



# UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

*La Universidad Católica de Loja*

## ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**Uso de escoria siderúrgica en la elaboración de mezclas asfálticas con agregados de la localidad**

TRABAJO DE TITULACIÓN.

**AUTOR:** Aucapiña Araque, Jamil Alejandro

**DIRECTORA:** Ortiz Viñan, Ana Paulina, M.Sc.

LOJA-ECUADOR

2020



*Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NC-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>*

2020

## **APROBACIÓN DE LA DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Magister.

Ana Paulina Ortiz Viñan

### **DOCENTE DE LA TITULACIÓN**

De mi consideración:

En el presente trabajo de titulación: Uso de escoria siderúrgica en la elaboración de mezclas asfálticas con agregados de la localidad, realizado por Aucapiña Araque, Jamil Alejandro, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, mayo de 2020

f).....

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo, Aucapiña Araque, Jamil Alejandro declaro ser autora del presente trabajo de titulación: Uso de escoria siderúrgica en la elaboración de mezclas asfálticas con agregados de la localidad, de la Titulación Ingeniería Civil, siendo M.Sc. Ana Paulina Ortiz Viñan directora del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f.....

Autor: Aucapiña Araque, Jamil Alejandro

Cédula: 1106074428

## **DEDICATORIA**

Dedico esta investigación al desarrollo de la Ingeniería Civil y la construcción sostenible, esperando que este documento sirva de guía para la implementación de metodologías y diseños que reduzcan el daño que día a día el campo laboral de nuestra profesión causa al planeta.

Dedico además este documento a todos los estudiantes o profesionales que usen mi trabajo como referencia para ampliar la investigación en esta maravillosa rama de la ingeniería.

## **AGRADECIMIENTO**

Primeramente, doy gracias a Dios por permitirme tener tan buena experiencia dentro mi universidad, gracias a mi familia por apoyarme en cada decisión y proyecto, gracias a cada maestro que hizo parte del proceso integral de formación.

A mis amigos y compañeros con quienes compartí dentro y fuera de las aulas, especialmente a Carlos Escudero, quien fue mi compañero durante el proceso experimental de mi investigación.

A mi directora de tesis, Mgtr. Ana Ortiz, quien fue de guía y apoyo incondicional durante todo el proceso que conlleva culminar con esta etapa en mi formación profesional.

Agradezco de manera especial a la empresa ANDEC S.A. y al Municipio de Loja, por proporcionarme el material de necesario para el desarrollo experimental de esta investigación.

Finalmente agradezco a quien lee este apartado de mi tesis, por permitir que mis experiencias, investigaciones y conocimiento, incurra dentro de su repertorio de información.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA.....	I
APROBACIÓN DE LA DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	II
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS .....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO .....	V
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	IX
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
ESTADO DEL ARTE .....	5
MATERIALES Y MÉTODOS .....	9
2.1. <i>Materiales</i> .....	10
2.1.1.    Agregados y Material Bituminoso.....	10
2.1.2.    Escoria Siderúrgica.....	10
2.1.3.    Equipo de laboratorio.....	11
2.1.3.1.    Viscosímetro rotacional Brookfield.....	11
2.1.3.2.    Equipo fluorescencia de rayos X HP.....	11
2.1.3.3.    Conjunto de equipo de Copa Abierta Cleveland. ....	12
2.1.3.4.    Martillo de compactación de briquetas Marshall.....	13
2.1.3.5.    Ensayador de Estabilidad Marshall.....	13
2.1.3.6.    Equipo para densidad RICE.....	14
2.2. <i>Métodos</i> .....	14
2.2.1.    Caracterización de agregados minerales y escoria siderúrgica. ....	15
2.2.2.    Caracterización del material bituminoso.....	16
2.2.3.    Composición Química de la Escoria siderúrgica. ....	17
2.2.4.    Diseño de la mezcla asfáltica sin sustitución de agregados. ....	17
2.2.5.    Densidad específica Bulk y densidad RICE.....	18
2.2.6.    Estabilidad Marshall.....	18
2.2.7.    Selección del contenido óptimo de asfalto.....	19
2.2.8.    Sustitución porcentual de agregados por escoria siderúrgica.....	20
2.2.9.    Selección del contenido óptimo de sustitución.....	21
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	22

3.1.	<i>Diseño de la mezcla sin sustitución (BFS 0)</i> .....	23
3.1.1.	Porcentaje de vacíos de aire (Pa) .....	23
3.1.2.	Densidad Bulk .....	23
3.1.3.	Vacío de agregado mineral (VMA) .....	24
3.1.4.	Vacíos llenados de asfalto (VFA) .....	24
3.1.5.	Estabilidad Marshall .....	25
3.1.6.	Flujo Marshall .....	26
3.1.7.	Ecuación de contenido preliminar de asfalto .....	26
3.1.8.	Selección del contenido óptimo. ....	26
3.2.	<i>Sustitución porcentual de agregados por escoria siderúrgica.</i> .....	27
3.2.1.	Porcentaje de vacíos en diseños con sustitución. ....	27
3.2.2.	Densidad Bulk en diseños con sustitución .....	27
3.2.3.	Vacíos llenados de asfalto (VFA) en diseños con sustitución .....	28
3.2.4.	Flujo Marshall en diseños con sustitución .....	30
3.2.5.	Resumen de resultados. ....	30
3.2.6.	Análisis económico .....	31
CONCLUSIONES .....		32
RECOMENDACIONES .....		33
BIBLIOGRAFÍA .....		34
ANEXOS .....		39

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Agregado mineral, proveniente de cantera “La Tenería”( Fotografía) .....	10
Figura 2 Escoria Siderúrgica BFS, ANDEC S.A. (Fotografía).....	11
Figura 3 Viscosímetro rotacional Brookfield LP-22 (Fotografía).....	11
Figura 4 Equipo FRX, Marca HP, Lab UTPL(Fotografía) .....	12
Figura 5 Conjunto de copa abierta de Cleveland,(Fotografía).....	12
Figura 6 Martillo de compactación, Laboratorio UTPL (Fotografía).....	13
Figura 7 Marshall Stability Tester, Laboratorio UTPL (Fotografía) .....	14
Figura 8 Bomba de vacío y picnómetro, Laboratorio UTPL(Fotografía) .....	14
Figura 9 Metodología de investigación detallada por etapas (Mapa mental) .....	15
Figura 10 Distribución granulométrica de agregados y BFS.....	16
Figura 11 Distribución granulométrica del diseño sin sustitución .....	18
Figura 12 Distribución granulométrica de diseños de mezcla asfáltica.....	20
Figura 13 Porcentaje de vacíos en mezcla sin sustitución BFS0 vs Contenido de asfalto .....	23
Figura 14 Densidad de mezcla compactada sin sustitución BFS 0 vs Contenido de asfalto .....	24
Figura 15 Vacíos en el agregado mineral sin sustitución BFS 0 vs contenido de asfalto.....	24
Figura 16 Vacíos llenos de asfalto en mezcla sin sustitución BFS 0 vs contenido de asfalto.....	25
Figura 17 Estabilidad (N) mezcla BFS 0 vs Contenido de asfalto .....	25
Figura 18 Flujo (mm) mezcla BFS 0 vs Contenido de asfalto .....	26
Figura 19 Porcentaje de vacíos por cada diseño BFS. ....	27
Figura 20 Densidad Bulk por cada diseño BFS.....	28
Figura 21 VMA (Vacíos de agregado mineral) por cada diseño BFS. ....	28
Figura 22 VFA (Vacíos llenos de asfalto) para cada diseño BFS.....	29
Figura 23 Estabilidad (N) para cada diseño BFS.....	29
Figura 24 Flujo (mm) para cada diseño BFS.....	30

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química (%) de la escoria siderúrgica .....	6
Tabla 2. Resumen de la caracterización de agregados y escoria siderúrgica.....	15
Tabla 3. Resumen de la caracterización de material bituminoso .....	16
Tabla 4. Caracterización de la escoria siderúrgica por fluorescencia de rayos X.....	17
Tabla 5. Criterios de diseño Método Marshall para mezclas asfálticas en caliente .....	19
Tabla 6. Promedio de contenido óptimo de asfalto en mezcla sin sustitución BFS 0 .....	26
Tabla 7. Cumplimiento de criterios Marshall con sustitución porcentual de agregados .....	30
Tabla 8. Comparación de precios de mezcla asfáltica con sustitución de agregados.....	31

## RESUMEN

El deterioro prematuro de la carpeta asfáltica en la gran mayoría de la estructura vial de nuestro país ha motivado la investigación de alternativas que permitan reducir el desgaste y fractura de esta; en Europa, el uso de desechos industriales de acería como material constructivo ha dado excelentes resultados. Es por ello que, este trabajo tuvo como objetivo, analizar el comportamiento físico mecánico de mezclas asfálticas en caliente, utilizando escoria siderúrgica como parte de los agregados minerales. Para dicho efecto se realizó la caracterización física y química de escoria, agregados locales y cemento asfáltico, así como las pruebas de estabilidad y flujo en 4 diseños diferentes, utilizando el método Marshall, acorde a la normativa NEVI-12. Como resultado de esto, los 3 diseños, con 5%,10% y 15% de sustitución de agregados por escoria siderúrgica dieron resultados iguales o mejores a la mezcla asfáltica sin sustitución, lo cual confirma lo dicho por investigaciones realizadas a nivel mundial, catalogando a la escoria como material apropiado para el uso en mezclas asfálticas en caliente.

**Palabras clave:** Carpeta asfáltica, escoria siderúrgica, sustitución porcentual de agregados, método Marshall.

## ABSTRACT

The premature damage of the asphaltic structure in most of the roads of our country have motivated the investigation of alternatives that allow reducing the wear and fracture of this. In Europe the use of industrial waste as a construction material has shown excellent results. That's why, this work aimed to analyze the physical and mechanical behavior of hot asphalt mixtures, using steel slag as part of the mineral aggregates. For this, physical and chemical characterization of slag, local aggregates and asphalt cement was performed, as well as stability and flow tests in 4 different designs, using the Marshall method, in accordance with NEVI-12. As a result of this, the 3 designs with 5%, 10% and 15% substitution of aggregates by steel slag, gave equal or better results to the asphalt mixture without substitution, which confirms the results by researches carried out worldwide, cataloging the slag as appropriate material for use in hot asphalt mixtures.

**Keywords:** Asphalt binder, steel slag, substitution of aggregates, Marshall method.

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el uso de materiales de desecho en las industrias de pavimentación de asfalto se está desarrollando rápidamente. La escoria es un subproducto de la fabricación de acero, que se obtiene durante la separación del acero fundido de las impurezas en los hornos de fabricación (Ziari et al., 2015). Por cada 3 toneladas de acero que se fabrica, se obtiene 1 tonelada de escoria siderúrgica (Proctor et al., 2000).

La aplicación de escoria de acero en la construcción de carreteras es rentable ya que reduce el consumo de agregados no renovables (Fakhri & Ahmadi, 2017), además de que el uso de desechos industriales en el campo de la construcción es parte del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 12 “Producción y consumo responsable”, de tal manera que el uso de este desecho reduciría en gran manera el tamaño de los depósitos finales en donde es desalojado provocando contaminación al suelo y afluentes cercanos.

La principal característica que aporta la escoria siderúrgica en mezclas asfálticas consiste en una notable mejora en las características de la capa de rodadura. Los agregados de escoria de acero han mostrado excelentes resultados en las pruebas de resistencia al pulido, lo que significa que las superficies hechas con ellos, mantienen su fricción con el tiempo (Mladenovič et al., 2015).

A nivel nacional la red estatal de carreteras ha sufrido daños en el pavimento, ocasionando problemas de circulación por la presencia de fallas en la superficie, tales como baches, grietas, fisuras y una serie aún más grande de problemáticas relacionadas a la deficiencia en los parámetros físicos de la capa de rodadura. A esto se suma la falta de mantenimiento periódico lo cual provoca que la vida útil del paquete estructural se reduzca notablemente.

En esta investigación se pretende demostrar que sustituir porcentualmente agregados por escoria siderúrgica, otorga mejores características a la capa de rodadura. Para dicho propósito se ha dividido a la investigación en 5 etapas principales: Revisión de literatura y estado del arte, caracterización de materiales, diseño de mezclas, elaboración y ensayo de probetas, análisis de resultados.

La revisión de la literatura y estado del arte tuvo como objetivo establecer la metodología correcta y el porcentaje apropiado para la sustitución de agregados.

En la etapa de caracterización de materiales se logró determinar si estos cumplen con las especificaciones aceptables por la normativa NEVI-12 para su uso en el método Marshall ASTM D-1559.

Posteriormente, con las características ya obtenidas se realizaron 4 diseños de mezcla, con sustitución de agregado fino en un 0,5,10,15%. Con los diseños ya establecidos se logró ensayar 3 probetas por cada diseño, para el eventual análisis de resultados.

Como resultado de este trabajo se generaron aportes al estado del arte, a la ingeniería y a las buenas prácticas ambientales en la construcción, los cuales se describen a continuación:

Estimación del porcentaje ideal de sustitución de agregados locales por escoria siderúrgica para su uso en mezclas asfálticas: Los resultados de esta investigación evitarían evaluar el comportamiento de escoria siderúrgica en conjunto con agregados y material bituminoso, utilizado para pavimentación en la localidad.

Uso de desechos industriales: La presente investigación fomenta el uso de escoria con objetivo de evitar el consumo exagerado de materiales minerales no renovables en la vialidad.

Para exponer estos resultados, este documento se ha dividido en 4 capítulos principales, en el capítulo 1 se detalla el estado del arte, en donde constan múltiples investigaciones realizadas a nivel mundial en cuanto se refiere al uso de escoria como componente en mezclas asfálticas, seguidamente en el capítulo 2 se detallan los materiales y los procesos realizados a las mezclas acorde a la metodología utilizada, en el capítulo 3, se muestran los resultados y gráficas obtenidas con su respectiva discusión. Finalmente, el capítulo 4 se detallan las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

**CAPÍTULO I**  
**ESTADO DEL ARTE**

Grandes cantidades de agregados minerales no renovables se utilizan en proyectos de pavimentación, año tras año esta demanda aumenta en la gran mayoría de países (Rondón et al., 2019). Esto conlleva un impacto ambiental negativo dado que la industrialización de estos recursos naturales es responsable de casi el 50% de la emisión total de gases de efecto invernadero en la construcción de pavimentos (Inyim et al., 2016).

La escoria de alto horno o escoria siderúrgica (BFS)(Blast furnace slag) es el producto desecho de la fundición de acero, este innovador material ha sido objeto de muchas investigaciones, como la realizada por Nouvion et al., (2009), la cual señala que, usar escoria siderúrgica ayudaría a reducir considerablemente el uso de materiales agregados minerales en la pavimentación, así como el consumo de energía en procesos de explotación y producción de estos.

La composición química de las diferentes escorias BFS que existen, ha generado controversia; sin embargo, muchas investigaciones al respecto han mostrados resultados como los de la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química (%) de la escoria siderúrgica

<b>Componente</b>	<b>Emery, (1984)</b>	<b>León et al., (2009)</b>	<b>DOT, (2015)</b>	<b>Nassar et al., (2016)</b>	<b>Al-Hdabi &amp; Al Nageim, (2017)</b>
CaO	36-45	43.3	32-45	41.42	40.37
SiO <sub>2</sub>	33-42	25.5	32-42	35.65	37.47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10-16	17	7-16	11.21	4.76
P	-	2.3	-	-	-
MgO	3-16	1.45	5-15	6.89	3.65
Na <sub>2</sub> O	-	1.4	-	0.28	2.55
SO <sub>3</sub>	1-3	1	0.4-2	2.43	-
FeO	0.3-0.2	-	-	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0.5	-	-	-
MnO	0.2-.5	0.71	0.1-0.75	0.26	0.15
TiO <sub>2</sub>	-	-	0.2-0.8	0.60	-
K <sub>2</sub> O	-	-	-	0.63	-

Fuente: Rondón et al., (2019)  
Elaborado por: El autor

Dicha composición química depende directamente de la procedencia, del proceso realizado para la fundición y del lote al cual se realizó el muestreo; a partir de esto, investigaciones como la realizada por Shi (2004), han demostrado que la escoria BFS comúnmente posee cantidades variables de óxidos y metales, lo cual permitiría su uso como materia prima reciclada.

Existen otros tipos de escoria siderúrgica, sin embargo, investigaciones como las realizadas por Airey y Collop (2004), Emery (1984), Ahmedzade y Sengoz (2009), y Yi et al. (2012), señalan que la escoria siderúrgica, puede ser utilizada ampliamente en el campo de la construcción, específicamente en la pavimentación asfáltica, otorgando resultados satisfactorios ante ensayos físico-mecánicos.

Aunque su comportamiento como sustituyente del agregado mineral en mezclas asfálticas en caliente depende de muchas variables, existe gran variedad de investigaciones inherentes a su uso:

En mezclas constituidas por cemento asfáltico AC-10, AC-20 y piedra caliza como agregado grueso, Ahmedzade y Sengoz (2009), trabajaron en la evaluación de la escoria siderúrgica como componente agregado en mezclas bituminosas, ensayando: estabilidad Marshall, tensión indirecta, rigidez y fluencia. Concluyeron que la escoria de acero utilizada como agregado grueso, mejoraba las propiedades mecánicas de las mezclas en comparación a la sustitución por piedra caliza.

Magadi et al. (2016) investigaron el diseño de mezclas asfálticas con diferentes gradaciones y diferentes porcentajes de sustitución de agregados de río, los valores de estabilidad Marshall y tensión indirecta dieron resultados favorables para los 3 diseños que contenían escoria, particularmente en aquellos que tenían partículas con tamaño menor a 12.5mm.

Usando escoria BOF (Basic Oxygen Furnace) , Chen y Wei (2016), sometieron a pruebas de laboratorio al material empleado en una carretera cuya capa de rodadura estaba constituida por tres diseños, de la siguiente manera: asfalto con masilla de piedra y BOF, mezcla asfáltica densa con BOF y cemento asfáltico con agregado natural. La calidad de manejo y las características de fricción de ambas secciones BOF se desempeñaron de igual o mejor manera que la sección construida con agregado natural. Los datos de campo indicaron que la escoria de acero podría usarse como agregado para capas de rodadura en lugares donde se espera que el tráfico realice fuertes frenadas y maniobras en las curvas, por las características de fricción que aporta el material, además de que el agrietamiento en las vías construidas con escoria fue menor.

Utilizando los límites permitidos por el código italiano, Pasetto et al. (2017), trabajaron en el diseño de mezcla y el análisis de rendimiento de mezclas asfálticas con escoria de acero de horno de arco eléctrico. Los autores determinaron que el uso de la escoria como agregado mineral hasta en un 40% de sustitución, otorga valores aceptables de estabilidad y flujo.

Comparando asfalto con Granito como agregado mineral y asfalto con escoria de acero, Kim et al. (2018), realizaron ensayos de estabilidad, porcentaje de vacíos y tensión indirecta, en

las cuales concluyeron que la mezcla asfáltica con escoria (SHMA) en porcentajes de vacío superiores al 4.5%, pueden aumentar la resistencia de la mezcla hasta en un 114%, mientras que la mezcla granito (GHMA) presentó resultados de resistencia iguales o inferiores al diseño base.

Rondón et al. (2019) evaluaron las características físico-mecánicas (estabilidad Marshall y Tensión indirecta, ensayo Cantabro y deformación permanente), utilizando porcentajes de BFS (Blast Furnace Slag) como agregado, además realizaron la caracterización del material mediante difracción y fluorescencia de rayos X. Los resultados de los diseños de mezcla asfálticos con sustitución señalan que la escoria BFS otorga características favorables a la capa de rodadura.

En resumen, varias investigaciones inherentes al uso de escoria en mezclas asfálticas han mostrado resultados favorables, particularmente, Rondón et al. (2019) y Magadi et al. (2016), sirvieron como guía a la presente investigación, puesto que ambos procesos experimentales incurren al uso de escoria en tamaños inferiores a 12.5mm, además de utilizar la metodología Marshall.

## **CAPÍTULO II**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

## 2.1. Materiales

### 2.1.1. Agregados y Material Bituminoso.

Para el presente estudio se emplearon los áridos finos y gruesos provenientes de la cantera “Tenería” ubicada en la provincia de Loja (9564125N 694297E). El material asfáltico AC-20 (denominado así por su grado de viscosidad a 60º) proviene de la refinería “Esmeraldas” ubicada en la Provincia de Esmeraldas (102457N 645587E).

Los materiales descritos corresponden a los usados por el Municipio de Loja para pavimentación de vías de tráfico medio en el cantón Loja, el depósito en el cual se conserva el material asfáltico y los agregados, se encuentra en el sector “La Tenería” de la ciudad de Loja.



Figura 1 Agregado mineral, proveniente de cantera “La Tenería”  
Fuente: El autor  
Elaborado por: El autor

### 2.1.2. Escoria Siderúrgica.

Como material aportante a la mezcla asfáltica se empleó escoria siderúrgica de alto horno (BFS), proveniente de la planta de ANDEC S.A, denominada “Planta industrial Guayaquil”, localizada en la provincia de Guayas, cantón Guayaquil (9749860N 625577E).

Para su uso, la escoria siderúrgica no recibió ningún tratamiento físico ni mecánico posterior a su transporte a la ciudad de Loja.



Figura 2 Escoria Siderúrgica BFS, ANDEC S.A.  
Fuente: El autor  
Elaborado por: El autor

### **2.1.3. Equipo de laboratorio.**

#### **2.1.3.1. Viscosímetro rotacional Brookfield.**

El viscosímetro rotacional Brookfield LP-22 (Figura 3), es un equipo capaz de medir la viscosidad de fluidos a temperaturas elevadas con resultados comparables a la normativa AASHTO T201. Los rangos de temperatura de trabajo del equipo se encuentran entre 9 y 260 grados Celsius, y la viscosidad medida tiene una precisión de  $\pm 1\%$ . Para la presente investigación este equipo será utilizado para medir con mayor precisión la viscosidad del asfalto a una temperatura de 135 grados Celsius.



Figura 3 Viscosímetro rotacional Brookfield LP-22  
Fuente: El autor  
Elaborado por: El autor

#### **2.1.3.2. Equipo fluorescencia de rayos X HP.**

El equipo FRX tiene como principal función realizar el análisis químico cualitativo y cuantitativo de los elementos químicos en muestras solidas sin necesidad de procesos reactivos al

material, mediante la medición de las ondas de emisión secundaria (radiación) generadas por un material al ser sometido a excitación por una fuente de rayos X, el rango de funcionamiento del instrumento está en los elementos comprendidos entre el Flúor (F) y el Uranio (U).



Figura 4 Equipo FRX, Marca HP, Lab UTPL  
Fuente: El autor  
Elaborado por: El autor

### **2.1.3.3. Conjunto de equipo de Copa Abierta Cleveland.**

El conjunto de copa abierta de Cleveland (Figura 5) está constituido por un horno eléctrico, termómetro y copa abierta, cuyo uso es determinar los puntos de ignición de fluidos que posean un punto de ignición inferior a los 300 grados Celsius. Para la presente investigación se utilizó en la caracterización del material bituminoso acorde al método AASHTO T79-96.



Figura 5 Conjunto de copa abierta de Cleveland,  
Laboratorio de asfaltos UTPL  
Fuente: El autor  
Elaborado por: El autor

#### **2.1.3.4. Martillo de compactación de briquetas Marshall.**

El equipo para la compactación de las briquetas (Figura 6), constituye una parte fundamental en el proceso de experimentación, su función es realizar la compactación dinámica del espécimen bituminoso, por ambas caras y con el número de golpes especificado por la normativa NEVI-12.



Figura 6 Martillo de compactación, Laboratorio UTPL  
Fuente: El autor  
Elaborado por: El autor

#### **2.1.3.5. Ensayador de Estabilidad Marshall.**

El ensayador de estabilidad Marshall (Figura 7), está constituido por una máquina encargada de aplicar una carga vertical uniforme con velocidad de 51mm/min hacia un espécimen de prueba colocado en una mordaza de 4" de diámetro interior y 2.5" de altura. Su capacidad es de 10.000lb (4500 kg) y su rango de fuerza se encuentra entre los 0 y 50 kN (estabilidad) con una exactitud de  $0.1\% \pm 0.05$ .

Para ensayar la estabilidad y flujo, el aparato consta de dos diales con una precisión de 0.0001".



Figura 7 Marshall Stability Tester, Laboratorio UTPL  
Fuente: El autor  
Elaborado por: El autor

### **2.1.3.6. Equipo para densidad RICE.**

El conjunto necesario para realizar el ensayo de gravedad específica y densidad en mezclas bituminosas sin compactar, por el método ASTM D 2041, está constituido por una bomba de vacío con una potencia de 0.5 HP, con un vacío nominal entre 15 $\mu$ mHg- 0.02 mbar, consta de un vacuómetro graduado entre 0 y 30 in Hg.

Su picnómetro se puede emplear únicamente en mezclas asfálticas con agregados de tamaño nominal máximo de agregado de 19mm y muestras de hasta 2500g.



Figura 8 Bomba de vacío y picnómetro, Laboratorio UTPL.  
Fuente: El autor  
Elaborado por: El autor

## **2.2. Métodos**

La metodología de la presente investigación se encuentra dividida en 4 etapas principales, las cuales se encuentran detalladas en la Figura 9.

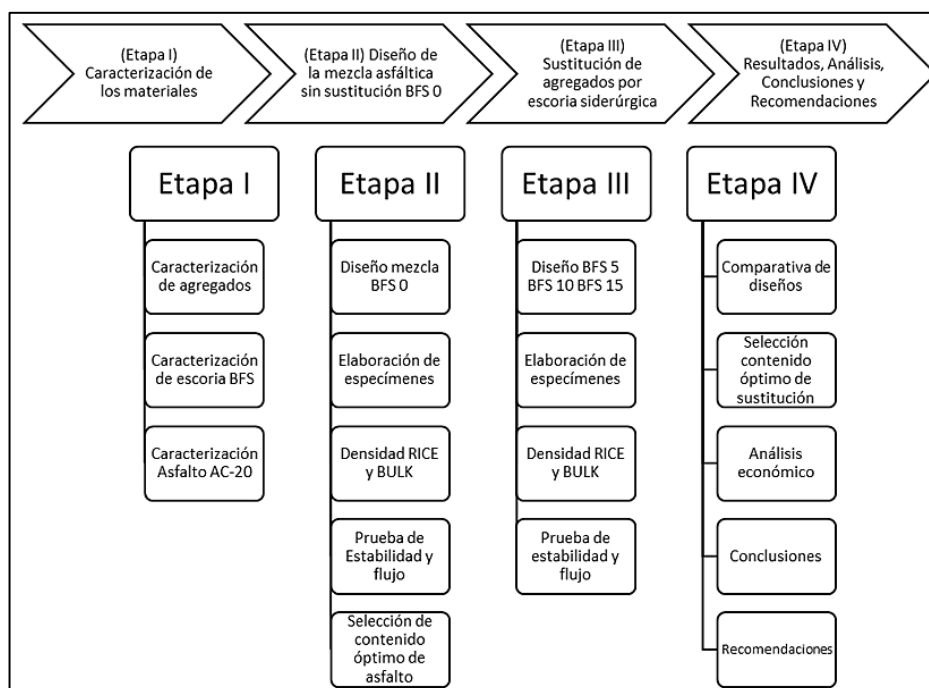


Figura 9 Metodología de investigación detallada por etapa

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

### 2.2.1. Caracterización de agregados minerales y escoria siderúrgica.

Para la caracterización de los áridos y escoria siderúrgica se emplearon las normativas AASHTO y ASTM, cuyo sumario contrastado con la normativa NEVI 12, se encuentra en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de la caracterización de agregados y escoria siderúrgica.

Nombre del ensayo	Método (AASHTO)	NEVI	Agregado mineral	Escoria Siderúrgica
Muestreo de Áridos	No. T2	--	--	--
Reducción de muestras a tamaño de ensayo (áridos)	No. T 248	--	--	--
Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso.	No. T 27	NEVI 12	Aceptable	Aceptable
Material más fino que pasa el tamiz con aberturas de 75 um	No. T 11	NEVI 12	Aceptable	Aceptable
Densidad, densidad relativa y absorción del árido fino.	No. T 84	NEVI 12	Aceptable	Aceptable
Densidad, densidad relativa y absorción del árido grueso.	No. T 85	NEVI 12	Aceptable	Aceptable
Degradación de partículas entre 4.36mm y 37.5mm.	No. T 96	<40%	21.54%	48.56%
Contenido de terrones de arcilla y partículas desmenuzables	No. T112	<1%	0%	0%
Equivalente de arena %min	No. T176	45%	67%	70%
Índice de plasticidad: material más fino que 75 um.	No. T90	<4%	0%	0%
Partículas Planas y Alargadas Relación 5:1 %max	No. T27/T11	10% max	3.06%	0.00%
Caras fracturadas agregado grueso %min.	No. TP61	90% min	96.94%	100%

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

En la Figura 10 se encuentra representada gráficamente la distribución granulométrica de los materiales.

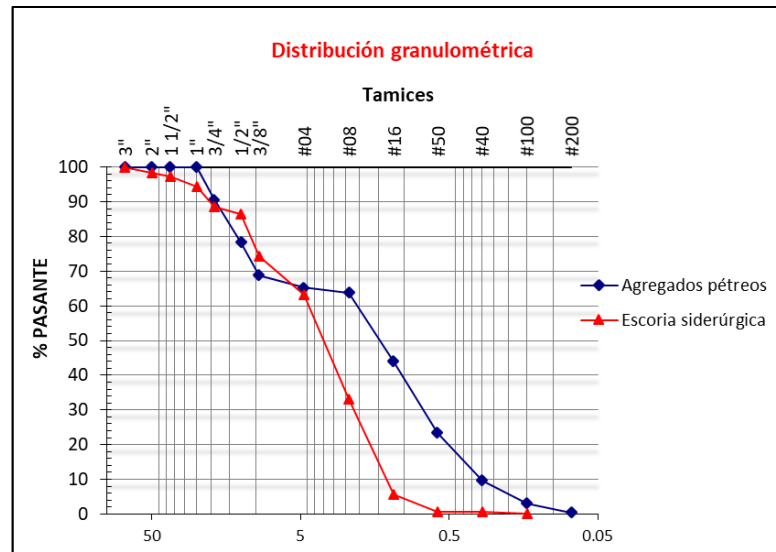


Figura 10 Distribución granulométrica de agregados y BFS.  
Fuente: El autor  
Elaborado por: El autor

En el Anexo 1, se encuentra con mayor detalle la información respecto a la caracterización de los materiales agregados.

### 2.2.2. Caracterización del material bituminoso.

Para la caracterización del cemento asfáltico AC-20 se ha realizado los ensayos exigidos por la normativa NEVI 12 (Tabla 810-3-3-4)(MTOP, 2013), el resumen de ensayos realizados se encuentra en la Tabla 3.

Tabla 3. Resumen de la caracterización de material bituminoso.

Nombre del ensayo	Método (AASHTO)	Ref NEVI	Material de cantera Municipal Loja
Productos derivados del petróleo, cemento asfáltico			
Viscosidad cinemática a 135 grados Celsius.	ASTM D2170	210 Pa.s min	364 Pa.s
Determinación del punto de inflamación en copa abierta No. T79-96		232° Celsius	298° Celsius
Determinación del punto de fuego en copa abierta No. T79-96		--	316° Celsius
Penetración a 25 grados Celsius.	ASTM D5	40 ths m/m	64.3 ths m/m
Densidad a 25 grados Celsius.	ASTM D70	1600 a 2400	2300 Poise
Punto de ablandamiento de material bituminoso.	No. T53	--	57 ° Celsius
Peladura del material bituminoso en muestra de árido.	ASTM D1559	10%	5%

Fuente: El autor  
Elaborado por: El autor

### 2.2.3. Composición Química de la Escoria siderúrgica.

Para la caracterización química de la escoria siderúrgica (BFS) se realizó el ensayo FRX (Fluorescencia de rayos X), el cual determinó la composición química mayoritaria y un microanálisis por trazas, en la Tabla 4 se presenta la caracterización.

Tabla 4. Caracterización de la escoria siderúrgica por fluorescencia de rayos X

Mayoritarios y minoritarios (%)		Análisis por trazas (ppm)	
CaO	33.99%	Mn	1.6384
Fe2O3	26.75%	Ti	0.5457
SiO2	14.31%	Zn	0.2776
Al2O3	8.74%	Cr	0.1562
MgO	6.31%	V	0.0609
ZnO	3.84%	Cu	0.0344
MnO	2.26%	Pb	0.0192
P2O5	1.15%		
S	0.53%		

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

### 2.2.4. Diseño de la mezcla asfáltica sin sustitución de agregados.

La normativa NEVI-12 (MTOP, 2013) en la sección 812 aprueba los métodos descritos por el texto Asphalt Mix Design Methods MS2 (Asphalt Institute, 2015), aplicables a la presente investigación.

Dadas las características de las vías en el cantón Loja, para el diseño de la mezcla asfáltica se ha utilizado tráfico medio, según la tabla 812-3.2 (NEVI-12) de categorías de tráfico, esto corresponde a un número de ejes equivalentes (ESAL'S) entre 300.000 y 10'000.000.

Para el diseño base (BFS 0) se ha considerado un 50% de agregado grueso, 45% de agregado fino y 5% de filler, cuya distribución granulométrica se encuentra en la Figura 11.

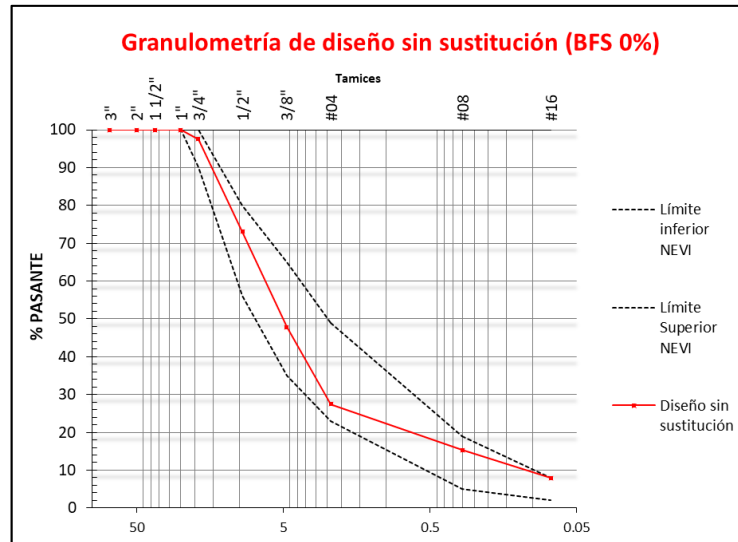


Figura 11 Distribución granulométrica del diseño sin sustitución  
Fuente: El autor  
Elaborado por: El autor

Acorde al capítulo Nro.7 del Manual MS2 (Asphalt Institute, 2015), para la elaboración de las probetas de ensayo, se requiere probar un rango en el cual se espera el contenido óptimo de material bituminoso, para ello se realizaron especímenes con 0.5% de contenido de asfalto de diferencia, entre 5 y 7, es decir: 5 %, 5.5 %, 6 %, 6.5 %, 7 %.

Para dichos porcentajes se realizaron 3 probetas, con una masa aproximada de 1100 gramos, grado de compactación acorde al tráfico de diseño y una temperatura entre 135 y 160 °C.

### 2.2.5. Densidad específica Bulk y densidad RICE.

Tras realizar la mezcla asfáltica y desmoldarla se realizaron los ensayos de densidad compactada y al vacío pertinentes los cuales son:

- *Densidad específica Bulk*: Corresponde a la densidad de la mezcla compactada, para lo cual se requiere tomar el peso seco, superficialmente seco, y sumergido de las probetas, acorde al método ASTM D1188.
- *Densidad RICE*: Corresponde a la densidad de la mezcla suelta, en la cual con ayuda de una balanza y una bomba de vacío se toma el valor de masa al vacío en un recipiente lleno de agua, acorde al método D2041.

### 2.2.6. Estabilidad Marshall.

El método Marshall para diseños de mezcla asfáltica en caliente, es el método predominante para el diseño y control, este es considerado una guía de gran importancia para la determinación de las características mecánicas y volumétricas de la mezcla.

Posterior al proceso de compactación se realizó la prueba de estabilidad y flujo, la cual se realizó con el equipo mostrado en la Figura 7 bajo el método ASTM D6927.

### 2.2.7. Selección del contenido óptimo de asfalto.

Al culminar los ensayos descritos anteriormente, se crean gráficas de tendencia con los datos de densidad, % de vacíos, Estabilidad Marshall, Flujo Marshall, Vacíos en el agregado mineral (VMA), Vacíos llenos de asfalto (VFA), versus el porcentaje de material bituminoso y se comparan con los criterios mostrados en la Tabla 5, los cuales corresponden a lo solicitado con la normativa NEVI-12.

Tabla 5. Criterios de diseño Método Marshall para mezclas asfálticas en caliente

Criterio	Tráfico Medio	
	Valor Mínimo	Valor Máximo
Compactación, número de golpes en cada cara del espécimen	50	
Estabilidad (Newtons)	5338	-
Flujo, 0.25mm	8	16
Porcentaje de vacíos de aire	3	5
Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) acorde al tamaño máximo nominal del agregado	13	
Porcentaje de vacíos cubiertos con asfalto (VFA)	65	78

Fuente : (Asphalt Institute, 2015)  
Elaborado por: El autor

Adicionalmente, el manual del Asphalt Institute (2015), también señala que se puede utilizar la Ecuación 1 para calcular de manera analítica el contenido ideal de asfalto.

$$P = 0.035a + 0.045b + Kc + F \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:

*P*= Contenido aproximado de asfalto por peso de mezcla

*a*= porcentaje de agregado mineral retenido en el tamiz de 2.36mm

*b*= porcentaje de agregado mineral pasante del tamiz de 2.36mm y retenido en el tamiz de 75 μm

*c*= porcentaje de agregado mineral pasante del tamiz de 75 μm

*k*= 0.20

*F*= 0.7

Dado que la normativa muestra valores máximos y mínimos, se utilizaron los valores promedio de cada uno de los criterios para la selección del contenido óptimo de material bituminoso.

En el Anexo 3 se encuentran los cálculos para la selección del contenido óptimo de asfalto.

### 2.2.8. Sustitución porcentual de agregados por escoria siderúrgica.

Se realizaron 4 diseños con sustitución de agregado fino por escoria siderúrgica (BFS) de la siguiente manera:

BFS 0: 50% agregado grueso, 45% agregado fino, 5% filler, 0% BFS

BFS 5: 50% agregado grueso, 40% agregado fino, 5% filler, 5% BFS

BFS 10: 50% agregado grueso, 35% agregado fino, 5% filler, 10% BFS

BFS 15: 50% agregado grueso, 30% agregado fino, 5% filler, 15% BFS

Además, se realizó ensayos a un diseño adicional, que corresponde al porcentaje máximo de sustitución de agregado, delimitado por la franja granulométrica de la normativa, tal y como se muestra en la Figura 12.

BFS 22: 50% agregado grueso, 23% agregado fino, 5% filler, 22% BFS

No se realizó sustitución de agregado grueso, dado que la forma y características físicas de la escoria siderúrgica con tamaño nominal (Tabla 2), no cumplen los requisitos especificados por la normativa NEVI-12 para su uso en mezclas asfálticas.

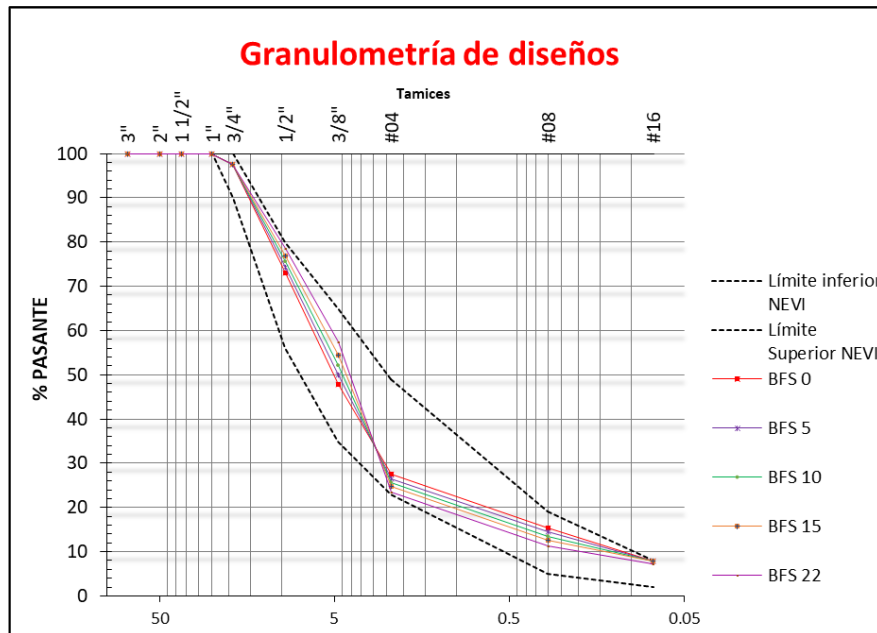


Figura 12 Distribución granulométrica de diseños de mezcla asfáltica.

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

En los Anexos 4 y 5 se encuentra una tabla ponderada de granulometría de cada uno de los diseños, acorde al método ponderado del Manual MS2 (Asphalt Institute, 2015).

### **2.2.9. Selección del contenido óptimo de sustitución.**

Posteriormente, se repite lo descrito por las secciones 2.2.5 y 2.2.6, a las probetas de ensayo (3) realizadas para cada uno de los porcentajes de sustitución.

Eventualmente, acorde a los resultados obtenidos, se realizó el análisis a cada uno de los diseños, considerando el cumplimiento de cada uno de los parámetros exigidos por la normativa (Tabla 5), como se muestra en el capítulo III de la presente investigación.

## **CAPÍTULO 3**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### 3.1. Diseño de la mezcla sin sustitución (BFS 0)

Acorde a la metodología Marshall ASTM D6927, a continuación, se describen los resultados obtenidos para cada uno de los criterios analizados.

#### 3.1.1. Porcentaje de vacíos de aire (Pa).

El porcentaje de vacíos de aire en la mezcla asfáltica, es uno de los criterios más importantes para un diseño durable de carpeta asfáltica, valores entre 2 y 8% de porcentaje de vacíos se han observado en obra, sin embargo utilizar valores cercanos a 4% disminuye el deterioro y fractura de la estructura (Asphalt Institute, 2015).

El porcentaje de vacíos (Figura 13) disminuye conforme la cantidad de material bituminoso aumenta, por tanto, dentro del rango aceptable por la NEVI-12 (Tabla 5), con un 4% de Pa se obtuvo el valor de 6.05% de contenido de asfalto.

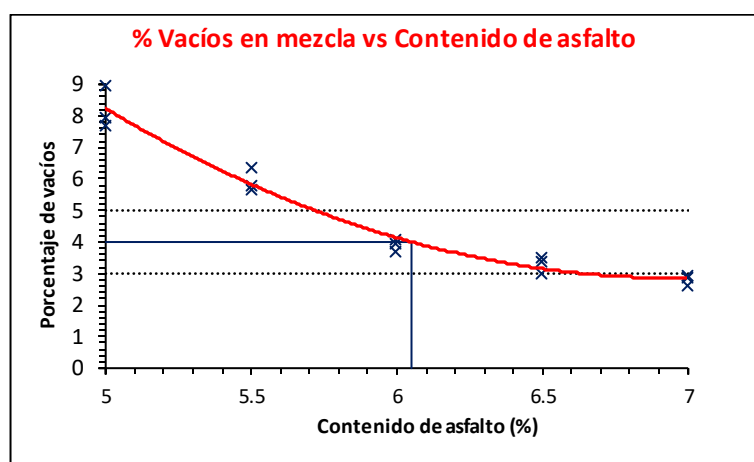


Figura 13 Porcentaje de vacíos en mezcla vs Contenido de asfalto  
Fuente: El autor  
Elaborado por: El autor

#### 3.1.2. Densidad Bulk .

La densidad aumenta proporcionalmente al contenido de material bituminoso, ya que la compactación es mejor con valores mayores de bitumen, no existe un rango aceptable, por lo cual también se ha considerado que usar mayores contenidos de asfalto en el diseño BFS 0 (Figura 14) mejoraría sus características.

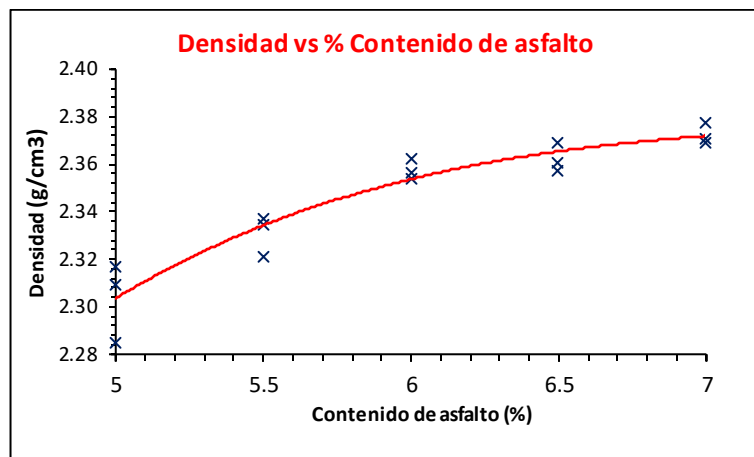


Figura 14 Densidad de mezcla compactada vs Contenido de asfalto  
Fuente: El autor  
Elaborado por: El autor

### 3.1.3. Vacío de agregado mineral (VMA).

El vacío de agregado mineral (Figura 15) del diseño BFS 0, supera notablemente los valores mínimos establecidos por el método, esto se debe a que el material bituminoso tiene una viscosidad elevada en comparación al valor mínimo establecido por la normativa (Tabla 3), utilizar valores menores de VMA incurre en un mayor espacio para que el cemento asfáltico se adhiera a las partículas (Asphalt Institute, 2015). Además de que la forma de la gráfica indica que el contenido de VMA no es sensible a cambios en el contenido de material bituminoso. Por tanto, acorde a la gráfica (Figura 15), utilizar porcentajes de asfalto entre 6 y 6.5% sería lo ideal para el diseño.

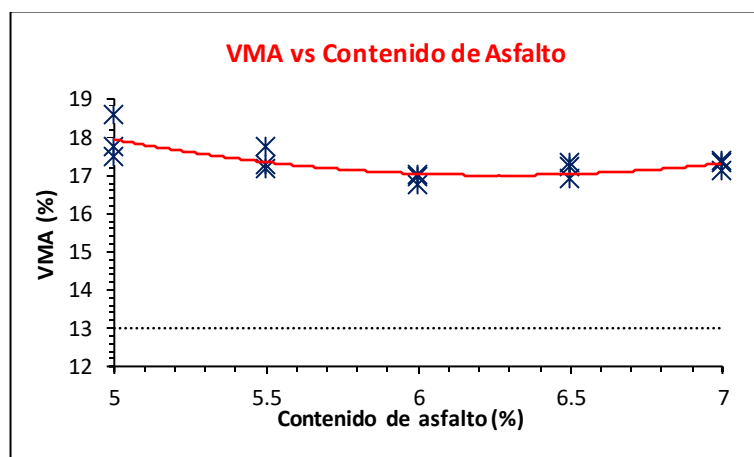


Figura 15 Vacíos en el agregado mineral vs contenido de asfalto.  
Fuente: El autor  
Elaborado por: El autor

### 3.1.4. Vacíos llenados de asfalto (VFA).

El criterio de vacíos llenados de asfalto (VFA), sirve como restricción a los diseños de mezclas asfálticas débiles con porcentajes elevados de (VMA), dado a su interrelación con el criterio

anterior y con el porcentaje de vacíos de aire. Dado que en el diseño BFS 0 (Figura 16), no tenemos valores elevados de VMA se obtuvo con el valor promedio en el rango permitido un contenido de asfalto del 5.75%.

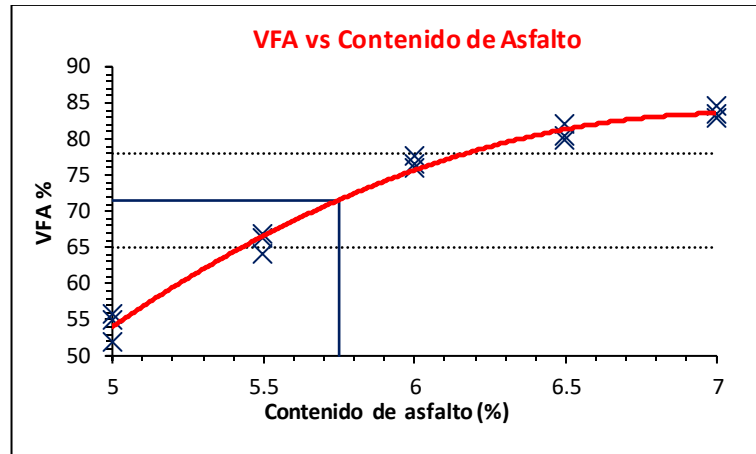


Figura 16 Vacíos llenos de asfalto vs contenido de asfalto.  
 Fuente: El autor  
 Elaborado por: El autor

### 3.1.5. Estabilidad Marshall.

Según Asphalt Institute (2015), la estabilidad Marshall es la característica encargada de asegurar la resistencia de la carpeta asfáltica a las cargas a las que se encuentra sometida. Generalmente acorde al tipo de tráfico se eligen valores de estabilidad, la normativa exige 5338 Newtons de estabilidad Marshall; el diseño BFS 0 (Figura 17), es capaz de asegurar que la mezcla sea sometida a tráfico medio e incluso pesado, sin sufrir fracturas por sobrecarga.

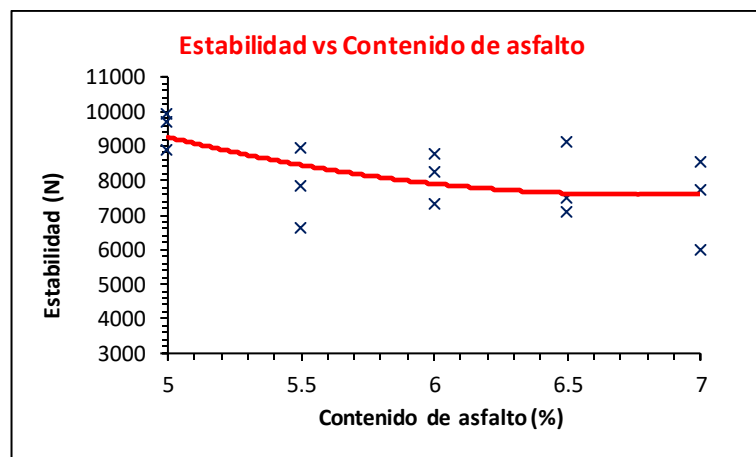


Figura 17 Estabilidad (N) vs Contenido de asfalto.  
 Fuente: El autor  
 Elaborado por: El autor

### 3.1.6. Flujo Marshall.

El flujo es el criterio Marshall que determinará si la mezcla puede soportar cargas sin generar una deformación permanente, esta depende claramente del nivel de adhesión que ofrece el material bituminoso, por lo cual en el diseño BFS 0 (Figura 18) se ha considerado un valor promedio de 6.25 % de contenido de asfalto.

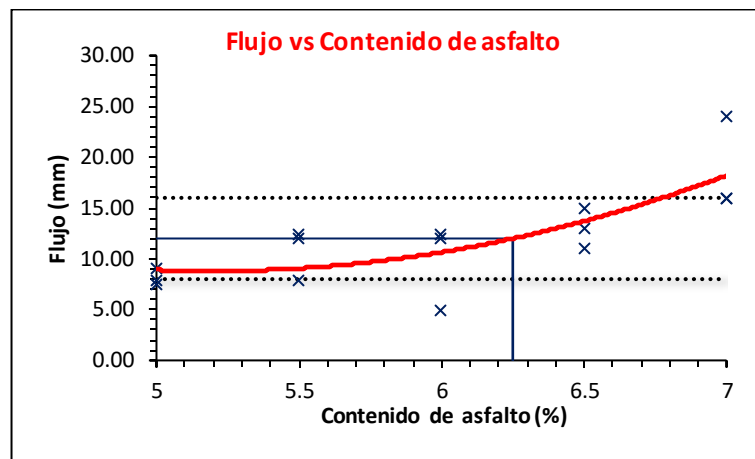


Figura 18 Flujo (mm) vs Contenido de asfalto.  
Fuente: El autor  
Elaborado por: El autor

### 3.1.7. Ecuación de contenido preliminar de asfalto.

Acorde a la Ecuación 1, se calculó de manera preliminar el contenido óptimo de asfalto por el método Marshall, obteniendo un valor de 6.33%.

### 3.1.8. Selección del contenido óptimo.

Dada la versatilidad que ofrece el método Marshall es sencillo determinar el contenido óptimo de asfalto tomando en cuenta todos los criterios de diseño con sus rangos mínimos y máximos, por lo cual se utilizó el valor promedio como contenido óptimo de asfalto, como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 6. Promedio de contenido óptimo de asfalto

Criterio	Contenido de asfalto %
Vacíos de aire (Pa)	6.05
Vacíos llenados de asfalto (VFA)	5.75
Flujo	6.25
Ecuación de contenido preliminar	6.33
Promedio	6.096

Fuente: El autor  
Elaborado por: El autor

Acorde a la tabla 6, se decidió utilizar el 6.10% de contenido óptimo de asfalto para la sustitución porcentual detallada a continuación.

### 3.2. Sustitución porcentual de agregados por escoria siderúrgica.

A continuación, se detalla de manera gráfica comparativa los resultados promedio obtenidos para cada uno de los criterios establecidos por la normativa para el método Marshall, en el Anexo 6 se encuentran las gráficas utilizando todos los especímenes de ensayo.

#### 3.2.1. Porcentaje de vacíos en diseños con sustitución.

En la Figura 19 se comprueba que solo los diseños con sustitución en un 5, 10 y 15% cumplen con el rango establecido por la normativa, esto se debe a que las partículas de escoria por a su angularidad se adhieren de mejor manera al material bituminoso, eliminando los espacios de aire.

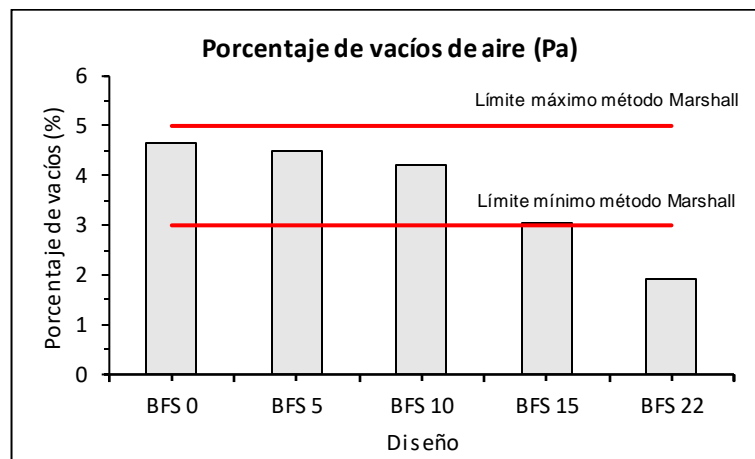


Figura 19 Porcentaje de vacíos por cada diseño BFS.

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

#### 3.2.2. Densidad Bulk en diseños con sustitución.

En la Figura 20, se presentan los valores de densidad por cada porcentaje de sustitución, al variar tan poco la densidad compactada de la mezcla, se puede deducir que a contraste de lo mostrado en la Figura 14, los cambios en la densidad son más sensibles a la variación de material bituminoso que a la sustitución de agregado por escoria BFS.

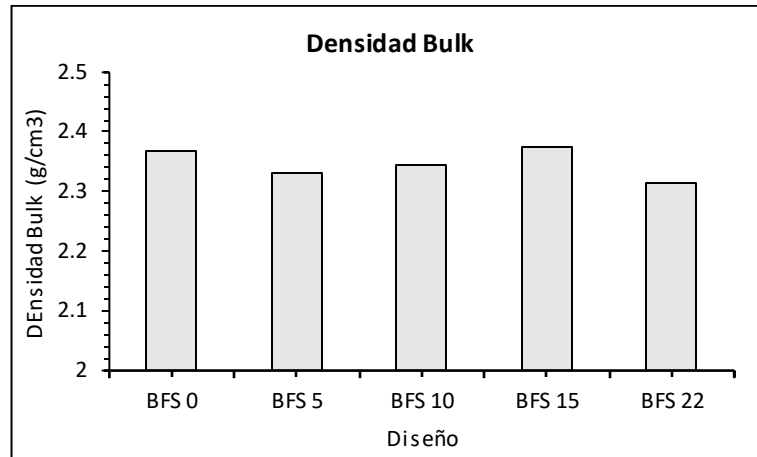


Figura 20 Densidad Bulk por cada diseño BFS.

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

La relación entre los vacíos de agregado mineral y porcentajes de sustitución, como lo muestra la Figura 21, se mantiene superior al valor establecido por la normativa, dado que este criterio varía principalmente en función de la distribución granulométrica, la cual no ha variado significativamente en relación al diseño base BFS 0.

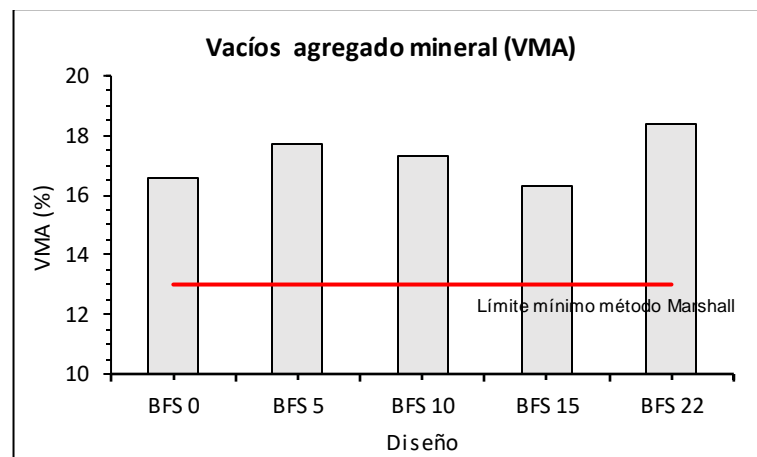


Figura 21 VMA por cada diseño BFS.

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

### 3.2.3. Vacíos llenados de asfalto (VFA) en diseños con sustitución.

La Figura 22 muestra que la relación entre los vacíos llenados de asfalto es proporcional al aumento en el contenido de escoria, esto se debe a que las características físicas como la forma y angularidad de la escoria permiten una mejor adherencia del material BFS al cemento asfáltico.

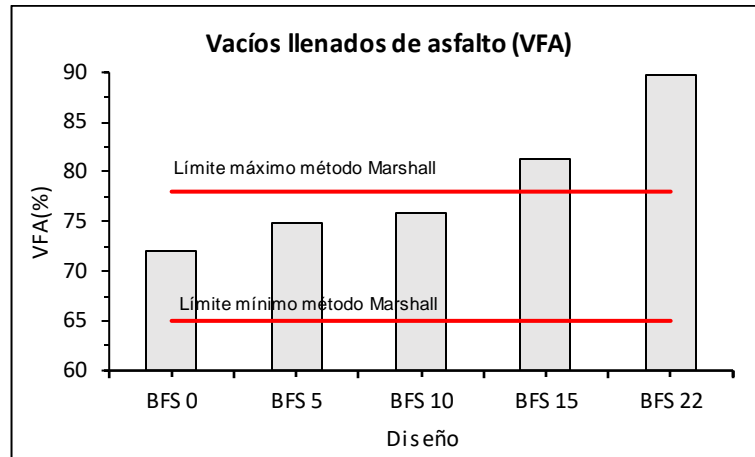


Figura 22 VFA para cada diseño BFS.

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

Estabilidad Marshall en diseños con sustitución.

En la Figura 23, se muestran los valores de estabilidad que presenta cada diseño al ser ensayado, los primeros 3 diseños muestran mayores valores de estabilidad dado que el espécimen tiende menos a romperse debido a que su porcentaje de vacíos de aire es mayor.

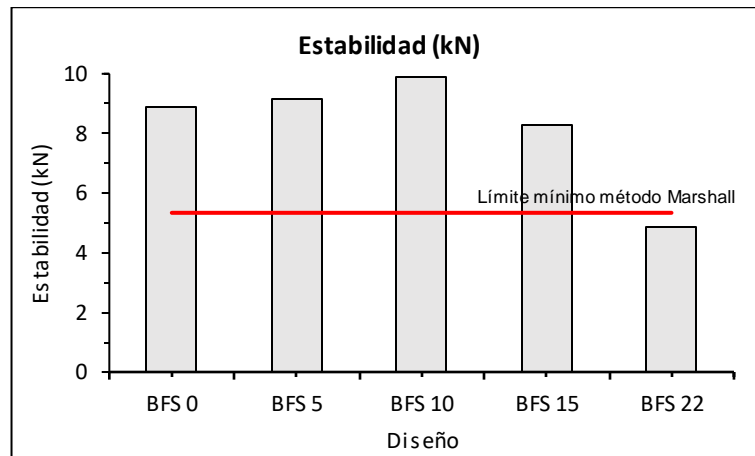


Figura 23 Estabilidad para cada diseño BFS.

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

Acorde a las investigaciones mencionadas en el Capítulo I de la presente investigación, la estabilidad es sensible a la distribución granulométrica y composición de materiales agregados; conforme aumenta el porcentaje de sustitución entre 0% y 10%, la carga que puede resistir el diseño es creciente, hasta el punto en el cual su porcentaje de vacíos es tan bajo que impide la fluencia en la mezcla, lo cual llevado a la práctica se reflejaría en un diseño que no soporta la repetibilidad de cargas.

El diseño con 15% de sustitución posee una estabilidad superior a la mínima solicitada por la NEVI-12, sin embargo, contrastando con las Figuras 19 y 21, este diseño no posee las

características recomendadas en cuanto se refiere a porcentajes de vacíos, lo cual catalogaría al diseño BFS 15 como un diseño resistente a la acción de cargas, pero frágil ante la repetibilidad y cambios climáticos drásticos.

### 3.2.4. Flujo Marshall en diseños con sustitución.

Como se puede observar en la Figura 24, los valores de flujo Marshall para todos los diseños, se encuentran dentro del rango especificado por la normativa (entre 8 mm y 16 mm); esto se debe principalmente a que las características angulares y porosas de la escoria siderúrgica permiten mejor adherencia con el material bituminoso además de mejorar la fricción entre partículas.

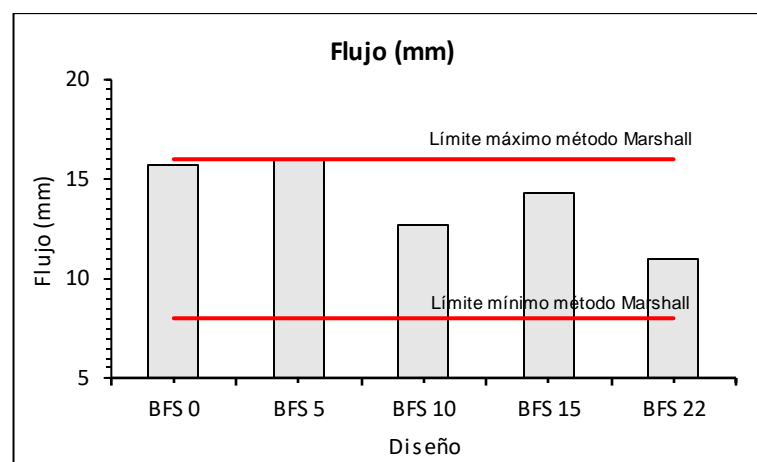


Figura 24 Flujo (mm) para cada diseño BFS.  
 Fuente: El autor  
 Elaborado por: El autor

Si bien es cierto, con los porcentajes de sustitución analizados, los valores de flujo no se encuentran fuera de los valores admitidos por la NEVI-12; al analizar los datos se muestra que con porcentajes bajos de sustitución de agregados por escoria la mezcla asfáltica tiene mayor fluencia, lo cual permitiría que el diseño BFS 5 llevado a la práctica sea más viable que los demás diseños, en condiciones de cambio climático drástico ya que este es más propenso a deformación que a rotura, bajo acción de cargas repetitivas y cambios de temperatura.

### 3.2.5. Resumen de resultados.

En la Tabla 7 mostrada a continuación, se presenta una rúbrica en la cual se muestra el cumplimiento de cada uno de los diseños a los criterios analizados por la normativa para permitir su uso en pavimentación.

Tabla 7. Cumplimiento de criterios Marshall con sustitución

Diseño	Cumplimiento de Criterios (SI/NO)
--------	-----------------------------------

	% Vacíos (Pa)	VMA	VFA	Estabilidad	Flujo
BFS 0	SI	SI	SI	SI	SI
BFS 5	SI	SI	SI	SI	SI
BFS 10	SI	SI	SI	SI	SI
BFS 15	SI	SI	NO	SI	SI
BFS 20	NO	SI	NO	SI	SI

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

Dado que la NEVI-12 se acoge a los criterios establecidos por el Asphalt Institute (2015), los diseños con porcentajes de sustitución por escoria BFS entre 0% y 10% cumplen con las solicitudes para su uso en pavimentación en las vías de la localidad, sin embargo, para su implantación es necesario realizar un análisis específico para la vía en la que se utilizará, dado que cada diseño ideal (BFS 5 y BFS 10) tiene características diferentes que permiten mejor desempeño de la mezcla asfáltica ante situaciones distintas de aplicación, repetibilidad de cargas o condición climática.

### 3.2.6. Análisis económico.

En la Tabla 8 se muestra una comparativa entre el precio por metro cúbico para cada diseño aplicable con sustitución de agregados por escoria siderúrgica, en el anexo 7 se encuentra detallado el análisis de precios unitarios realizado.

Tabla 8. Comparación de precios de mezcla asfáltica con sustitución

Mezcla asfáltica en caliente	Precio 1 metro cúbico
Mezcla convencional BFS 0	105.72
Mezcla con sustitución 5% (BFS 5)	105.01
Mezcla con sustitución 10% (BFS 10)	104.31

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

Para el cálculo anterior, no se consideró el costo de transporte del material de sustitución desde la planta industrial, dado que, para la implantación de mezclas asfálticas con escoria siderúrgica, se requeriría un depósito en la ciudad.

Los diseños BFS 5 y BFS 10, permiten un ahorro de un 0.67% y 1.33% respectivamente en comparación a usar mezclas asfálticas convencionales.

## CONCLUSIONES

El objetivo de esta investigación fue analizar el comportamiento físico-mecánico de mezclas asfálticas en caliente con sustitución porcentual de los agregados de la localidad por escoria siderúrgica de alto, bajo la metodología Marshall. Para conseguir dicho objetivo se analizaron 12 especímenes de mezcla con contenido óptimo de asfalto, de dicho estudio se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Con base a las investigaciones realizadas respecto a la caracterización de los materiales utilizados, se ha logrado determinar que la escoria siderúrgica de alto horno con partículas menores a 4.36 mm proveniente de la planta industrial de ANDEC, cumple con las características exigidas por la normativa vigente para su uso en mezclas asfálticas. Las partículas con tamaño nominal superior al mencionado, debido a su gran porosidad y formas diversas propias del material de desecho, impiden su uso inmediato en mezclas asfálticas, por lo cual deben ser sometidas a un proceso de triturado.
- Acorde a la normativa NEVI-12 y bajo la metodología Marshall ASTM D6927, se ha logrado crear un diseño de mezcla asfáltica que se ajuste a los requerimientos físicos y químicos del cemento asfáltico utilizado por el Municipio de Loja, así como a la distribución granulométrica de materiales pétreos adecuada para su uso, sin la necesidad de desechar material o sustituirlo por algún otro.
- Se ha logrado determinar que existe una mejoría notable en las características físico-mecánicas de los diseños de mezclas asfálticas con sustitución de hasta un 10% de su agregado fino por escoria, acorde a la mayoría de las investigaciones realizadas, el uso de escoria siderúrgica mejora algunas propiedades específicas de la mezcla asfáltica, debido a la forma de las partículas, existe una mejor adherencia con el material bituminoso lo cual ayuda a reducir el porcentaje de vacíos de aire, mejorando las propiedades físicas de mezclas con gran cantidad de partículas de agregado alargadas.
- La utilización de escoria siderúrgica como agregado en mezclas asfálticas, permite acorde al porcentaje de sustitución, obtener características específicas para las solicitaciones de la vía en la cual se implante. Los porcentajes de sustitución hasta un 5% (BFS 5) mostraron buenos resultados en los criterios de estabilidad y flujo con porcentajes mayores de vacíos de aire (en comparación a los demás diseños), haciendo de este, un diseño resistente y flexible, ideal para su uso bajo acción repetitiva de cargas; mientras que el diseño con 10% de sustitución (BFS 10) mostró mayor estabilidad, menor flujo y porcentaje de vacíos de aire menor.

## RECOMENDACIONES

En función de los resultados y conclusiones de la presente investigación se han planteado las siguientes recomendaciones:

- Si bien es cierto la escoria siderúrgica (BFS) proveniente de la planta de ANDEC, permite mejorar las características físicas de la mezcla asfáltica por el método Marshall, su uso potencial se encuentra en métodos como el micropaving, en donde la granulometría mayoritariamente fina que presenta el material permitiría su uso en porcentajes de sustitución en porcentajes mayores.
- Además de usar escoria siderúrgica (BFS) proveniente de la producción de Hierro en nuestro país, se podría realizar los análisis fisicoquímicos correspondientes de escorias provenientes de otro tipo de industrias, para de cierto modo reducir el consumo excesivo de materiales pétreos no renovables.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ahmedzade, P., & Sengoz, B. (2009). Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1-3), 300-305. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.105>
- Airey G D, Collop A C, T. N. H. (2004). Mechanical Performance of Asphalt Mixtures Incorporating Slag and Glass Secondary Aggregates. *8th Conference On Asphalt Pavements For Southern Africa, September*, 1-15.
- Al-Hdabi, A., & Al Nageim, H. (2017). Improving asphalt emulsion mixtures properties containing cementitious filler by adding GGBS. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(5), 1-7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001859](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001859)
- Asphalt Institute. (2015). *Asphalt Mix Design Methods (Métodos de Diseño de Concreto Asfáltico)*.
- Chen, J. S., & Wei, S. H. (2016). Engineering properties and performance of asphalt mixtures incorporating steel slag. *Construction and Building Materials*, 128, 148-153. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.027>
- DOT, W. S. (2015). *WSDOT Strategies Regarding Use of Steel Slag Aggregate in Pavements A Report to the State Legislature In Response to 2ESHB 1299 Prepared by : Washington State DOT Construction Division Pavements Office November 2015. November.*
- Emery, J. J. (1984). Steel slag utilization in asphalt mixes. *National Slag Association, MF 168-1*, 1-11. [http://www.nationalslag.org/sites/nationalslag/files/documents/nsa\\_186-1\\_steel\\_slag\\_utilization\\_in\\_asphalt\\_mixes.pdf](http://www.nationalslag.org/sites/nationalslag/files/documents/nsa_186-1_steel_slag_utilization_in_asphalt_mixes.pdf) www.nationalslagassoc.org
- Fakhri, M., & Ahmadi, A. (2017). Recycling of RAP and steel slag aggregates into the warm mix asphalt: A performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 147, 630-638. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.117>
- Inyim, P., Pereyra, J., Bienvenu, M., & Mostafavi, A. (2016). Environmental assessment of pavement infrastructure: A systematic review. *Journal of Environmental Management*, 176, 128-138. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.042>
- Kim, K., Haeng Jo, S., Kim, N., & Kim, H. (2018). Characteristics of hot mix asphalt containing steel slag aggregate according to temperature and void percentage. *Construction and Building Materials*, 188, 1128-1136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.172>
- León, N. A., Rojas Reyes, N. R., Oswaldo Bustamante R, M., & Suárez, B. U. (2009).

- Experimental evaluation of silicon - calcareous units from blast furnace slag and hydraulic lime for masonry. *DYNA (Colombia)*, 76(160), 247-254.
- Magadi, K. L., Anirudh, N., & Mallesh, K. M. (2016). Evaluation of Bituminous Concrete Mixture Properties with Steel Slag. *Transportation Research Procedia*, 17(December 2014), 174-183. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.073>
- Mladenovič, A., Turk, J., Kovač, J., Mauko, A., & Cotič, Z. (2015). Environmental evaluation of two scenarios for the selection of materials for asphalt wearing courses. *Journal of Cleaner Production*, 87(C), 683-691. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.013>
- MTOP. (2013). *Norma para Estudios y Diseño Vial (NEVI) - Volumen 3*. 1028.
- Nassar, A. I., Mohammed, M. K., Thom, N., & Parry, T. (2016). Mechanical, durability and microstructure properties of Cold Asphalt Emulsion Mixtures with different types of filler. *Construction and Building Materials*, 114, 352-363. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.112>
- Nouvion, S., Nouvion, S., Jullien, A., Sommier, M., & Basuyau, V. (2009). Environmental modeling of blast furnace slag aggregate production: The influence of grading. *Road Materials and Pavement Design*, 10(4), 715-745. <https://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690224>
- Pasetto, M., Baliello, A., Giacomello, G., & Pasquini, E. (2017). Sustainable solutions for road pavements: A multi-scale characterization of warm mix asphalts containing steel slags. *Journal of Cleaner Production*, 166(x), 835-843. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.212>
- Proctor, D. M., Fehling, K. A., Shay, E. C., Wittenborn, J. L., Green, J. J., Avent, C., Bigham, R. D., Connolly, M., Lee, B., Shepker, T. O., & Zak, M. A. (2000). Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags. *Environmental Science and Technology*, 34(8), 1576-1582. <https://doi.org/10.1021/es9906002>
- Rondón, H. A., Ph, D., Ruge-cárdenas, J. C., Ph, D., Farias, M. M. De, & Ph, D. (2019). *Behavior of Hot-Mix Asphalt Containing Blast Furnace Slag as Aggregate : Evaluation by Mass and Volume Substitution*. 31(Shi 2004). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002574](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002574).
- Shi, C. (2004). Steel slag - Its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(3), 230-236. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:3\(230\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:3(230))

Yi, H., Xu, G., Cheng, H., Wang, J., Wan, Y., & Chen, H. (2012). An Overview of Utilization of Steel Slag. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 791-801. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.108>

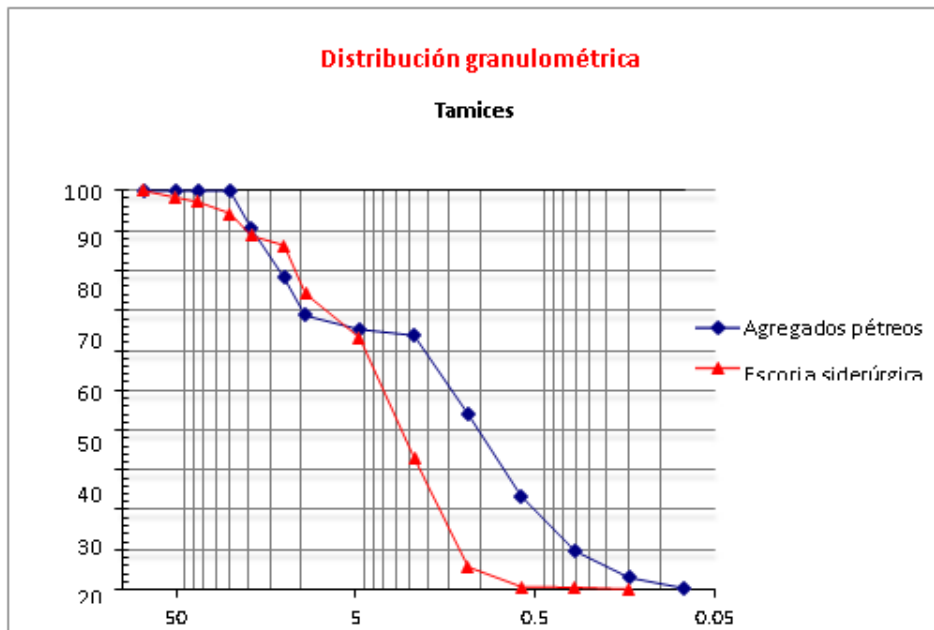
Ziari, H., Nowbakht, S., Rezaei, S., & Mahboob, A. (2015). Laboratory Investigation of Fatigue Characteristics of Asphalt Mixtures with Steel Slag Aggregates. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/623245>

## **ANEXOS**

ANEXO 1 - TRABAJO DE FIN DE TITULACION			
CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS MINERALES Y ESCORIA SIDERÚRGICA			
TEMA:	Uso de escoria siderúrgica en la elaboración de mezclas asfálticas con agregados de la localidad		
ELABORADO POR:	Jamil Alejandro Aucapiña Araque	FECHA:	may-19

Proveniente de : Escoria Siderúrgica proveniente de Planta Industrial ANDEC Guayaquil  
Agregado Mineral proveniente de Cantera Tenería Cantón Loja

Agregado mineral	
Densidad agregado grueso	2.706
Densidad Agregado fino	2.622
Abrasión (Máquina de los Áng	21.560 %
Partículas menores a 75um	14.240 %
Caras fracturadas	96.255 %



ANEXO 2 - TRABAJO DE FIN DE TITULACION			
CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL BITUMINOSO			
<b>TEMA:</b>	<i>Uso de escoria siderúrgica en la elaboración de mezclas a sfálticas con agregados de la localidad</i>		
<b>ELABORADO POR:</b>	<i>Jamil Alejandro Aucaña Araque</i>	<b>FECHA:</b>	jun-19

**Proveniente de :** Refinería Esmeraldas, Almacenado en planta de pavimentación "La Tenería" Cantón Loja, ciudad de Loja.

Nombre del ensayo	Normativa	Unidad	Mínimo Ref.	Valor
Viscosidad cinemática a 135 grados Celsius	ASTM D2170	Pa.s	210	364
Punto de inflamación en copa abierta de Cleveland	AASHTO T79-98	°C	232	298
Determinación del punto de fuego en copa Cleveland	AASHTO T79-98	°C	-	316
Penetración a 25 °C	ASTM D5	ths m/m	40	64.3
Densidad a 25 °C	ASTM D70	Poise	600 a 2400	2300
Punto de ablandamiento de material bituminoso	AASHTO T53	°C	-	57
Peladura del material bituminoso en áridos	ASTM D1559	%	10% max	5%

ANEXO 3.1 - TRABAJO DE FIN DE TITULACION			
CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO			
TEMA:	<i>Uso de escoria siderúrgica en la elaboración de mezclas asfálticas con agregados de la localidad</i>		
ELABORADO P	Jamil Alejandro Auca piña Araque	FECHA:	oct-19

CARACTERÍSTICAS PROBETAS SELECCIÓN DE CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO									
Diseño	% asfalto	Volumen	BULK	RICE	% VACÍOS	VMA	VFA	Estabilidad (lb)	Flujo (mm)
1	5.00	494.51	2.31	2.51	7.99	17.73	54.93	1997.44	8.00
2	5.00	484.69	2.32	2.51	7.70	17.47	55.93	2239.70	9.00
3	5.00	495.00	2.29	2.51	8.96	18.60	51.81	2183.62	7.50
4	5.50	485.84	2.32	2.48	6.37	17.76	64.13	1501.31	12.00
5	5.50	451.87	2.34	2.48	5.81	17.27	66.37	1772.37	12.50
6	5.50	489.53	2.34	2.48	5.70	17.17	66.81	2015.38	8.00
7	6.00	462.39	2.36	2.45	3.99	16.94	76.46	1865.83	12.00
8	6.00	475.37	2.35	2.45	4.09	17.03	75.97	1650.86	12.50
9	6.00	483.46	2.36	2.45	3.74	16.72	77.65	1977.99	5.00
10	6.50	485.88	2.36	2.44	3.38	17.24	80.40	2062.12	13.00
11	6.50	468.48	2.36	2.44	3.51	17.35	79.77	1594.78	15.00
12	6.50	487.86	2.37	2.44	3.02	16.93	82.16	1688.25	11.00
13	7.00	441.79	2.38	2.44	2.62	17.10	84.66	1351.76	16.00
14	7.00	488.72	2.37	2.44	2.87	17.31	83.41	1921.91	24.00
15	7.00	452.93	2.37	2.44	2.97	17.39	82.95	1744.33	16.00

ANEXO 4.1 - TRABAJO DE FIN DE TITULACION			
DISEÑOS MEZCLA ASFÁLTICA CON SUSTITUCIÓN			
TEMA:	<i>Uso de escoria siderúrgica en la elaboración de mezclas asfálticas con agregados de la localidad</i>		
ELABORADO POR:	Jamil Alejandro Aucapiña Araque	FECHA:	sep-19

DISEÑO SIN SUSTITUCION (50% grueso 45% fino 5% filler)							
Abertura tamiz	Agregado grueso	Agregado fino	Material filler	Escoria Siderúrgica	Masa parcial	Masa acum	Pasante
mm	g	g	g	g	g	g	%
25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
19.00	125.00	0.00	0.00	0.00	125.00	125.00	97.50
9.50	666.25	556.65	0.00	0.00	1222.90	1347.90	73.04
4.75	833.75	427.95	0.00	0.00	1261.70	2609.60	47.81
2.36	875.00	338.40	0.00	0.00	1213.40	3823.00	27.44
0.30	0.00	605.45	0.00	0.00	605.45	4428.45	15.33
0.075	0.00	321.55	0.00	0.00	321.55	4750.00	7.95
filler	0.00	0.00	250.00	0.00	250.00	5000.00	0.00

DISEÑO CON SUSTITUCION 5% (50% grueso 40% fino 5% filler 5% escoria siderúrgica)							
Abertura tamiz	Agregado grueso	Agregado fino	Material filler	Escoria Siderúrgica	Masa parcial	Masa acum	Pasante
mm	g	g	g	g	g	g	%
25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
19.00	125.00	0.00	0.00	0.00	125.00	125.00	97.50
9.50	666.25	494.80	0.00	0.00	1161.05	1286.05	74.28
4.75	833.75	380.40	0.00	0.00	1214.15	2500.20	50.00
2.36	875.00	300.80	0.00	172.36	1348.16	3848.36	26.56
0.30	0.00	538.18	0.00	68.43	606.61	4454.97	14.42
0.075	0.00	285.82	0.00	7.99	293.82	4748.79	7.92
filler	0.00	0.00	250.00	1.21	251.21	5000.00	0.00

DISEÑO CON SUSTITUCION 10% (50% grueso 35% fino 5% filler 10% escoria siderúrgica)							
Abertura tamiz	Agregado grueso	Agregado fino	Material filler	Escoria Siderúrgica	Masa parcial	Masa acum	Pasante
mm	g	g	g	g	g	g	%
25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
19.00	125.00	0.00	0.00	0.00	125.00	125.00	97.50
9.50	666.25	432.95	0.00	0.00	1099.20	1224.20	75.52
4.75	833.75	332.85	0.00	0.00	1166.60	2390.80	52.18
2.36	875.00	263.20	0.00	344.72	1482.92	3873.72	25.67
0.30	0.00	470.90	0.00	136.86	607.76	4481.49	13.52
0.075	0.00	250.10	0.00	15.99	266.08	4747.57	7.85
filler	0.00	0.00	250.00	2.43	252.43	5000.00	0.00

ANEXO 4.2 - TRABAJO DE FIN DE TITULACION			
DISEÑOS MEZCLA ASFÁLTICA CON SUSTITUCIÓN			
TEMA:	<i>Uso de escoria siderúrgica en la elaboración de mezclas asfálticas con agregados de la localidad</i>		
ELABORADO POR:	Jamil Alejandro Aucapiña Araque	FECHA:	oct-19

DISEÑO CON SU STITUCIÓN 15% (50% grueso 30% fino 5% filler 15% escoria siderúrgica)							
Abertura tamiz	Agregado grueso	Agregado fino	Material filler	Escoria Siderúrgica	Masa parcial	Masa acum	Pasante
mm	g	g	g	g	g	g	%
25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
19.00	125.00	0.00	0.00	0.00	125.00	125.00	97.50
9.50	666.25	371.10	0.00	0.00	1037.35	1162.35	76.75
4.75	833.75	285.30	0.00	0.00	1119.05	2281.40	54.37
2.36	850.00	225.60	0.00	517.08	1592.68	3874.08	24.79
0.30	0.00	403.63	0.00	205.29	608.92	4483.01	12.61
0.075	0.00	214.37	0.00	23.98	238.35	4721.36	7.84
filler	25.00	0.00	250.00	3.64	278.64	5000.00	0.00

DISEÑO CON SU STITUCIÓN 5% (50% grueso 23% fino 5% filler 22% escoria siderúrgica)							
Abertura tamiz	Agregado grueso	Agregado fino	Material filler	Escoria Siderúrgica	Masa parcial	Masa acum	Pasante
mm	g	g	g	g	g	g	%
25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
19.00	125.00	0.00	0.00	0.00	125.00	125.00	97.50
9.50	666.25	284.51	0.00	0.00	950.76	1075.76	78.48
4.75	833.75	218.73	0.00	0.00	1052.48	2128.24	57.44
2.36	875.00	172.96	0.00	758.39	1806.35	3934.59	23.55
0.30	0.00	309.45	0.00	301.09	610.54	4545.13	11.34
0.075	0.00	164.35	0.00	35.17	199.52	4744.65	7.35
filler	0.00	0.00	250.00	5.35	255.35	5000.00	0.00

**ANEXO 5 - TRABAJO DE FIN DE TITULACION**

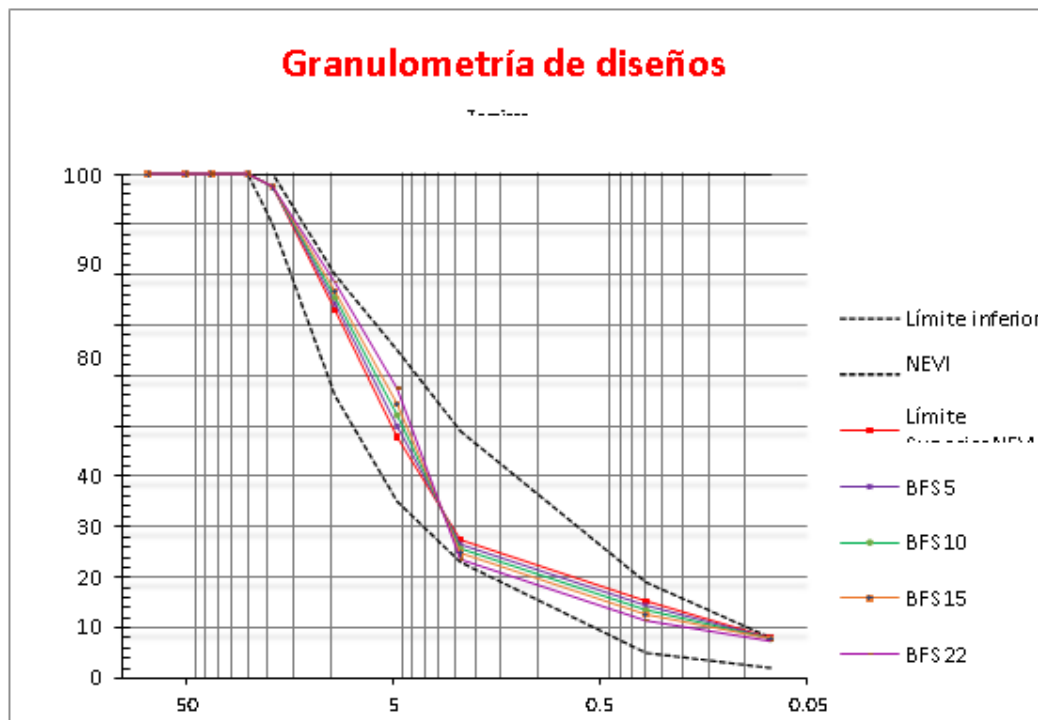
**RESUMEN DE DISEÑOS Y FRANJA GRANULOMÉTRICA**

<b>TEMA:</b>	<i>Uso de escoria siderúrgica en la elaboración de mezclas asfálticas con agregados de la localidad</i>		
<b>ELABORADO PO</b>	Jamil Alejandro Aucapiña Araque	<b>FECHA:</b>	oct-19

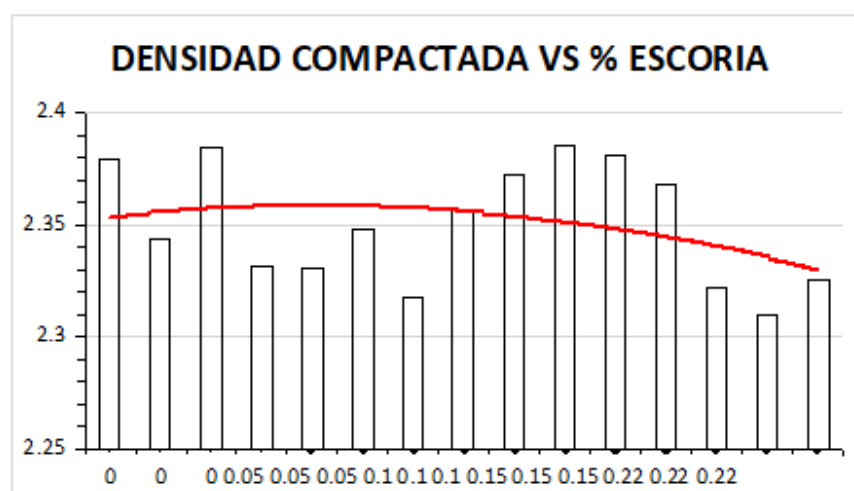
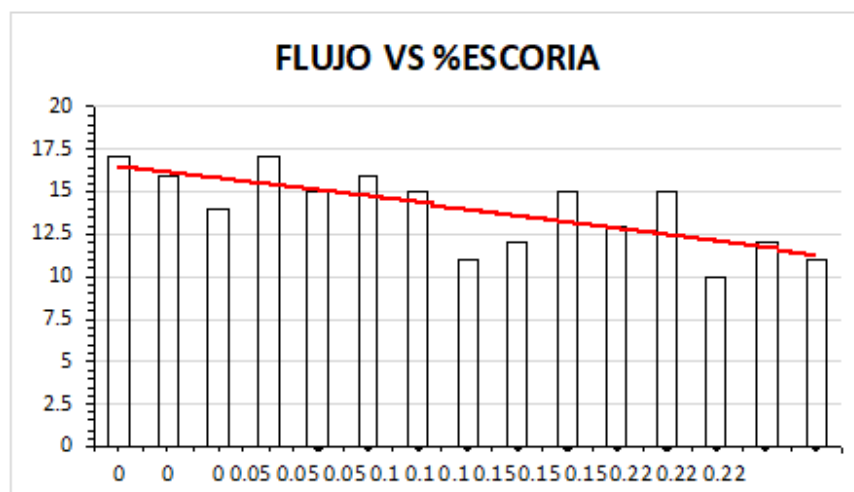
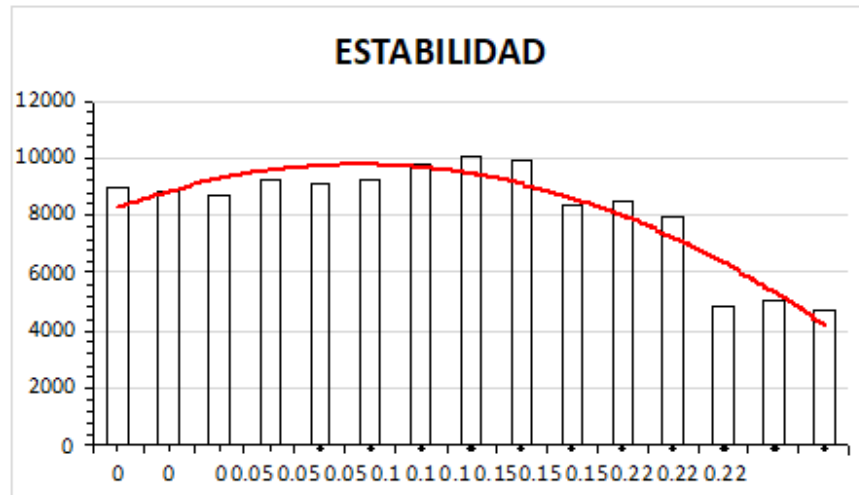
**RESUMEN GRANULOMÉTRICO DISEÑOS DE MEZCLA**

Serie	Abertura de tamiz	Lim. inferior NEVI	Lim. Superior NEVI	Escoria 0%	Escoria 5%	Escoria 10%	Escoria 15%	Escoria 22%
in	mm	% pasa	% pas a	% pasa	% pas a	% pasa	% pasa	% pasa
3"	76.10	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2"	50.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1 1/2"	37.50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1"	25.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3/4"	19.00	90.00	100.00	97.50	97.50	97.50	97.50	97.50
3/8"	9.50	56.00	80.00	73.04	74.28	75.52	76.75	78.00
#04	4.75	35.00	65.00	47.81	50.00	52.18	54.37	57.00
#08	2.36	23.00	49.00	27.44	26.56	25.67	24.79	23.00
#40	0.30	5.00	19.00	15.33	14.42	13.52	12.61	11.00
#200	0.08	2.00	8.00	7.95	7.92	7.85	7.84	7.00

**Granulometría de diseños**



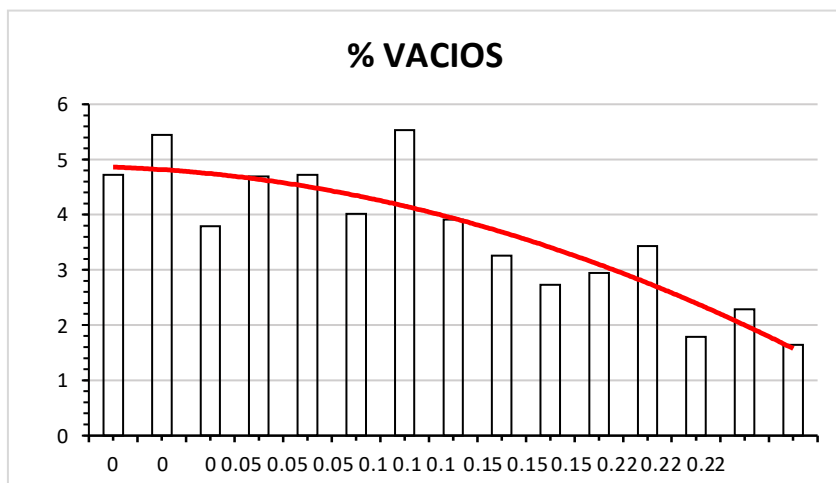
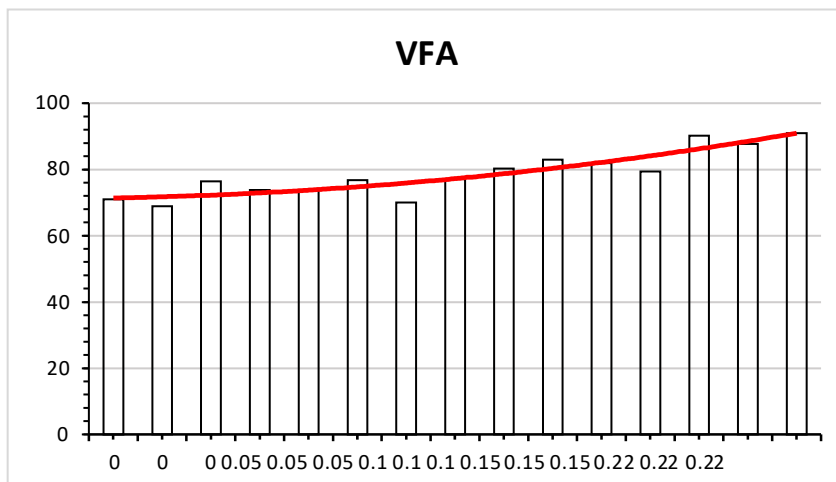
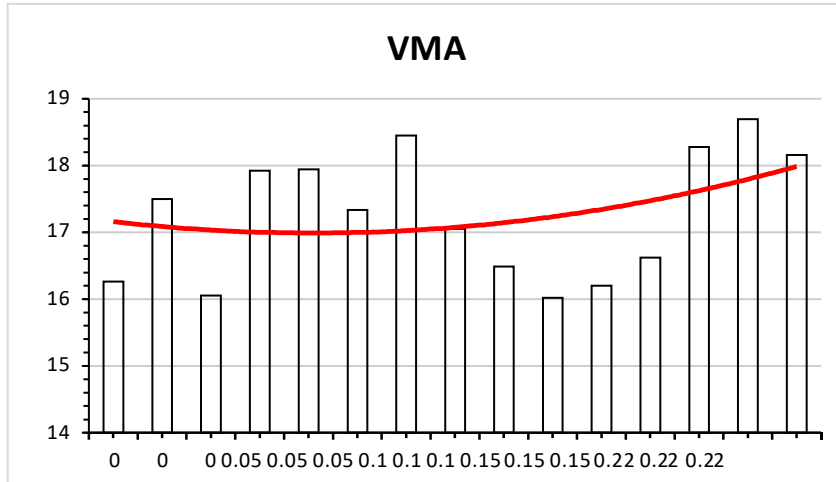
ANEXO 6.1- TRABAJO DE FIN DE TITULACION			
COMPARACIÓN DE SUSTITUCIONES			
TEMA:	<i>Uso de escoria siderúrgica en la elaboración de mezclas asfálticas con agregado de la localidad</i>		
ELABORADO POR:	Jamil Alejandro Aucapiña Araque	FECHA:	nov-19



**ANEXO 6.2- TRABAJO DE FIN DE TITULACION**

**COMPARACIÓN DE SUSTITUCIONES**

<b>TEMA:</b>	<i>Uso de escoria siderúrgica en la elaboración de mezclas asfálticas con agregado de la localidad</i>		
<b>ELABORADO POR:</b>	Jamil Alejandro Aucapiña Araque	<b>FECHA:</b>	nov-19



**ANEXO 6.3- TRABAJO DE FIN DE TITULACION****COMPARACIÓN DE SUSTITUCIONES**

<b>TEMA:</b>	<i>Uso de escoria siderúrgica en la elaboración de mezclas asfálticas con agregados de la localidad</i>		
<b>ELABORADO POR:</b>	Jamil Alejandro Aucapiña Araque	<b>FECHA:</b>	nov-19

**CARACTERÍSTICAS ESPECÍMENES CON SUSTITUCIÓN**

<b>Diseño</b>	<b>Volumen</b>	<b>BULK</b>	<b>RICE</b>	<b>% VACÍOS</b>	<b>VMA</b>	<b>VFA</b>	<b>Estabilidad (kN)</b>	<b>Flujo (mm)</b>
BFS 0	541.62	2.38	2.73	4.03	16.26	75.21	8964.82	17.00
BFS 0	548.01	2.34	2.73	5.45	17.50	68.87	8881.67	16.00
BFS 0	546.14	2.38	2.73	3.79	16.05	76.39	8715.36	14.00
BFS 5	543.84	2.33	2.69	4.70	17.92	73.79	9214.28	17.00
BFS 5	555.72	2.33	2.69	4.72	17.94	73.68	9089.55	15.00
BFS 5	536.59	2.35	2.69	4.01	17.33	76.84	9172.70	16.00
BFS 10	541.92	2.32	2.70	5.53	18.45	70.02	9754.77	15.00
BFS 10	535.35	2.36	2.70	3.91	17.05	77.07	10087.38	11.00
BFS 10	550.93	2.37	2.70	3.26	16.49	80.23	9921.07	12.00
BFS 15	557.84	2.39	2.72	3.29	16.02	79.45	8341.18	15.00
BFS 15	565.34	2.38	2.72	3.50	16.20	78.39	8507.48	13.00
BFS 15	534.47	2.37	2.72	3.99	16.62	76.00	7925.42	15.00
BFS 22	539.61	2.32	2.66	4.22	18.28	76.89	4807.20	10.00
BFS 22	551.22	2.31	2.66	4.71	18.69	74.80	5015.08	12.00
BFS 22	556.06	2.32	2.66	4.08	18.16	77.51	4682.47	11.00

ANEXO 7.1- TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN			
COMPARACIÓN DE SUSTITUCIONES			
<b>TEMA:</b>	<i>Uso de escoria siderúrgica en la elaboración de mezclas asfálticas con agregado de la localidad</i>		
ELABORADO POR:	Jamil Alejandro Aucapiña Araque	<b>FECHA:</b>	nov-19

Análisis de Precio Unitario Asfalto BFS 0%					
EQUIPOS					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo hor	Rendimie	Costo
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Herramienta menor (5% M.O)					0.05
Planta asfáltica	1.00	120.00	120.00	0.05	6.00
Cargadora frontal	1.00	35.00	35.00	0.05	1.75
Volqueta 12m3	0.25	28.14	7.04	0.05	0.35
Subtotal Equipos					8.10
MANO DE OBRA					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo hor	Rendimie	Costo
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
sponsable planta asfáltica E.O.	1.00	3.85	3.85	0.05	0.19
Cargadora frontal E.O. C1	1.00	4.04	4.04	0.05	0.20
Peón E2	3.00	3.60	10.80	0.05	0.54
Chofer Volquetas E.O. C1	0.25	5.29	1.32	0.05	0.07
Subtotal Mano de obra					1.00
MATERIALES					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo	
		A	B	C=A*B	
Grava Triturada 3/4" y 3/8"	m3	0.50	12.00	6.00	
Agregado fino	m3	0.45	12.00	5.40	
Material filler	m3	0.05	12.00	0.60	
Asfalto AC-20	kg	150.00	0.32	48.00	
Diesel	gl	12.65	1.62	20.49	
Escoria siderúrgica (BFS)	kg	0.05	0.00	0.00	
Subtotal Materiales					80.49
TRANSPORTE					
Descripción	Unidad	Distancia	Cantidad	Tarifa	Costo
			A	B	C=A*B
Subtotal Transporte					
Total costo directo (M+N+O+P)					89.60
Indirectos y utilidades				18%	16.13
<b>COSTO TOTAL</b>					<b>105.72</b>

ANEXO 7.2- TRABAJO DE FIN DE TITULACION			
COMPARACION DE SUSTITUCIONES			
<b>TEMA:</b>	<i>Uso de escoria siderúrgica en la elaboración de mezclas asfálticas con agregado de la localidad</i>		
ELABORADO POR:	Jamil Alejandro Aucapiña Araque	<b>FECHA:</b>	nov-19

Análisis de Precio Unitario Asfalto BFS 5%					
EQUIPOS					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo hor	Rendimie	Costo
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Herramienta menor (5% M.O)					0.05
Planta asfáltica	1.00	120.00	120.00	0.05	6.00
Cargadora frontal	1.00	35.00	35.00	0.05	1.75
Volqueta 12m3	0.25	28.14	7.04	0.05	0.35
Subtotal Equipos					8.10
MANO DE OBRA					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo hor	Rendimie	Costo
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
responsable planta asfáltica E.O.	1.00	3.85	3.85	0.05	0.19
Cargadora frontal E.O. C1	1.00	4.04	4.04	0.05	0.20
Peón E2	3.00	3.60	10.80	0.05	0.54
Chofer Volquetas E.O. C1	0.25	5.29	1.32	0.05	0.07
Subtotal Mano de obra					1.00
MATERIALES					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo	
		A	B	C=A*B	
Grava Triturada 3/4" y 3/8"	m3	0.50	12.00	6.00	
Agregado fino	m3	0.40	12.00	4.80	
Material filler	m3	0.05	12.00	0.60	
Asfalto AC-20	kg	150.00	0.32	48.00	
Diesel	gl	12.65	1.62	20.49	
Escoria siderúrgica (BFS)	kg	0.05	0.00	0.00	
Subtotal Materiales					79.89
TRANSPORTE					
Descripción	Unidad	Distancia	Cantidad	Tarifa	Costo
			A	B	C=A*B
Subtotal Transporte					
Total costo directo (M+N+O+P)					89.00
Indirectos y utilidades				18%	16.02
<b>COSTO TOTAL</b>					<b>105.01</b>

ANEXO 7.3- TRABAJO DE FIN DE TITULACION			
COMPARACIÓN DE SUSTITUCIONES			
<b>TEMA:</b>	<i>Uso de escoria siderúrgica en la elaboración de mezclas asfálticas con agregados de la localidad</i>		
ELABORADO POR:	Jamil Alejandro Aucapiña Araque	<b>FECHA:</b>	nov-19

Análisis de Precio Unitario Asfalto BFS 10%					
EQUIPOS					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo hor	Rendimie	Costo
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Herramienta menor (5% M.O)					0.05
Planta asfáltica	1.00	120.00	120.00	0.05	6.00
Cargadora frontal	1.00	35.00	35.00	0.05	1.75
Volqueta 12m3	0.25	28.14	7.04	0.05	0.35
Subtotal Equipos					8.10
MANO DE OBRA					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo hor	Rendimie	Costo
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
sponsable planta asfáltica E.O.	1.00	3.85	3.85	0.05	0.19
Cargadora frontal E.O. C1	1.00	4.04	4.04	0.05	0.20
Peón E2	3.00	3.60	10.80	0.05	0.54
Chofer Volquetas E.O. C1	0.25	5.29	1.32	0.05	0.07
Subtotal Mano de obra					1.00
MATERIALES					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo	
		A	B	C=A*B	
Grava Triturada 3/4" y 3/8"	m3	0.50	12.00	6.00	
Agregado fino	m3	0.35	12.00	4.20	
Material filler	m3	0.05	12.00	0.60	
Asfalto AC-20	kg	150.00	0.32	48.00	
Diesel	gl	12.65	1.62	20.49	
Escoria siderúrgica (BFS)	kg	0.10	0.00	0.00	
Subtotal Materiales					79.29
TRANSPORTE					
Descripción	Unidad	Distancia	Cantidad	Tarifa	Costo
			A	B	C=A*B
Subtotal Transporte					
Total costo directo (M+N+O+P)					88.40
Indirectos y utilidades				18%	15.91
<b>COSTO TOTAL</b>					<b>104.31</b>