0 %	

$$P = M * (S)^{\frac{1}{5}} \qquad (2)$$

Donde:

P = Porcentaje de cemento asfáltico
M = Coeficiente de tráfico (3.75 – 4.25)

Se determinó de un porcentaje tentativo del 6% de cemento asfáltico. Para obtener el porcentaje de ligamento asfáltico se tomó como coeficiente de tráfico un valor de 4.00, cumpliendo el parámetro de trafico de (3.75 – 4.25), según las normas MOP-001-F 2002.
Según el Método Marshall el procedimiento para determinar el contenido óptimo de ligante asfáltico consisten en preparar una serie de briquetas con diferentes contenidos de asfalto que se basan en incrementos del ± 0.50%, 2 por encima y 2 por debajo del valor óptimo, de esta manera se determinó el porcentaje idóneo de ligamento asfáltico mediante la siguiente ecuación [1].

$$\%Asf = \frac{W_{asf}}{W_{agre} + W_{asf}} \qquad (3)$$

Tabla 12. Rango de contenidos de ligante asfáltico para el diseño de mezcla asfáltica

CONTENIDO DE AZFALTO PARA EL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE					
% de Asfalto AC20	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
Peso de Agregados	1140	1134	1128	1122	1116
Peso de Asfalto AC20	60.00	66.00	72.00	78.00	84.00

2.3 Mezcla asfáltica teórica

En nuestra investigación nos centraremos en el comportamiento de la mezcla asfáltica con diferentes porcentajes de variaciones granulométricas de escoria, para ello se partirá del promedio de los límites de tolerancia máximos y mínimos de la faja granulométrica, establecidos en la norma, de esta manera se obtendrá el porcentaje de ligamento asfáltico óptimo para el diseño de las briquetas [6].

Tabla 13: Mezcla porcentual de agregados

MEZCLAS DE AGREGADOS							
TAMIZ	plg	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8
	mm	25.40	19.00	12.70	9.50	4.75	2.36
Especificación	Min	100	100	90	71	44	28
Especificación	Max	100	100	100	90	74	58
MEZCLA	Int	100.00	100.00	95.00	80.25	59.00	43.00
Retenido Acumulado	%	0.00	0.00	5.00	19.75	41.00	57.00
Retenido Parcial	%	0.00	0.00	5.00	14.75	21.25	16.00
Peso	g	0.00	0.00	60.00	177.00	255.00	192.00
Peso Acumulado	g	0.00	0.00	60.00	237.00	492.00	684.00
TOLERANCIA	±	8%	8%	8%	7%	7%	6%
TAMIZ	plg	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8
	mm	25.40	19.00	12.50	9.52	4.75	2.36
Esp. Tolerancia	Min	108.00	108.00	102.60	85.87	63.13	45.58
Esp. Tolerancia	Max	92.00	92.00	87.40	74.63	54.87	40.42

MEZCLAS DE AGREGADOS							
TAMIZ	plg	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	Pasa N°200
	mm	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075	Pasa 0.075
Especificación	Min	17	11	5	3	2	--
Especificación	Max	39	29	21	14	10	--
MEZCLA	Int	27.55	20.00	13.00	8.30	6.00	
Retenido Acumulado	%	72.45	80.00	87.00	91.70	94.00	6.00
Retenido Parcial	%	15.45	7.55	7.00	4.70	2.30	6.00
Peso	g	185.40	90.60	84.00	56.40	27.60	72.00
Peso Acumulado	g	869.40	960.00	1044.00	1100.40	1128.00	1200.00
TOLERANCIA	±	6%	5%	5%	4%	3%	
TAMIZ	plg	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	
	mm	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075	
Esp. Tolerancia	Min	29.20	21.00	13.65	8.63	6.18	
Esp. Tolerancia	Max	25.90	19.00	12.35	7.97	5.82	

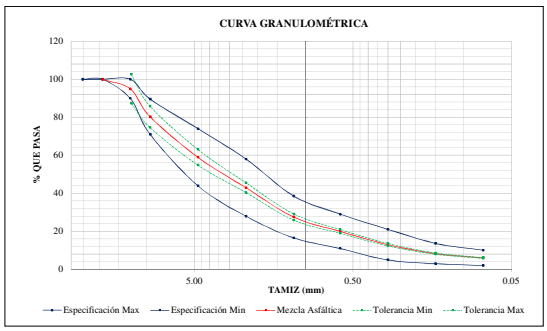

Figura 6: Curva granulométrica de la mezcla asfáltica teórica

Como se observa en la gráfica el diseño de la mezcla asfáltica a realizar, respetará las tolerancias máximas y mínimas de la franja granulométrica de diseño para la elaboración de las briquetas.

A continuación se procederá a determinar nuevamente el porcentaje óptimo de ligamento asfáltico con la condición previamente mencionada.

Tabla 14: Método Francés para determinar el cemento asfáltico tentativo

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE ASFALTO			
G	(mayor a 3/8) =	19.75 %	0.198
g	(3/8 - # 4) =	21.25 %	0.213
A	(# 4 - # 50) =	46.00 %	0.460
a	(# 50 - # 200) =	7.00 %	0.070
f	(menor a # 200) =	6.00 %	0.060
S	0.17G+0.33g+2.3A+12a+135f =	10.10	
M	(3.75 - 4.25) =	4.00	
P	$M * S^{\frac{1}{5}} =$	6.4 %	

El valor óptimo se tomará como 6.5%; para el diseño conforme lo establece la norma MOP-001-F 2002, en lo que se refiere a los límites y tolerancias se varió el contenido de asfalto en ± 0.50%, 2 veces por encima y 2 veces por debajo del valor óptimo, mismos que serán incluidos dentro del peso total de la muestra de 3600 gr, para la elaboración de 3 briquetas, de esta manera se determinó el porcentaje idóneo de ligamento asfaltico.

Tabla 15. Rango de contenidos de ligante asfáltico para el diseño de mezcla asfáltica

CONTENIDO DE AZFALTO PARA EL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE					
% de Asfalto AC20	5.5	6.0	6.5	7.0	7.0
Peso de Agregados	1134	1128	1122	1116	1110
Peso de Asfalto AC20	66.00	72.00	78.00	84.00	90.00

2.4 Estabilidad Marshall

La prueba Marshall es conocida para el diseño y control de mezclas asfálticas en caliente, el método de estabilidad y flujo, puede emplearse tanto para proyectos en el laboratorio como para control de obra, siendo una guía muy importante para determinar sus características volumétricas como mecánicas.

En el método Marshall se elaboran tres tipos de pruebas para conocer dichas características de la mezcla asfáltica.

Figura 7: Maquina Marshall
Fuente: Laboratorio Universidad Politécnica Salesiana

2.4.1 Determinación de las gravedades específicas de la mezcla de agregados y de las mezclas asfálticas

Se debe tomar tres pesos para la determinación de la gravedad específica; peso seco al aire, peso sumergido y peso saturado con superficie seca (SSS). El primer peso a tomarse es el peso seco, luego de esto se debe sumergir las muestras en agua a 25 ºC por 30 minutos para la determinación de los pesos restantes. Para el peso saturado con superficie seca se debe procurar eliminar el exceso de agua en la superficie de la briqueta.

2.4.2 Gravedad específica "Bulk" promedio del agregado total (Gagre)

Alcance: Con los datos de gravedades específicas de los agregados finos y gruesos que intervienen en la mezcla asfáltica se obtiene la gravedad específica de la masa de la mezcla total de agregados, considerándola como una masa comprimida sin vacíos.

$$\mathrm{Gagre} = \frac{100}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \ldots + \frac{P_n}{G_n}} \qquad (4)$$

Dónde:

P1,n = Porcentajes en peso de cada una de las fracciones de material que intervienen en el total del agregado
G1,n = Pesos específicos de los materiales a los que corresponden las fracciones anteriormente mencionadas

2.4.3 Gravedad específica máxima teórica de la muestra para cada porcentaje de asfalto (Gmt)

$$\mathrm{Gmt} = \frac{100}{\frac{\%\ \mathrm{Agre}}{\mathrm{Gagre}} + \frac{\%\ \mathrm{Asf}}{\mathrm{Gasf}}} \qquad (5)$$

Dónde:

% Agre = 100 - % Asf
Gagre = Gravedad específica bulk promedio del agregado total
% Asf = Porcentaje de cemento asfáltico
Gasf = Gravedad específica del cemento asfáltico

2.4.4 Volumen (V)

$$\mathrm{V} = \mathrm{Wss} - \mathrm{Ww} \qquad (6)$$

Dónde:

Wss = Peso de la muestra en aire en estado SSS
Ww = Peso de la muestra en el agua en estado SSS

2.4.5 Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada "Bulk" (Gb)

$$\mathrm{Gb} = \frac{\mathrm{Wa}}{\mathrm{Wss} - \mathrm{Ww}} \qquad (7)$$

Dónde:

Wa = Peso en el aire de la muestra seca
Wss = Peso de la muestra en aire en estado SSS
Ww = Peso de la muestra en el agua en estado SSS

2.4.6 Gravedad específica máxima teórica de la mezcla asfáltica suelta RICE (Gmm)

Alcance: Este método de ensayo llamado RICE determina la gravedad máxima de la mezcla asfáltica en laboratorio, según las normas AASHTO T 209 [7].

$$\mathrm{Gmm} = \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{A} + (\mathrm{B} - \mathrm{C})} \qquad (8)$$

Dónde:

A = Peso de la muestra seca en el aire
B = Peso del recipiente (matraz) lleno con agua a 25º
C = Peso del recipiente (matraz) con agua y muestra a 25ºC

2.4.7 Volumen de los agregados, para cada porcentaje de cemento asfáltico (Vagre)

$$\mathrm{Vagre} = \frac{\%\mathrm{Agre} * \mathrm{Gmb}}{\mathrm{Gagre}} \qquad (9)$$

Dónde:

%Agre = Porcentaje de agregado = % total - % asfalto utilizado
Gmb = Bulk promedio de las 3 briquetas de mezcla asfáltica
Gagre = Gravedad específica Bulk del agregado

2.4.8 Porcentaje total de vacíos con respecto al volumen total de la briqueta (Vv)

$$\mathrm{Vv} = 1 - \left(\frac{\mathrm{Gmb}}{\mathrm{Gmm}}\right) * 100 \qquad (10)$$

Dónde:

Gmb = Bulk promedio de las 3 briquetas de mezcla asfáltica
Gmm = Gravedad específica máxima teórica de la mezcla asfáltica

2.4.9 Volumen de asfalto como porcentaje del volumen total de la briqueta (Va)

$$\mathrm{Va} = 100 - \mathrm{Vagre} - \mathrm{Vv} \qquad (11)$$

Dónde:

Vagre = Volumen de los agregados, para cada porcentaje de cemento asfáltico
Vv = Porcentaje total de vacíos con respecto al volumen total de la briqueta

2.4.10 Porcentaje de vacíos en los agregados minerales en la mezcla compactada (VAM)

El VAM es una expresión de la proporción volumétrica de vacíos y el volumen de los agregados de la mezcla compactada. La cantidad de asfalto requerida para un agregado específico, se relaciona íntimamente con el VAM.

$$\mathrm{VAM} = 100 - \mathrm{Vagre} \qquad (12)$$

Dónde:

Vagre= Volumen de los agregados, para cada porcentaje de cemento asfáltico

2.4.11 Volumen efectivo de asfalto en la mezcla compactada (Vea)

$$\mathrm{Vea} = \frac{\mathrm{Va}}{\mathrm{VAM}} * 100 \qquad (13)$$

Dónde:

Va = Volumen de asfalto como porcentaje del volumen total de la briqueta
VAM = Porcentaje de vacíos en los agregados minerales en la mezcla compactada

2.5 Prueba de Estabilidad y Flujo

Se procede a la prueba de estabilidad y flujo, que consiste en sumergir las briquetas en baño María a 60 ºC ± 1 ºC durante 30 minutos antes de ser sometido al ensayo Marshall
Posteriormente, se aplica la carga de prueba a la briqueta a una deformación constante de 51 mm (2") por minuto, hasta la falla. El punto de falla se define por la lectura de carga máxima obtenida.
El número total de Newtons (lb) requeridos para que se produzca la falla de la briqueta deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall.
Mientras la prueba de estabilidad está en proceso, se deberá mantener el medidor de flujo sobre la barra guía y cuando la carga empiece a disminuir se registrar la lectura como valor de flujo final. La discrepancia de valores de flujo final e inicial, son expresados en unidades del sistema internacional (S.I.) 0.254 mm, y en unidades del sistema inglés (1/100"), será el valor del flujo Marshall.
La estabilidad de las muestras asfálticas medidas en el equipo Marshall deberán ser corregidas en función del volumen (cm³); los valores de corrección se encuentran en la siguiente Tabla 9, según Normas AASHTO T 245 – 97 (2004); NLT 159

Tabla 16: Factor de corrección de la estabilidad

CORRECCIÓN DE LOS VALORES DE ESTABILIDAD		
VOLUMEN DE LA BRIQUETA (cm³)	ESPESOR APROXIMADO DE LA BRIQUETA (cm)	FACTOR DE CORRECCIÓN
200 – 213	2.54	5.56
214 – 225	2.70	5.00
226 – 237	2.86	4.55
238 – 250	3.02	4.17
251 – 264	3.17	3.85
265 – 276	3.33	3.57
277 – 289	3.49	3.33
290 – 301	3.65	3.03
302 – 316	3.81	2.78
317 – 328	3.97	2.50
329 – 340	4.13	2.27
341 – 353	4.29	2.08
354 – 367	4.44	1.92
368 – 379	4.60	1.79
380 – 392	4.76	1.67
393 – 405	4.92	1.56
406 – 420	5.08	1.47
421 – 431	5.24	1.39
432 – 443	5.40	1.32
444 – 456	5.56	1.25
457 – 470	5.71	1.19
471 – 482	5.87	1.14
483 – 495	6.03	1.09
496 – 508	6.19	1.04
509 – 522	6.35	1.00
523 – 535	6.51	0.96
536 – 546	6.67	0.93
547 – 559	6.82	0.89
560 – 573	6.96	0.86
574 – 585	7.14	0.83
586 – 598	7.30	0.81
599 – 610	7.46	0.78
611 – 625	7.62	0.76

Fuente: Normas MOP-001-F-2002

Con los valores medios de la Estabilidad corregida, Flujo, Porcentaje de Vacíos de la mezcla, Porcentaje de Vacíos llenos con Cemento Asfáltico, VAM y Peso Específico Bulk, para cada contenido de cemento asfáltico se dibujan los siguientes gráficos:

- Porcentaje de Vacíos en la Mezcla Total (Vv) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico
- Densidad Marshall (BULK) vs Porcentaje de Asfalto
- Porcentaje de vacíos en los áridos (VAM) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico
- Porcentaje de Volumen Efectivo de Asfalto (Vea) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico
- Estabilidad Marshall vs Porcentaje de Cemento Asfáltico

- Deformación (FLUJO) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico

En cada gráfico, se tomará como referencia los puntos hallados, se traza una línea continua y suave y se obtienen los valores corregidos, leídos sobre la curva, para cada tanto por ciento de asfalto.
A continuación se mostrarán los cálculos y resultados obtenidos así como los gráficos de todas las propiedades Marshall.

Tabla 17: Método Marshall para diseño de mezclas asfálticas

METODO MARSHALL PARA DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

BRIQUETA Nº	CEMENO ASFÁLTICO		MEZCLA		PESO ESPECÍFICO (g/cm³)		
	Porcentaje (% Asf)	Peso Específico (Gasf)	Clasificación MATERIAL	Porcentaje (Pn) (% Agre)	Material (Gn)	Promedio Total (Gagre)	Máximo Teórico (Gmt)
1			Grueso	13.00	2.706		
2			Intermedio	62.00	2.700		
3			Fino - Arena	25.00	2.717		
PROMEDIO	5.5	1.015		100.00		2.705	2.359
4			Grueso	13.00	2.706		
5			Intermedio	62.00	2.700		
6			Fino - Arena	25.00	2.717		
PROMEDIO	6.0	1.015		100.00		2.705	2.332
7			Grueso	13.00	2.706		
8			Intermedio	62.00	2.700		
9			Fino - Arena	25.00	2.717		
PROMEDIO	6.5	1.015		100.00		2.705	2.306
10			Grueso	13.00	2.706		
11			Intermedio	62.00	2.700		
12			Fino - Arena	25.00	2.717		
PROMEDIO	7.0	1.015		100.00		2.705	2.280
13			Grueso	13.00	2.706		
14			Intermedio	62.00	2.700		
15			Fino - Arena	25.00	2.717		
PROMEDIO	7.5	1.015		100.00		2.705	2.254
16			Grueso	13.00	2.706		
17			Intermedio	62.00	2.700		
18			Fino - Arena	25.00	2.717		
PROMEDIO	8.0	1.010		100.00		2.705	2.228
ESPECIFICACIONES	±0,5						

METODO MARSHALL PARA DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

BRIQUETA Nº	PESO MUESTRA (gramos)			VOLUMEN (cm³)	DENSIDAD (g/cm³)		VOLUMEN (%) DEL TOTAL
	Seco en Aire (Wa)	Saturado Superficie Seca (Wss)	Sumergido Agua (Ww)		BULK (Gb) (Gmb)	Máximo Medido RICE (Gmm)	Asfalto (Vasf)
1	1197.0	1209.0	656.0	553.00	2.165		
2	1104.0	1108.0	614.0	494.00	2.235		
3	1111.0	1113.0	613.0	500.00	2.222		
PROMEDIO					2.207	2.429	11.960
4	1098.0	1102.0	601.0	501.00	2.192		
5	1101.2	1102.5	606.0	496.50	2.218		
6	1101.6	1102.6	603.7	498.90	2.208		
PROMEDIO					2.206	2.400	13.040
7	1094.6	1097.1	604.1	493.00	2.220		
8	1093.6	1094.4	606.2	488.20	2.240		
9	1098.1	1098.7	603.3	495.40	2.217		
PROMEDIO					2.226	2.390	14.253
10	1090.2	1090.5	615.8	474.70	2.297		
11	1099.7	1100.6	606.2	494.40	2.224		
12	1089.2	1089.8	607.9	481.90	2.260		
PROMEDIO					2.260	2.381	15.589
13	1101.2	1101.5	615.9	485.60	2.268		
14	1099.8	1100.2	613.7	486.50	2.261		
15	1099.6	1099.9	617.3	482.60	2.278		
PROMEDIO					2.269	2.372	16.766
16	1101.0	1101.3	617.9	483.40	2.278		
17	1110.9	1111.2	616.8	494.40	2.247		
18	1099.5	1099.8	618.5	481.30	2.284		
PROMEDIO					2.270	2.362	17.978
ESPECIFICACIONES							

METODO MARSHALL PARA DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

BRIQUETA Nº	VOLUMEN (%) DEL TOTAL		PESO UNITARIO (lbs/pie³)	VACIOS (%)			
	vs Volumen Total (Vagre)	Mezcla Total Vacíos con Aire (Vv)		Asfalto Efectivo (Va)	Vacíos Agregado Mineral (VAM)	Vol. Efectivo asfalto (Vea)	Llenos de Asfalto (VAF)
1							
2							
3							
PROMEDIO	81.594	9.140	137.725	9.266	18.406	50.342	64.977
4							
5							
6							
PROMEDIO	81.547	8.089	137.646	10.364	18.453	56.164	70.665
7							
8							
9							
PROMEDIO	82.279	6.894	138.880	10.828	17.721	61.099	80.428
10							
11							
12							
PROMEDIO	83.563	5.064	141.048	11.373	16.437	69.192	94.838
13							
14							
15							
PROMEDIO	83.879	4.326	141.582	11.795	16.121	73.164	104.001
16							
17							
18							
PROMEDIO	83.906	3.917	141.628	12.177	16.094	75.660	111.706
ESPECIFICACIONES		3 - 5			> 15	65 - 75	

METODO MARSHALL PARA DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

BRIQUETA Nº	ESTABILIDAD				FLUJO	
	MEDIDA		Factor Corrección	Corregida (lbf)	MEDIDA	
	Medida (kN)	Medida (lbf)			(mm)	(1/100")
1	9.189	2065.769	0.89	1838.535	2.443	10
2	13.811	3104.836	1.09	3384.272	2.378	9
3	15.160	3408.104	1.04	3544.428	2.427	10
PROMEDIO				2922.411		10
4	9.643	2167.833	1.04	2254.546	2.202	9
5	14.680	3300.195	1.04	3432.203	2.953	12
6	17.310	3891.443	1.04	4047.101	2.139	8
PROMEDIO				3244.617		10
7	12.150	2731.429	1.09	2977.257	2.522	10
8	15.039	3380.902	1.09	3685.183	2.866	11
9	16.417	3690.688	1.04	3838.316	2.105	8
PROMEDIO				3500.252		10
10	16.215	3645.277	1.14	4155.616	2.794	11
11	9.823	2208.298	1.09	2407.045	2.814	11
12	13.340	2998.951	1.14	3418.804	2.680	11
PROMEDIO				3327.155		11
13	16.023	3602.114	1.09	3926.304	2.806	11
14	11.891	2673.203	1.09	2913.791	2.745	11
15	14.956	3362.243	1.09	3664.844	2.809	11
PROMEDIO				3501.647		11
16	16.015	3600.315	1.09	3924.344	2.825	11
17	12.881	2895.764	1.09	3156.383	2.723	11
18	14.936	3357.746	1.14	3827.831	2.739	11
PROMEDIO				3636.186		11
ESPECIFICACIONES				> 2200		8 - 14

Tabla 18: Datos del Ensayo Marshall

DATOS PARA LAS GRAFICAS DE MARSHALL

BRIQUETA Nº	Porcentaje (% Asf)	BULK (Gmb)	Vacíos con Aire (Vv)	Vacíos Agregado Mineral (VAM)	Vol. Efectivo asfalto (Vea)	ESTABILIDAD Corregido (lbf)	FLUJO (1/100")
1 - 2 - 3	5.5	2.207	9.140	18.406	50.342	2922.411	10
4 - 5 - 6	6.0	2.206	8.089	18.453	56.164	3244.617	10
7 - 8 - 9	6.5	2.226	6.894	17.721	61.099	3500.252	10
10 - 11 - 12	7.0	2.260	5.064	16.437	69.192	3327.155	11
13 - 14 - 15	7.5	2.269	4.326	16.121	73.164	3501.647	11
16 - 17 - 18	8.0	2.247	3.917	16.094	75.660	3636.186	11
ESPECIFICACIONES	±0,5		3 - 5	> 14	65 - 75	> 2200	8 - 14

2.5.1 Parámetros de Diseño Marshall

La selección del contenido óptimo del cemento asfáltico depende de muchos discernimientos. El punto de partida para

el diseño, es elegir el porcentaje de asfalto del promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4%. Todas las propiedades calculadas bajo éste contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas Tabla 19. Si se cumplen todos los criterios, entonces se asumirá el diseño preliminar de la mezcla, de no cumplirse, se hará ajustes de diseño a la mezcla [4].

Tabla 19: Datos del Ensayo Marshall

ESPECIFICACIONES DE DISEÑO PARA EL MÉTODO MARSHALL		
Método Marshall	Tráfico pesado Carpeta y Base	
Criterio de mezcla	Min	Max
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes	75	
Estabilidad, (lbf)	2200	-
Flujo, (0.25mm) (0.01in)	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5
Porcentaje de VAM	14	-
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	65	75

Fuente: Aspectos de diseño volumétrico de mezclas asfálticas

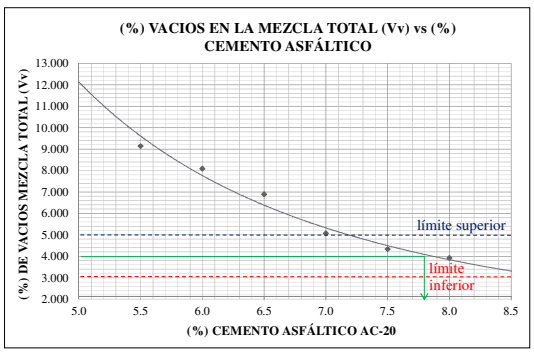

Figura 8: Porcentaje de Vacíos en la Mezcla Total (Vv) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico

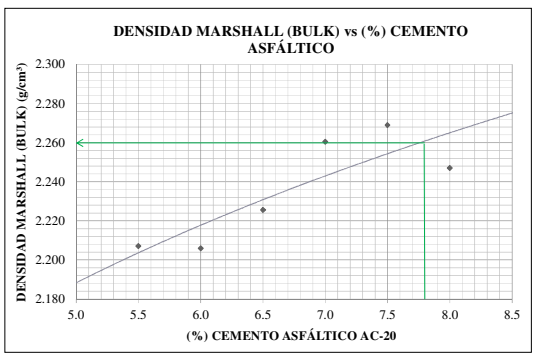

Figura 9: Densidad Marshall (BULK) vs Porcentaje de Asfalto

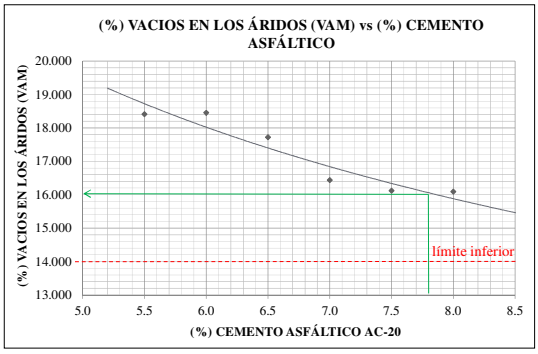

Figura 10: Porcentaje de vacíos en los áridos (VAM) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico

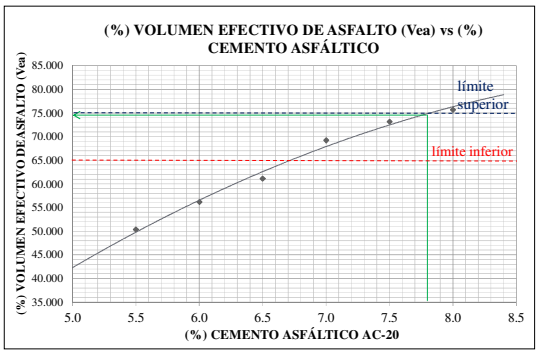

Figura 11: Porcentaje de Volumen Efectivo de Asfalto (Vea) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico

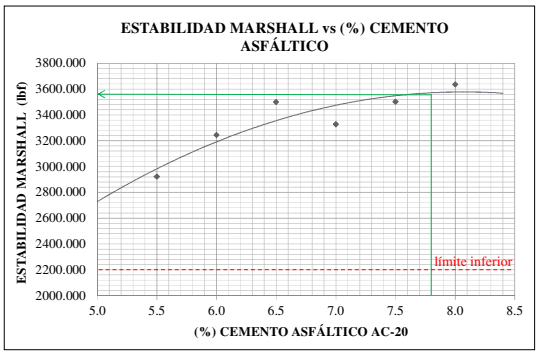

Figura 12: Estabilidad Marshall vs Porcentaje de Cemento Asfáltico

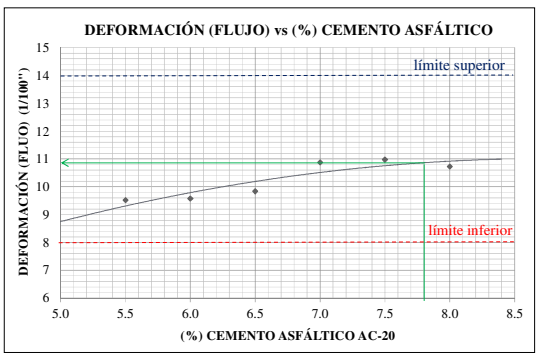

Figura 13: Deformación (FLUJO) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico

Siguiendo los parámetros de Diseño Marshall se determinó un 7.8% de cemento asfáltico AC – 20 apropiado partiendo del promedio de los límites de vacíos de aire (Figura 8), el mismo que cumple con los parámetros para la elaboración de la mezcla asfáltica.

2.6 Diseño de mezcla asfáltica con diferentes porcentajes de escoria

Los diferentes tipos de mezclas asfálticas que van a ser incluidos en el presente estudio dependen del porcentaje granulométrico de la escoria siderúrgica que va a intervenir en el diseño de mezcla asfáltica en caliente por Método Marshall.

Se realizará la mezcla de agregados pétreos con escoria en porcentajes obtenidos mediante la faja granulométrica de tolerancia, agregando en la mezcla el ligante asfáltico definido, se triplicarán las briquetas por cada muestra, dando una totalidad de 15 muestras por cada variación granulométrica de escoria.

A continuación se realizará cuatro muestras asfálticas con diferentes variaciones de porcentajes de escoria, que detallaremos a continuación:

Para la primera muestra (mezcla patrón) se realizará en su totalidad con agregados de material pétreo, es decir 37.80% de agregado grueso, 48.87% de agregado intermedio – fino, 5.53% de Filler y con 7.8% de ligamento asfaltico.

Tabla 20. Muestra "A" (mezcla patrón) sin escoria

BRIQUETA SIN ESCORIA - MUESTRA "A"							
TAMIZ	plg	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8
	mm	25.40	19.00	12.70	9.50	4.75	2.36
Peso	g	0.00	0.00	55.32	163.19	235.11	177.02
Peso Acumulado	g	0.00	0.00	55.32	218.51	453.62	630.65
Retenido Parcial	%	0.00	0.00	4.61	13.60	19.59	14.75
Retenido Acumulado	%	0.00	0.00	4.61	18.21	37.80	52.55
Peso de Asfalto AC20							
Peso Total	g						

BRIQUETA SIN ESCORIA - MUESTRA "A"							
TAMIZ	plg	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	Pasa N°200
	mm	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075	Pasa 0.075
Peso	g	170.94	83.53	77.45	52.00	25.45	66.38
Peso Acumulado	g	801.59	885.12	962.57	1014.57	1040.02	1106.40
Retenido Parcial	%	14.24	6.96	6.45	4.33	2.12	5.53
Retenido Acumulado	%	66.80	73.76	80.21	84.55	86.67	92.20
Peso de Asfalto AC20							93.60
Peso Total	g						1200.00

Para la segunda muestra se realizará con 37.80% de agregado grueso (escoria), 48.87% de agregado intermedio – fino, 5.53% de Filler y con 7.8% de ligamento asfaltico.

Tabla 21. Muestra "B" con escoria de agregado grueso

BRIQUETA CON ESCORIA (AGREGADO GRUESO) - MUESTRA "B"							
TAMIZ	plg	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8
	mm	25.40	19.00	12.70	9.50	4.75	2.36
Peso	g	0.00	0.00	55.32	163.19	235.11	177.02
Peso Acumulado	g	0.00	0.00	55.32	218.51	453.62	630.65
Retenido Parcial	%	0.00	0.00	4.61	13.60	19.59	14.75
Retenido Acumulado	%	0.00	0.00	4.61	18.21	37.80	52.55
Peso de Asfalto AC20							
Peso Total	g						

BRIQUETA CON ESCORIA (AGREGADO GRUESO) - MUESTRA "B"							
TAMIZ	plg	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	Pasa N°200
	mm	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075	Pasa 0.075
Peso	g	170.94	83.53	77.45	52.00	25.45	66.38
Peso Acumulado	g	801.59	885.12	962.57	1014.57	1040.02	1106.40
Retenido Parcial	%	14.24	6.96	6.45	4.33	2.12	5.53
Retenido Acumulado	%	66.80	73.76	80.21	84.55	86.67	92.20
Peso de Asfalto AC20							93.60
Peso Total	g						1200.00

Para la tercera muestra se realizará con 37.80% de agregado grueso, 48.87% de agregado intermedio – fino (escoria), 5.53% de Filler y con 7.8% de ligamento asfaltico.

Tabla 22. Muestra "C" con escoria de agregado intermedio

BRIQUETA CON ESCORIA (AGREGADO INTERMEDIO) - MUESTRA "C"							
TAMIZ	plg	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8
	mm	25.40	19.00	12.70	9.50	4.75	2.36
Peso	g	0.00	0.00	55.32	163.19	235.11	177.02
Peso Acumulado	g	0.00	0.00	55.32	218.51	453.62	630.65
Retenido Parcial	%	0.00	0.00	4.61	13.60	19.59	14.75
Retenido Acumulado	%	0.00	0.00	4.61	18.21	37.80	52.55
Peso de Asfalto AC20							
Peso Total	gr						

BRIQUETA CON ESCORIA (AGREGADO INTERMEDIO) - MUESTRA "C"							
TAMIZ	plg	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	Pasa N°200
	mm	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075	Pasa 0.075
Peso	g	170.94	83.53	77.45	52.00	25.45	66.38
Peso Acumulado	g	801.59	885.12	962.57	1014.57	1040.02	1106.40
Retenido Parcial	%	14.24	6.96	6.45	4.33	2.12	5.53
Retenido Acumulado	%	66.80	73.76	80.21	84.55	86.67	92.20
Peso de Asfalto AC20							93.60
Peso Total	gr						1200.00

Para la cuarta muestra se realizará con 37.80% de agregado grueso, 48.87% de agregado intermedio – fino, 5.53% de Filler (escoria) y con 7.8% de ligamento asfaltico.

Tabla 23. Muestra "D" con escoria de Filler

BRIQUETA CON ESCORIA (FILLER) - MUESTRA "D"							
TAMIZ	plg	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8
	mm	25.40	19.00	12.70	9.50	4.75	2.36
Peso	g	0.00	0.00	55.32	163.19	235.11	177.02
Peso Acumulado	g	0.00	0.00	55.32	218.51	453.62	630.65
Retenido Parcial	%	0.00	0.00	4.61	13.60	19.59	14.75
Retenido Acumulado	%	0.00	0.00	4.61	18.21	37.80	52.55
Peso de Asfalto AC20							
Peso Total	gr						

BRIQUETA CON ESCORIA (FILLER) - MUESTRA "D"							
TAMIZ	plg	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	Pasa N°200
	mm	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075	Pasa 0.075
Peso	g	170.94	83.53	77.45	52.00	25.45	66.38
Peso Acumulado	g	801.59	885.12	962.57	1014.57	1040.02	1106.40
Retenido Parcial	%	14.24	6.96	6.45	4.33	2.12	5.53
Retenido Acumulado	%	66.80	73.76	80.21	84.55	86.67	92.20
Peso de Asfalto AC20							93.60
Peso Total	gr						1200.00

Para la quinta muestra se realizará en su totalidad con material a base de escoria siderúrgica es decir 37.80% de agregado grueso (escoria), 48.87% de agregado intermedio – fino (escoria), 5.53% de Filler (escoria) y con 7.8% de ligamento asfaltico.

Tabla 24. Muestra "E" con escoria en su totalidad

BRIQUETA CON ESCORIA - MUESTRA "E"							
TAMIZ	plg	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8
	mm	25.40	19.00	12.70	9.50	4.75	2.36
Peso	g	0.00	0.00	55.32	163.19	235.11	177.02
Peso Acumulado	g	0.00	0.00	55.32	218.51	453.62	630.65
Retenido Parcial	%	0.00	0.00	4.61	13.60	19.59	14.75
Retenido Acumulado	%	0.00	0.00	4.61	18.21	37.80	52.55
Peso de Asfalto AC20							
Peso Total	g						

BRIQUETA CON ESCORIA - MUESTRA "E"							
TAMIZ	plg	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200	Pasa N°200
	mm	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075	Pasa 0.075
Peso	g	170.94	83.53	77.45	52.00	25.45	66.38
Peso Acumulado	g	801.59	885.12	962.57	1014.57	1040.02	1106.40
Retenido Parcial	%	14.24	6.96	6.45	4.33	2.12	5.53
Retenido Acumulado	%	66.80	73.76	80.21	84.55	86.67	92.20
Peso de Asfalto AC20							93.60
Peso Total	g						1200.00

De esta manera se procedió a la elaboración de 15 briquetas, distribuidas en 5 grupos de tres, incluido a cada una de las muestras diferentes porcentajes de escoria siderúrgica, con un 7.8% de cemento asfaltico como idóneo y óptimo para su preparación.

Tabla 25: Método Marshall para diseño de mezclas asfálticas

METODO MARSHALL PARA DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS							
BRIQUETA Nº	CEMENO ASFÁLTICO		MEZCLA		PESO ESPECÍFICO (g/cm³)		
	Porcentaje (% Asf)	Peso Específico (Gasf)	Clasificación MATERIAL	Porcentaje (Pn) (% Agre)	Material (Gn)	Promedio Total (Gagre)	Máximo Teórico (Gmt)
A1			Grueso	13.00	2.706		
A2			Intermedio	62.00	2.700		
A3			Fino - Arena	25.00	2.717		
PROMEDIO	7.8	1.015		100.00		2.705	2.239
B1			Grueso	13.00	2.706		
B2			Intermedio	62.00	2.700		
B3			Fino - Arena	25.00	2.717		
PROMEDIO	7.8	1.015		100.00		2.705	2.239
C1			Grueso	13.00	2.706		
C2			Intermedio	62.00	2.700		
C3			Fino - Arena	25.00	2.717		
PROMEDIO	7.8	1.015		100.00		2.705	2.239
D1			Grueso	13.00	2.706		
D2			Intermedio	62.00	2.700		
D3			Fino - Arena	25.00	2.717		
PROMEDIO	7.8	1.015		100.00		2.705	2.239
E1			Grueso	13.00	2.706		
E2			Intermedio	62.00	2.700		
E3			Fino - Arena	25.00	2.717		
PROMEDIO	7.8	1.015		100.00		2.705	2.239
ESPECIFICACIONES	±0.5						

METODO MARSHALL PARA DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

BRIQUETA Nº	PESO MUESTRA (gramos)			VOLUMEN (cm³)	DENSIDAD (g/cm³)		VOLUMEN (%) DEL TOTAL Asfalto (Vasf)
	Seco en Aire (Wa)	Saturado Superficie Seca (Wss)	Sumergido Agua (Ww)		BULK (Gb) (Gmb)	Máximo Medido RICE (Gmm)	
A1	1096.1	1096.2	622.6	473.53	2.315		
A2	1039.7	1039.9	586.7	453.22	2.294		
A3	1099.7	1099.8	624.0	475.77	2.311		
PROMEDIO					2.307	2.395	17.727
B1	1097.7	1097.9	621.5	476.39	2.304		
B2	1096.3	1096.4	614.9	481.46	2.277		
B3	1096.1	1096.3	619.9	476.42	2.301		
PROMEDIO					2.294	2.386	17.628
C1	1095.3	1095.4	630.8	464.52	2.358		
C2	1093.8	1093.8	634.2	459.63	2.380		
C3	1095.0	1095.1	633.0	462.12	2.370		
PROMEDIO					2.369	2.381	18.206
D1	1079.4	1079.5	617.5	461.96	2.337		
D2	1091.6	1091.6	628.0	463.60	2.355		
D3	1085.4	1085.4	620.2	465.21	2.333		
PROMEDIO					2.341	2.390	17.993
E1	1093.9	1093.9	626.6	467.38	2.340		
E2	1091.6	1091.8	626.9	464.92	2.348		
E3	1066.9	1066.9	612.0	454.95	2.345		
PROMEDIO					2.344	2.400	18.016
ESPECIFICACIONES							

METODO MARSHALL PARA DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

BRIQUETA Nº	VOLUMEN (%) DEL TOTAL		PESO UNITARIO (lbs/pie³)	VACIOS (%)			
	vs Volumen Total (Vagre)	Mezcla Total Vacíos con Aire (Vv)		Asfalto Efectivo (Va)	Vacíos Agregado Mineral (VAM)	Vol. Efectivo asfalto (Vea)	LLenos de Asfalto (VAF)
A1							
A2							
A3							
PROMEDIO	85.276	3.694	143.939	11.030	14.724	74.909	120.391
B1							
B2							
B3							
PROMEDIO	84.804	3.845	143.142	11.351	15.196	74.695	116.003
C1							
C2							
C3							
PROMEDIO	87.580	0.500	147.829	11.920	12.420	95.975	146.583
D1							
D2							
D3							
PROMEDIO	86.558	2.051	146.104	11.391	13.442	84.740	133.858
E1							
E2							
E3							
PROMEDIO	86.671	2.315	146.294	11.015	13.329	82.635	135.163
ESPECIFICACIONES		3 - 5			> 15	65 - 75	

METODO MARSHALL PARA DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

BRIQUETA Nº	ESTABILIDAD				FLUJO	
	MEDIDA		Factor Corrección	Corregida (lbf)	MEDIDA	
	Medida (kN)	Medida (lbf)			(mm)	(1/100")
A1	16.001	3597.168	1.14	4100.771	2.941	12
A2	11.916	2678.823	1.25	3348.529	3.4	13
A3	16.874	3793.426	1.14	4324.506	3.155	12
PROMEDIO				3924.602		12
B1	11.698	2629.815	1.14	2997.989	3.309	13
B2	11.979	2692.986	1.14	3070.004	3.067	12
B3	13.485	3031.549	1.14	3455.965	3.252	13
PROMEDIO				3174.653		13
C1	9.802	2203.577	1.19	2622.257	3.384	13
C2	10.291	2313.509	1.19	2753.076	3.451	14
C3	10.486	2357.347	1.19	2805.242	4.117	16
PROMEDIO				2726.858		14
D1	10.157	2283.384	1.19	2717.227	3.937	16
D2	12.756	2867.663	1.19	3412.519	3.437	14
D3	12.603	2833.267	1.19	3371.588	4.916	19
PROMEDIO				3167.111		16
E1	14.889	3347.180	1.19	3983.145	3.199	13
E2	15.056	3384.723	1.19	4027.821	3.275	13
E3	12.907	2901.609	1.25	3627.011	3.185	13
PROMEDIO				3879.326		13
ESPECIFICACIONES				> 2200		8 - 14

Tabla 26: Datos del Ensayo Marshall

DATOS PARA LAS GRAFICAS DE MARSHALL

BRIQUETA Nº	Porcentaje (% Asf)	BULK (Gmb)	Vacíos con Aire (Vv)	Vacíos Agregado Mineral (VAM)	Vol. Efectivo asfalto (Vea)	ESTABILIDAD Corregido (lbf)	FLUJO (1/100")
A	7.8	2.307	3.694	14.724	74.909	3924.602	12
B	7.8	2.294	3.845	15.196	74.695	3174.653	13
C	7.8	2.369	0.500	12.420	95.975	2726.858	14
D	7.8	2.341	2.051	13.442	84.740	3167.111	16
E	7.8	2.344	2.315	13.329	82.635	3879.326	13
ESPECIFICACIONES	±0.5		3 - 5	> 14	65 - 75	> 2200	8 - 14

3 Resultados y Discusión

Porcentaje de Vacíos en la Mezcla Total (Vv) vs Porcentaje de Escoria Siderúrgica

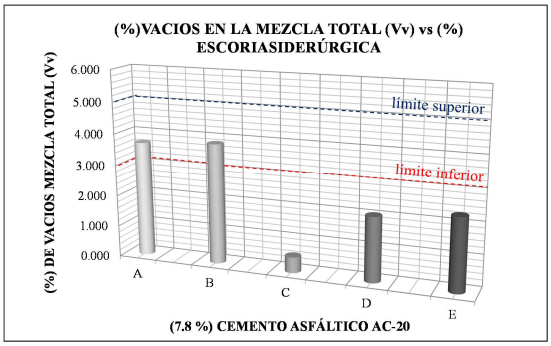

Figura 14: Porcentaje de Vacíos en la Mezcla Total (Vv) vs Porcentaje de Escoria Siderúrgica

La Figura 14 nos permite comparar la variación de vacíos (Vv) que existe entre una mezcla patrón y las muestras que contienen escoria, siendo la muestra "C" una mezcla que no cumple con los parámetros de diseño Marshall establecidos por las normas MOP-001-F 2002, teniendo la muestra "B" como una mezcla apta para el diseño.

Densidad Marshall (BULK) vs Escoria Siderúrgica

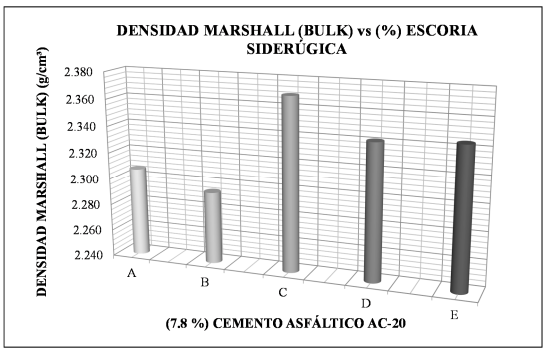

Figura 15: Densidad Marshall (BULK) vs Escoria Siderúrgica

La Figura 15 compara la variación Bulk que existe entre una mezcla patrón "A" y muestras que contienen escoria, siendo la más evidente la muestra "C", con su

alto contenido en su densidad en sus briquetas debido a su mínimo contenido de vacíos.

Porcentaje de Vacíos en los Áridos (VAM) vs Porcentaje de Escoria Siderúrgica

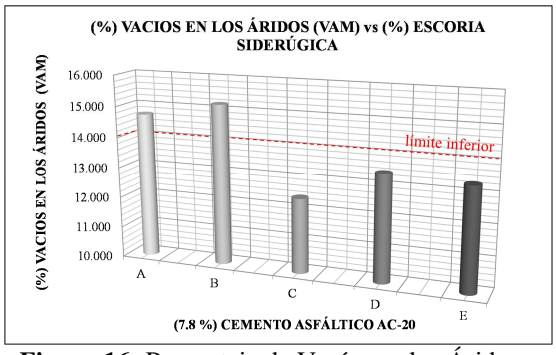

Figura 16: Porcentaje de Vacíos en los Áridos (VAM) vs Porcentaje de Escoria Siderúrgica

La Figura 16 se compara la variación de vacíos en los áridos (VAM) que existe entre una mezcla patrón "A" y las muestras que contienen escoria, siendo más evidente en la muestra "C", no apta para el diseño por su inferior contenido de densidad Bulk debido a su alto contenido de porcentaje en su volumen total, tomando como óptimo para el diseño la muestra "B".

Porcentaje de Volumen Efectivo de Asfalto (Vea) vs Porcentaje de de Escoria Siderúrgica

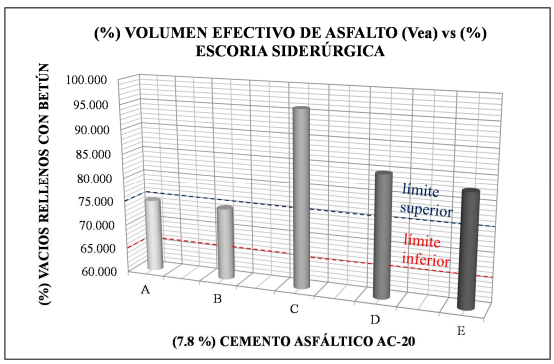

Figura 17: Porcentaje de Volumen Efectivo de Asfalto (Vea) vs Porcentaje de de Escoria Siderúrgica

La Figura 17 compara el volumen efectivo de asfalto (Vea) que existe entre una mezcla patrón "A" y las muestras que contienen escoria, siendo no apto para el diseño la muestra "C" por su alto contenido en el volumen de asfalto, tomando como óptimo la muestra "B", ya que cumple parámetros de diseño mínimos y máximos establecidos para el diseño para su diseño.

Estabilidad Marshall vs Porcentaje de Escoria Siderúrgica

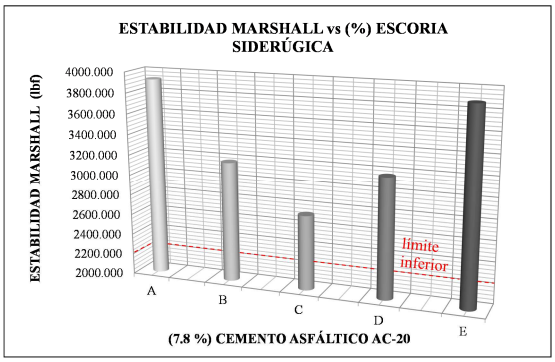

Figura 18: Estabilidad Marshall vs Porcentaje de Escoria Siderúrgica

La Figura 18 compara la variación de Estabilidad que existe entre una mezcla patrón "A" y muestras que contienen escoria, tomando como optimas las muestras "B", "C", "D" por poseer una Estabilidad regular ante las demás muestras. Una estabilidad regular permitirá a los pavimentos tener menores rigideces ante cargas de tráfico, evitando de esta manera, futuros agrietamientos a los mismos.

Deformación (FLUJO) vs Porcentaje de Escoria Siderúrgica

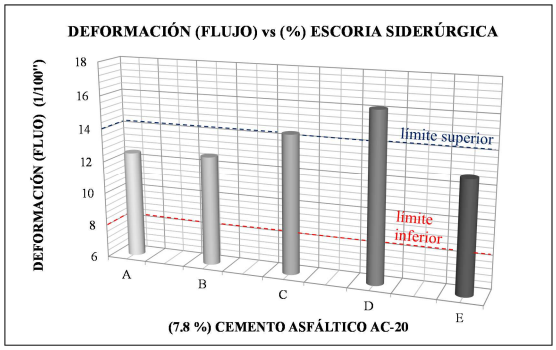

Figura 19: Deformación (FLUJO) vs Porcentaje de Escoria Siderúrgica

La Figura 19 compara la variación de Flujo que existe entre una mezcla patrón "A" y las muestras que contienen escoria, siendo la muestra "D" no apta para diseño, por superar el parámetro de diseño establecido, tomando como óptimos las muestra "B", "E" cumplen con los parámetros para la elaboración de la mezcla, por otro lado la muestra "C" está al límite de flujo, cualquier variación puede hacer que se salga de lo establecido.

Al realizar y comparar los resultados obtenidos entre la mezcla asfáltica patrón sin escoria siderúrgica y la mezcla asfáltica con escoria siderúrgica podemos apreciar la variación de sus características físico – mecánicas, conforme va existiendo una variación porcentual de la escoria siderúrgica como agregado dentro de la mezcla asfáltica, obteniendo de esta manera resultados, según las normas MOP - 001-F 2002 para su respectivo análisis y discusión.

4 Conclusiones

Estabilidad Marshall vs Deformación Flujo

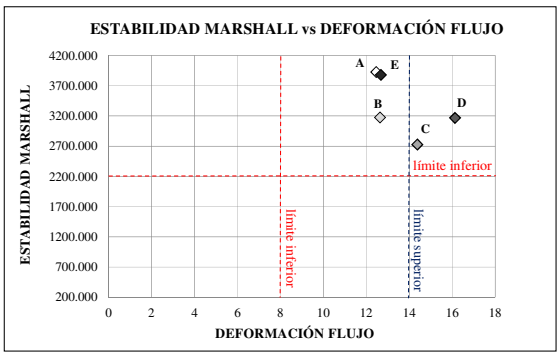

Figura 20: Estabilidad Marshall vs Deformación Flujo

Una vez elaboradas las diferentes mezclas asfálticas en caliente con diferentes porcentajes de escoria siderúrgica, se ha podido establecer conclusiones y recomendaciones acordes a los diferentes ensayos realizados para esta investigación. Para estas conclusiones y recomendaciones se evaluó los diferentes ensayos y resultados más representativos de este estudio. Se referenció tanto con normas nacionales ecuatorianas como la (MOP-001-F-2002) tanto como internacionales como la ASTM.

Mediante la Figura 20 podemos concluir que existen dos escenarios tentativos al compararlos con la muestra "A" (muestra patrón), para el diseño de la mezcla asfáltica con escoria siderúrgica, como son la muestra "B" y "E" siendo la más evidente la muestra "B" para su diseño. Dicha cumple con los parámetros de diseño establecido con una combinación del 37.80% de agregado grueso (escoria), 48.87% de agregado intermedio – fino, 5.53% de Filler y un 7.8% de cemento asfáltico AC – 20, presentando en esta mezcla una Estabilidad y Fluencia adecuada capaz

de mantener su forma bajo cargas repetidas, haciendo de este un pavimento flexible idóneo para las carreteras del Ecuador.

También se puede decir que se optó por la muestra "B" debido a que sus costos de producción con respecto a su granulometría serán bajos por su mínimo proceso de trituración de escoria, ya que se trabajaría con granulometrías entre (1"- N° 4).

El contenido óptimo de cemento asfaltico AC – 20 de la mezcla fue del 7.8%, este porcentaje dependió mucho de sus características del agregado tales como la granulometría y la capacidad de absorción, siendo la granulometría directamente proporcional con el contenido óptimo del asfalto.

Si sobrepasáramos el contenido óptimo de asfalto produciríamos una película demasiado gruesa sobre las partículas del agregado, lo cual resultaría en pérdida de fricción entre ellas, produciendo inestabilidad, desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señales que indicarán deficiente proceso de diseño de la mezcla asfáltica.

Con respecto al agregado podemos concluir que entre más finos sean sus agregados, mayor será el área superficial a cubrir, requiriendo de esta manera mayor cantidad de asfalto. Por otro lado en agregados gruesos existirá menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total a cubrir.

5 Ventajas

La escoria en una mezcla asfáltica posee excelentes propiedades de afinidad con el cemento asfáltico, lo cual significa muy poca abrasión y erosión de la mezcla, ante los efectos del clima y tráfico.

La escoria tiene la capacidad de retener el calor en períodos de tiempo más largos que los agregados naturales tradicionales, es una característica ventajosa en las mezclas asfálticas, ya que conservará la temperatura por mayor tiempo.

La característica física de los agregados de escoria siderúrgica, como es su angulosidad áspera en su textura superficial, adecuada compacidad produce una estabilidad y flujo que ubica a la mezcla dentro de las especificaciones y normativas de diseño, reduciendo en gran parte ahuellamientos y canalización en la superficie en el pavimento asfáltico.

Estudios realizados por la Universidad Militar Nueva Granada Bogotá – Colombia revelan que el uso de escoria en mezclas asfálticas, brinda a los pavimentos características de mayor desempeño con respecto a los elaborados con agregados tradicionales como son: alta resistencia al deslizamiento a lo largo de su vida de servicio.

6 Recomendaciones

Una recomendación de mayor relevancia puede ser que para el diseño de mezclas asfálticas, se debe verificar mediante ensayos previos en los laboratorios la buena calidad de los materiales a emplear, los cuales deberán cumplir normas y especificaciones de diseño

Al ensayar la mezcla con Filler de escoria dio buenos resultados pero su obtención demanda grandes costos debido al proceso de trituración que demandaría realizar con ese diseño de muestra.

El problema principal en la fabricación de mezclas con estos áridos (escoria siderúrgica) es la falta de finos (Filler) en la fracción más pequeña.

Razón por la cual se recomienda que para futuros proyectos en la implementación con dicho agregado,

realizar el proceso de trituración en una planta trituradora de agregados, para que de esta manera alcanzar el objetivo de una agregado más fino como es el caso del Filler.

Para un fortalecimiento en el conocimiento del comportamiento de la escoria siderúrgica en el diseño de una mezcla asfáltica en caliente, se recomienda continuar y profundizar aún más los estudios, ya sea éste, su aplicación en las carreteras del Ecuador, para conocer y obtener datos de su comportamiento ante las cargas sometidas por el tránsito vehicular.

Para aceptar a la escoria siderúrgica como agregado en la estructura del pavimento, la norma ecuatoriana MOP 001-F-2002 cita algunos ensayos tales como: ensayo de adhesividad, ensayo de daño causado por agua, inmersión y lavado con sulfato de sodio, entre otros. Su previo estudio permitiría una mayor referencia de sus características físico – mecánicas con respectos a las ya prescritas en las normas ecuatorianas.

Se recomienda realizar estudios de compactación a largo plazo o por envejecimiento, aplicando las muestras (tipo) realizadas en esta investigación, para de esta manera complementar el estudio del uso de escoria en la carpeta asfáltica.

7 Agradecimientos

A mi familia, a mi esposa Silvia Toapanta e hija Doménica López, quienes con su apoyo incondicional son mi razón de lucha mi fuerza y mi motivación, dos pilares fundamentales para alcanzar mis metas.

Y en especial agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana, a sus autoridades y docentes, personas a quienes aprecio mucho por brindarme la oportunidad de estudiar y por su competencia para formarnos no solamente en el ámbito profesional, sino también en el ámbito personal.

8. Referencias

[1] D-1559, A. (s.f.). Método Marhall.

[2] Dudley, C. B. (1923). American Society for Testing and Materials. *Normas ASTM*. Pennsylvania, Estados Unidos.

[3] López, V. O. (Diciembre de 2011). Aprovechamiento de escorias blancas (LFS) y negras (EAFS) de acería eléctrica en la estabilización de suelos y en capas de firmes de caminos rurales. Burgos.

[4] Paul Garnica Anguas, H. D. (2004). Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfáltias. Sanfandila.

[5] Piura, U. d. (2006). Diseño de mezclas asfálticas. 77. Peru.

[6] Públicas, R. d. (2002). *Especificaciones Generales para la Construción de Caminos y Puentes*. Quito.

[7] T-209, A. (s.f.). Método RICE.