



**FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y
URBANISMO**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE
INGENIERÍA CIVIL**

TESIS

**EFFECTOS DE SUSTITUIR AGREGADO GRUESO
CONVENCIONAL POR SIDERÚRGICO EN LAS
PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS EN CALIENTE**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

Autores

**Bach. Quipusco Villalobos, Frank Kaiser Leonardo
Bach. Villegas Villegas, Deiby Vander**

Asesor

Ing. Ruiz Saavedra, Nepton David

Línea de Investigación

Desarrollo de Nuevos Materiales

**Pimentel – Perú
2019**

**EFFECTOS DE SUSTITUIR AGREGADO GRUESO CONVENCIONAL POR
SIDERÚRGICO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE
MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE**

Aprobación de Tesis

Mg. Ing. Marín Bardales Noé Humberto
Presidente del Jurado de Tesis

Mg. Ing. Villegas Granados Luis Mariano
Secretario del Jurado de Tesis

Ing. Reinoso Torres Jorge Jeremy Junior
Vocal del Jurado de Tesis

Dedicatoria

A Dios por brindarnos la fortaleza necesaria y ser nuestro guía en el transcurso de nuestras vidas, a nuestros padres por el amor, consejos y esfuerzos en el desarrollo de nuestra vida personal y académica, a nuestros familiares que de alguna u otra manera nos apoyaron en nuestra vida universitaria.

Los autores

Agradecimientos

A nuestros padres por su apoyo incondicional para concluir nuestros estudios, a nuestros docentes, quienes nos proporcionaron los conocimientos necesarios para culminar exitosamente nuestra vida universitaria. A nuestro asesor, por la adecuada orientación para la elaboración de la presente investigación, al técnico Wilson Olaya Aguilar por su orientación constante en la realización de las pruebas de laboratorio, al Sr. Luis Bravo Quiroz† por el transporte de los materiales, a Siderperú y al Gobierno Regional Lambayeque por la donación de la escoria de acero y materiales convencionales respectivamente y a todas aquellas personas que nos brindaron su apoyo.

Los autores

Contenido

Contenido	v
Lista de figuras	viii
Lista de Tablas	x
Lista de Acrónimos	xii
Resumen	xiii
Abstract.....	xiv
I. INTRODUCCIÓN	15
1.1 Realidad Problemática	17
1.1.1 A nivel internacional	17
1.1.2 A nivel nacional.....	20
1.1.3 A nivel local	22
1.2 Antecedentes	24
1.2.1 A nivel internacional	24
1.2.2 A nivel nacional.....	29
1.2.3 A nivel local	30
1.3 Bases Teóricas	31
1.3.1 Introducción.....	31
1.3.2 Cemento Asfáltico	34
1.3.3 Agregados para mezclas asfálticas	41
1.3.4 Escoria de Acero.....	42
1.3.5 Método de diseño Marshall	57
1.4 Formulación del Problema	68
1.5 Justificación e Importancia	68
1.5.1 Académica	68
1.5.2 Tecnológica	68
1.5.3 Ambiental	69
1.5.4 Social	69
1.5.5 Económica	69
1.6 Hipótesis	70
1.7 Objetivos	70
1.7.1 Objetivo general	70
1.7.2 Objetivos específicos.....	70
1.8 Limitaciones de la Investigación	71

II. MATERIALES Y MÉTODOS	72
2.1 Tipo y Diseño de Investigación	73
2.1.1 Tipo de investigación	73
2.1.2 Diseño de la investigación	73
2.2 Población y Muestra	73
2.2.1 Población	73
2.2.2 Muestra	73
2.3 Variables, Operacionalización	73
2.3.1 Variable independiente	74
2.3.2 Variable dependiente	74
2.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.	74
2.4.1 Técnicas de recolección de datos	74
2.4.2 Instrumentos de recolección de datos	75
2.5 Procedimientos de Análisis de Datos	75
2.5.1 Estadística descriptiva	75
2.5.2 Estadística inferencial	76
2.5.3 Procedimiento para la obtención de datos y resultados	76
2.5.4 Procesamiento de los datos	78
2.6 Criterios Éticos	78
2.6.1 Confiabilidad	78
2.6.2 Honestidad	79
2.6.3 Equilibrio	79
2.6.4 Originalidad	79
2.6.5 Transparencia	79
2.6.6 Adecuada autoría y agradecimiento	79
2.6.7 Responsabilidad y seriedad	80
2.7 Criterios de Rigor Científico	80
2.7.1 Fiabilidad	80
2.7.2 Validez	80
2.7.3 Credibilidad	80
2.7.4 Transferibilidad o aplicabilidad	80
2.7.5 Replicabilidad	80
2.7.6 Relevancia	80

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	81
3.1 Resultados en Tablas y Figuras	82
3.1.1 Caracterización de agregados	82
3.1.2 Combinación Óptima de agregados.....	86
3.1.3 Diseño de la MAC.....	92
3.1.4 Propiedades físico-mecánicas preliminares.....	93
3.1.5 Porcentaje óptimo de asfalto.....	103
3.1.6 Propiedades físico-mecánicas optimizadas	104
3.1.7 Porcentaje óptimo de agregado siderúrgico.....	106
3.2 Resultados del Análisis Económico	109
3.3 Discusión de Resultados	110
IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	114
4.1 Conclusiones	115
4.2 Recomendaciones	116
REFERENCIAS	117
ANEXOS	
ANEXO 01 GLOSARIO DE TÉRMINOS	
ANEXO 02 DESCRIPCIÓN DE PRUEBAS EFECTUADAS MÁS IMPORTANTES	
ANEXO 03 PRUEBAS DE CONTROL DE CALIDAD AGREGADOS	
ANEXO 04 PRUEBAS FUNDAMENTALES AGREGADOS	
ANEXO 05 DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA	
ANEXO 06 PROCEDIMIENTO MARSHALL	
ANEXO 07 PRUEBA DE PERMEABILIDAD	
ANEXO 08 ANÁLISIS DE COSTO UNITARIO	
ANEXO 09 ESPECIFICACIONES CEMENTO ASFÁLTICO	
ANEXO 10 ESPECIFICACIONES AGREGADO SIDERÚRGICO	
ANEXO 11 PANEL FOTOGRÁFICO	

Lista de figuras

Figura 1. Deforestación y contaminación de agua, producto de la extracción de agregados.....	17
Figura 2. Canteras en la comunidad de Carlington, Ontario.....	18
Figura 3. Comparación de la producción mundial de acero crudo por regiones.....	19
Figura 4. Cantera de agregados en Pilcomayo.....	20
Figura 5. Variación anual en el consumo de aceros laminados 2017 respecto al 2016.....	21
Figura 6. Calles de pueblos jóvenes de Chiclayo sin pavimentar.....	22
Figura 7. Agrietamiento de las vías recién pavimentadas de Chiclayo.....	22
Figura 8. Estado de las vías del distrito de J. L. O.....	23
Figura 9. Cantera tres tomas, Ferreñafe.....	23
Figura 10. Cantera en el sector La Pluma, Batán Grande.....	23
Figura 11. Diagrama de flujo del proceso de refinado de petróleo crudo.....	35
Figura 12. Diagrama de flujo de los procesos de producción de hierro y acero.....	43
Figura 13. Representación Esquemática de un Horno de Arco Eléctrico (EAF).....	45
Figura 14. Composición química de la escoria de acero.....	47
Figura 15. Formas en las que existe la cal libre.....	48
Figura 16. Algunos instrumentos de recolección de datos.....	75
Figura 17. Representación esquemática del programa experimental llevado a cabo.....	76
Figura 18. Curva granulométrica Ag. Fino (Arena).....	83
Figura 19. Curva granulométrica Ag. Grueso (Piedra Chancada).....	84
Figura 20. Curva granulométrica Ag. Grueso (Escoria de Acero).....	85
Figura 21. Curva granulométrica de la comb. teórica de agregados con 0% de Escoria.....	86
Figura 22. Curva granulométrica de la comb. física de agregados con 0% de Escoria.....	87
Figura 23. Curva granulométrica de la comb. física de agregados con 25% de Escoria.....	88
Figura 24. Curva granulométrica de la comb. física de agregados con 50% de Escoria.....	89
Figura 25. Curva granulométrica de la comb. física de agregados con 75% de Escoria.....	90
Figura 26. Curva granulométrica de la comb. física de agregados con 100% de Escoria.....	91
Figura 27. Propiedades físico-mecánicas para una sustitución con 0% de Escoria.....	94
Figura 28. Propiedades físico-mecánicas para una sustitución con 25% de Escoria.....	96
Figura 29. Propiedades físico-mecánicas para una sustitución con 50% de Escoria.....	98
Figura 30. Propiedades físico-mecánicas para una sustitución con 75% de Escoria.....	100
Figura 31. Propiedades físico-mecánicas para una sustitución con 100% de Escoria.....	102

Figura 32. Propiedades físico-mecánicas para los cinco porcentajes de escoria sustituidos.....	106
Figura 33. Comparación de propiedades físico-mecánicas de MAC convencional y modificada	108

Lista de Tablas

Tabla 1	Producción nacional de acero crudo ($\times 10^3$ t) en los últimos años	21
Tabla 2	Pruebas requeridas para cementos asfálticos en la construcción de pavimentos.	37
Tabla 3	Composición química de la escoria de acero.	47
Tabla 4	Propiedades físicas fundamentales de la escoria de acero.....	49
Tabla 5	Resultados de la prueba de desprendimiento agregado- bitumen, Inmersión-Marshall.....	53
Tabla 6	Gradación típicas para escorias de OHF y BOF usadas en MACs.....	54
Tabla 7	Propiedades de valores Marshall en MACs de escoria de acero	54
Tabla 8	Requisitos para mezclas asfálticas en caliente.	67
Tabla 9.	Operacionalización de la variable independiente	74
Tabla 10.	Operacionalización de la variable dependiente	74
Tabla 11	Resultados de pruebas de control de calidad Ag. Fino (Arena)	82
Tabla 12	Resultados de pruebas de control de calidad Ag. Grueso (Piedra chancada).....	82
Tabla 13	Resultados de pruebas de control de calidad Ag. Grueso (Escoria de Acero)	82
Tabla 14	Resultados de pruebas fundamentales Ag. Fino (Arena)	83
Tabla 15	Resultados del análisis granulométrico Ag. Fino (Arena).....	83
Tabla 16	Resultados de pruebas fundamentales Ag. Grueso (Piedra Chancada)	84
Tabla 17	Resultados del análisis granulométrico Ag. Grueso (Piedra Chancada)	84
Tabla 18	Resultados de pruebas fundamentales Ag. Grueso (Escoria de Acero)	85
Tabla 19	Resultados del análisis granulométrico Ag. Grueso (Escoria de Acero).....	85
Tabla 20	Resultados del análisis gran. de la comb. teórica de agregados con 0% de Escoria	86
Tabla 21	Resultados del análisis gran. de la comb. física de agregados con 0% de Escoria.....	87
Tabla 22	Resultados del análisis gran. de la comb. teórica de agregados con 25% de Escoria	88
Tabla 23	Resultados del análisis gran. de la comb. teórica de agregados con 50% de Escoria	89
Tabla 24	Resultados del análisis gran. de la comb. teórica de agregados con 75% de Escoria	90
Tabla 25	Resultados del análisis gran. de la comb. teórica de agregados con 100% de Escoria	91
Tabla 26	Resumen de resultados del diseño de mezcla.....	92
Tabla 27	Resumen de resultados del diseño de mezcla (continuación)	92
Tabla 28	Propiedades físico-mecánicas, sustitución con 0% de Escoria (MAC Convencional).....	93
Tabla 29	Propiedades físico-mecánicas para una sustitución con 25% de Escoria.....	95
Tabla 30	Propiedades físico-mecánicas para una sustitución con 50% de Escoria.....	97
Tabla 31	Propiedades físico-mecánicas para una sustitución con 75% de Escoria.....	99

Tabla 32	Propiedades físico-mecánicas para una sustitución con 100% de Escoria.....	101
Tabla 33	Porcentaje óptimo de asfalto para cada porcentaje de agregado siderúrgico.	103
Tabla 34	Props. físico-mecánicas teóricas para los cinco porcentajes de escoria sustituidos.	103
Tabla 35	Propiedades físico-mecánicas reales para los cinco porcentajes de escoria sustituidos.	104
Tabla 36	Propiedades físico-mecánicas con los porcentajes de escoria más factibles	106
Tabla 37	Comparación de props. físico-mecánicas de MAC convencionales con modificadas ...	107
Tabla 38	ACU de la partida donde se empleará la MAC convencional.....	109
Tabla 39	ACU de la partida donde se empleará la MAC modificada	109

Lista de Acrónimos

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AC	Asphalt Cement (Cemento asfáltico)
AGI	American Geological Institute (Instituto Americano de Geología)
Alacero	Asociación Latinoamericana del Acero
AS	Agregado siderúrgico
ASTM	American Society for Testing and Materials
BOF	Basic Oxygen Furnace (Horno de Oxígeno Básico)
CE	Componente Estructural
CIELAP	Instituto Canadiense de Derecho y Política Ambiental
CSS	Cationic Slow Setting (Catiónica de quiebre lento, ver <i>emulsión asfáltica</i>)
DOT	Department of Transportation (Departamento de transporte)
EAF	Electric Arc Furnace (Horno de arco eléctrico)
EG	Especificaciones Generales
EM	Ensayo de Materiales
GTA	Greater Toronto Area (Área metropolitana de Toronto)
HG	Huso Granulométrico
MAC/HMA	Mezcla Asfáltica en Caliente / Hot Mix Asphalt
INV	Instituto Nacional de Vías
LEM	Laboratorio de Ensayo de Materiales
MTC	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
NTP	Norma Técnica Peruana
PCR	Partículas de Caucho Reciclado
PEN	Penetración
PG	Performance Grade (Grado de desempeño)
SBS	Styrene-Butadiene-Styrene (Estireno-Butadieno-Estireno)
SMA	Stone Matrix Asphalt ó Stone Mastic Asphalt (Asfalto de matriz pétreo)
SSA	Steel Slag Aggregate (Agregado de escoria de acero o siderúrgico)
WSA	World Steel Association (Asociación mundial del acero)

Resumen

La presente investigación se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Ensayo de Materiales (LEM) de la Universidad Señor de Sipán (USS) y tuvo como objetivo determinar los efectos que produce sustituir agregado grueso convencional por siderúrgico (escoria de acero) en las propiedades físico-mecánicas de mezclas asfálticas en caliente (MAC), producidas con agregados pétreos locales procedentes de la cantera La Pluma, ubicada en el distrito de Batán Grande, región Lambayeque, agregado siderúrgico (AS) proveniente de las instalaciones de Siderperú ubicada en la ciudad de Chimbote y cemento asfáltico de la refinería de Talara, región Tumbes, perteneciente a Petroperú. La investigación se inició con la recolección de los materiales y la caracterización de los agregados, incluyendo la escoria de acero, para luego elaborar la MAC, en la cual se reemplazó el agregado convencional (pétreo) por siderúrgico en 0%, 25%, 50%, 75% y 100% del peso del mismo. La efectividad del agregado siderúrgico fue evaluada principalmente según los valores arrojados de estabilidad y flujo Marshall de los especímenes probados en la máquina de carga a compresión (Aparato Marshall). Los resultados obtenidos muestran que, tanto los agregados convencionales como el agregado siderúrgico, cumplen con los requerimientos de calidad para agregados, establecidos en los estándares nacionales y que, mediante el reemplazo del agregado grueso convencional por siderúrgico, hasta en un 35.8%, se logra mejorar los valores de las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas, estimándose un nivel óptimo de reemplazo del 12.5%.

Palabras Clave

Agregado siderúrgico, escoria de acero, mezcla asfáltica en caliente, Marshall, Estabilidad, Flujo.

Abstract

This research was carried out in the facilities of Señor de Sipán University's Material Testing Laboratory (LEM) and was aimed to determine the effects of replacing conventional coarse aggregate by steel slag aggregate (SSA), in the physical and mechanical properties of hot mix asphalt (HMA), prepared with local crushed stone and sandstone aggregates from La Pluma quarry localized in Batán Grande – Chiclayo, steel slag aggregate from the facilities of Siderperú - Chimbote city, and asphalt cement from Talara's refinery. The Research started by materials collecting and performing the quality control and fundamentals tests for aggregates characterization, including steel slag aggregate, then the asphalt mixture was manufactured in which the conventional aggregate (crushed stone) was replaced by steel slag aggregate in 0%, 25%, 50%, 75% and 100% by weight of aggregates. The effectiveness of the SSA was judged according to Marshall stability and flow values of tested specimens on Marshall apparatus. Results showed that both, conventional and the steel slag aggregate, meet the quality requirements for aggregates, established in national standards. Also, was found that replacing up to 35.8% of crushed stone coarse aggregate by SSA improved the physical and mechanical properties of HMA and optimal replacement level was 12.5%.

Keywords

Steel slag aggregate, hot mix asphalt, Marshall, Stability, Flow

I. INTRODUCCIÓN

Algunas de las propiedades más importantes que las mezclas asfálticas en caliente deben tener, son adecuada estabilidad y flujo, propiedades de las cuales depende, en gran medida, el desempeño y la durabilidad de los pavimentos, es por ello que se requiere de materiales de calidad y procedimientos apropiados de diseño de mezcla para obtener los valores más adecuados de dichas propiedades.

En nuestro país, los caminos son diseñados acorde a los mejores estándares internacionales, por ejemplo, los de la AASHTO, Asphalt Institute y la ASTM, pero después de un corto periodo de servicio, algunos de esos caminos, muestran signos de daño debido a las duras condiciones ambientales y cargas de tráfico a las cuales son sometidos. Otro factor importante, el cual ocasiona los daños prematuros del pavimento, es la inadecuada selección de los agregados pétreos.

El agregado siderúrgico (AS) de escoria de acero, es un derivado del proceso de manufactura de acero, producido durante la separación del acero fundido, de las impurezas en los hornos de fabricación de acero. La escoria pasa de ser un líquido fundido, compuesto por una compleja solución de silicatos y óxidos, a ser una masa sólida cuando se enfría, este material es reciclable y puede ser muy útil en la industria de la construcción.

No todos los tipos de escoria son adecuados para ser usados como agregado, algunos tienen altos porcentajes de cal y óxido de magnesio que aún no han reaccionado con las estructuras de silicato y pueden hidratarse y expandirse en ambientes húmedos. Los que son adecuados pueden ser usados como reemplazo del agregado convencional en una gran variedad de aplicaciones de ingeniería.

La escoria de acero puede ser procesada como agregado fino o grueso, para luego ser usada en mezclas asfálticas en caliente o en frío, tanto de gradación densa como en mezclas de gradación abierta, además de tratamientos superficiales. Un adecuado procesamiento de la escoria de acero y procedimientos especiales de control de calidad son extremadamente importantes en la selección de dicho material para su uso en mezclas asfálticas, debido a su potencial expansivo, el cual si es ignorado puede ocasionar el agrietamiento del pavimento.

El uso de la escoria de acero debe limitarse a reemplazar sólo la fracción gruesa o fina, pero no ambas, ya que una mezcla asfáltica conteniendo el 100% de escoria es susceptible a una alta porción de contenido de vacíos de aire además que, dichas mezclas requerirían un alto contenido de cemento asfáltico durante su producción lo cual la hace susceptible también a deformaciones excesivas debidas a la compactación por las cargas de tráfico.

1.1 Realidad Problemática

La problemática que se presenta en las líneas siguientes, está enfocada principalmente en dar a conocer el impacto ambiental que genera la extracción de agregados pétreos (convencional o tradicional) y la disposición final de los residuos siderúrgicos, específicamente la escoria de acero. Por otro lado, también se abordarán los problemas que surgen debido a la falla de pavimentos asfálticos, enfatizando en pavimentos de vías urbanas.

1.1.1 A nivel internacional

En *Estados Unidos de América (USA)*, las operaciones de extracción y procesamiento de agregados son la principal causa de *preocupación* ambiental, ya que estas producen el incremento de polvo, ruido, vibraciones, incremento del tráfico cerca de las canteras, la perturbación visual y física de paisajes y hábitats, además de contaminar el agua superficial y subterránea (*Figura 1*). Esos impactos pueden ser controlados y mantenidos en niveles tolerables y restringidos mediante el uso de la tecnología, pero en muchas zonas, por ejemplo, cerca de ríos, áreas inestables y de algunos sistemas de agua subterránea, dado las características geológicas del sitio, surge mucha preocupación ambiental. La obtención de agregados puede cambiar las condiciones geológicas y potencialmente alterar el equilibrio dinámico de un determinado ambiente. (American Geological Institute, 2004).



Figura 1. Deforestación y contaminación de agua, producto de la extracción de agregados

Fuente: www.upcscavenger.com

En *Jordania* existen tres grandes fábricas de acero las cuales vierten sus residuos, entre ellos la escoria de acero, en áreas abiertas causando problemas ambientales altamente peligrosos (Asi, Qasrawi, y Shalabi, 2007).

En *Ontario, Canadá*, la extracción de agregados sigue siendo uno de los problemas más controversiales de uso de tierras, debido a que la demanda por este recurso, en ciudades de rápido desarrollo dentro de esta provincia, combinada con políticas y legislaciones que promueven la extracción de estos, ha conducido a una resistencia substancial a nuevas propuestas de operaciones de extracción. Este problema se ha convertido en controversial debido al daño que causa al paisaje natural y los impactos que produce en las comunidades locales (*Figura 2*), dado que, al explotar las canteras se remueve la vegetación natural, suelo y subsuelo, lo que provoca la pérdida de fauna silvestre, biodiversidad, sistemas acuáticos y cuando estas se ubican cerca de las comunidades afecta mucho el ruido, la contaminación y vibraciones que se producen. Sólo en las tres últimas décadas, la producción de agregado en Ontario ha oscilado entre 100 y 200 millones de toneladas anuales aprox., además, la Toronto Environmental Alliance estima que, en los próximos 25 años, el área metropolitana de Toronto (GTA) requerirá de 1500 millones de toneladas aproximadamente para la renovación y construcción de infraestructura (CIELAP, 2011).



Figura 2. Canteras en la comunidad de Carlinton, Ontario
Fuente: CIELAP, 2011

En *USA* se producen aproximadamente 21 millones de toneladas de escoria de acero al año, de las cuales la mayor parte es depositada en vertederos de acería, ocasionando desperdicio valioso de terrenos y pérdidas económicas importantes (Maryland DOT, 2015).

En *España*, la continua explotación de canteras produce un impacto ambiental importante que afecta en gran medida al paisaje natural, debido a que en este país se extraen anualmente unos 100 millones de toneladas de áridos (agregados) naturales de las más de 1700 canteras existentes, lo cual contribuye en el deterioro ambiental que se viene produciendo en los últimos años. Otro problema genera la construcción de vertederos donde se depositan escorias provenientes de la industria siderúrgica, las cuales restan espacios importantes que podrían ser aprovechados para fines más productivos (Retema, 2017).

Por lo que se puede observar, cada año que pasa se necesita de mayor cantidad de materiales de construcción para dotar de infraestructura a las naciones, y de esta manera mejorar la calidad de vida de una población mundial que va en aumento. Esto es un problema serio, debido a que, como se explicó en párrafos anteriores, para poder cubrir con la demanda de dichos materiales y eliminar los residuos producto de su elaboración, se producen impactos ambientales serios (Behnood y Ameri, 2012; World Steel Association, 2018b). En este caso el principal residuo es la escoria de horno de arco eléctrico, material que se obtiene al producir acero y que según C. H. Li, Xiang, Zhou, y Tu (2014); W. Li, Sun, y Zhang (2012); Wu, Xue, Ye, y Chen (2006); entre otros, representa entre un 15 y 20% del total producido, es decir, por cada tonelada de acero producida se obtiene entre 150 y 200 kg de escoria para eliminar sino se le da un buen uso, como el que se le pretende dar en este trabajo.

Considerando que la producción de acero crudo a nivel mundial para el año 2016 se estimó en 1627 millones de toneladas, de las cuales 417.8 se produjeron en horno eléctrico (World Steel Association, 2017) y que tiende al incremento con el pasar de los años, como se muestra en la *Figura 3*, entonces se puede estimar que anualmente se producen entre 244 y 325 millones de toneladas de escoria.

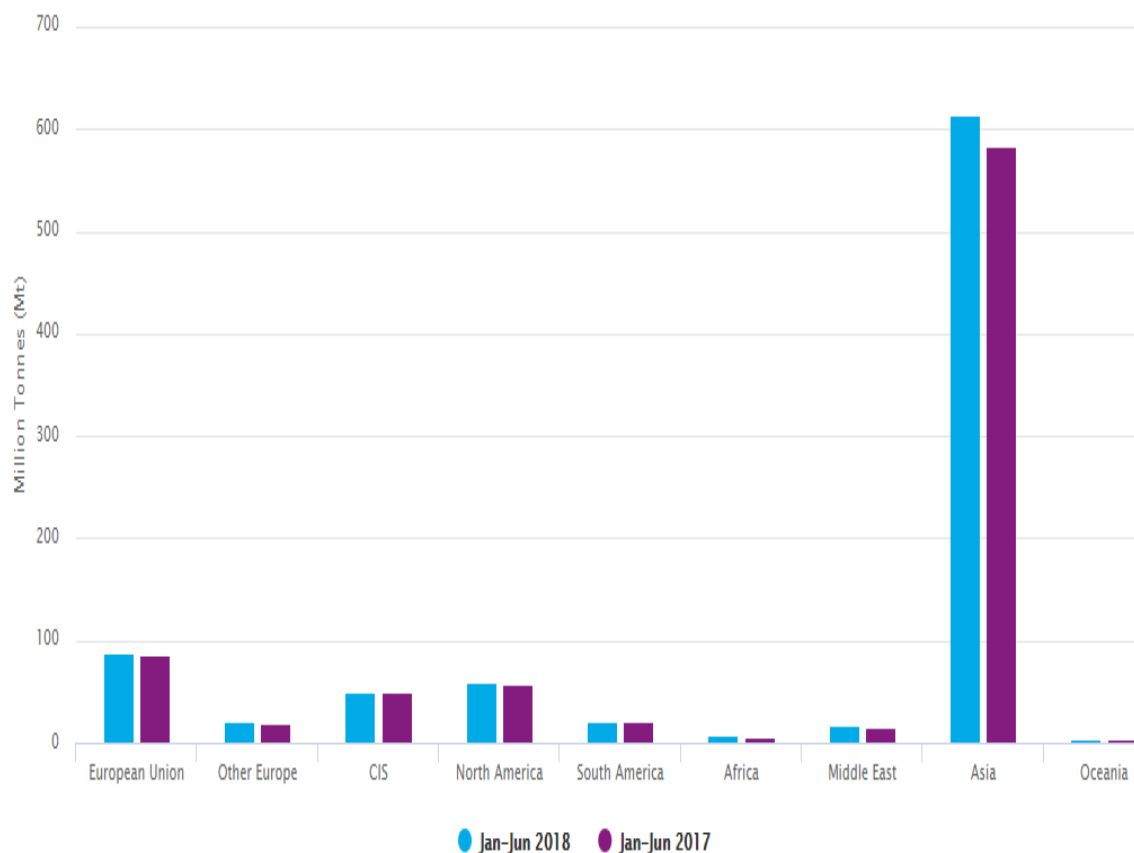


Figura 3. Comparación de la producción mundial de acero crudo por regiones
Fuente: World Steel Association (2018a)

1.1.2 A nivel nacional

En *Huancayo*, específicamente en el paraje de Aguanjarpa, distrito de Pilcomayo, la extracción de agregados viene generando problemas ambientales y conflictos sociales debido a que la *sobreexplotación de canteras* viene afectando a los terrenos de cultivo de los pobladores (*Figura 4*), quienes manifiestan que una empresa dedicada a esta actividad, la cual viene realizando trabajos desde hace varios años, está tratando de adueñarse de sus propiedades, para lo cual emplea químicos con lo cual “quemar” sus sembríos de trigo, tratando de amilanarlos para que de este modo abandonen sus terrenos y avanzar con la extracción de agregados. Según expresan dichos campesinos, de la cantera se movilizan aproximadamente entre 15 a 20 volquetes diarios con agregado, lo cual causa la preocupación de la población, especialmente de los campesinos quienes temen que sean despojados de sus terrenos de cultivo para ampliar la cantera (Diario Correo, 2014).



Figura 4. Cantera de agregados en Pilcomayo
Fuente: Diario Correo, 2014.

En *Lima*, según un estudio realizado por la Asociación de Víctimas de Accidentes de Tránsito (AVIACTRAN), estima que en esta ciudad por cada kilómetro recorrido se encuentran hasta ocho baches, por otra parte un arquitecto especialista en renovación urbano, el señor Fredy Mendoza asegura que aún existen redes de desagüe en las cuales se empleó tubos de asbesto-cemento, las cuales con el tiempo colapsan y crean problemas que afectan el pavimento lo cual se refleja en la capa asfáltica y si a esto se le suma el tránsito de vehículos pesados, la *calidad de la mezcla asfáltica* y el inadecuado mantenimiento, los resultados saltan a la vista; esta problemática influencia en las demoras de desplazamiento produciendo congestionamiento vehicular además de accidentes de tránsito y pérdidas económicas para los usuarios debido a que estos incurren en gastos de reparación de sus vehículos, los cuales borden aprox. los S/. 800 hasta S/. 1000 (Perú.com, 2016).

En nuestro país también se producen grandes cantidades de acero (*Tabla 1*) generalmente en hornos de arco eléctrico (WSA, 2017), lo cual se traduce en gran cantidad de escoria y que en los últimos años tuvo una tendencia al incremento.

Tabla 1

Producción nacional de acero crudo (x10³ t) en los últimos años

País/Año	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Argentina	5 387	5 541	4 013	5 138	5 611	4 995	5 186	5 488	5 028	4 126
Brazil	33 782	33 716	26 506	32 948	35 220	34 524	34 163	33 897	33 256	31 275
Chile	1 678	1 549	1 308	1 011	1 615	1 671	1 323	1 079	1 112	1 153
Colombia	1 245	1 053	1 052	1 208	1 287	1 302	1 236	1 208	1 211	1 272
Ecuador	87	128	259	372	463	425	570	667	720	576
Paraguay	95	83	54	59	30	44	45	47	48	35
Perú	881	1 110	718	880	877	981	1 069	1 078	1 082	1 168
Uruguay	71	86	57	65	81	78	91	94	97	61
Venezuela	5 005	4 224	3 808	2 207	2 980	2 359	2 139	1 485	1 345	553

Fuente: World Steel Association (2017)

Como complemento a la *Tabla 1* se muestra la *Figura 5*, donde se puede apreciar la variación anual en el consumo de aceros laminados del año 2017 respecto al 2016 en el Perú, el cual fue un 13%.

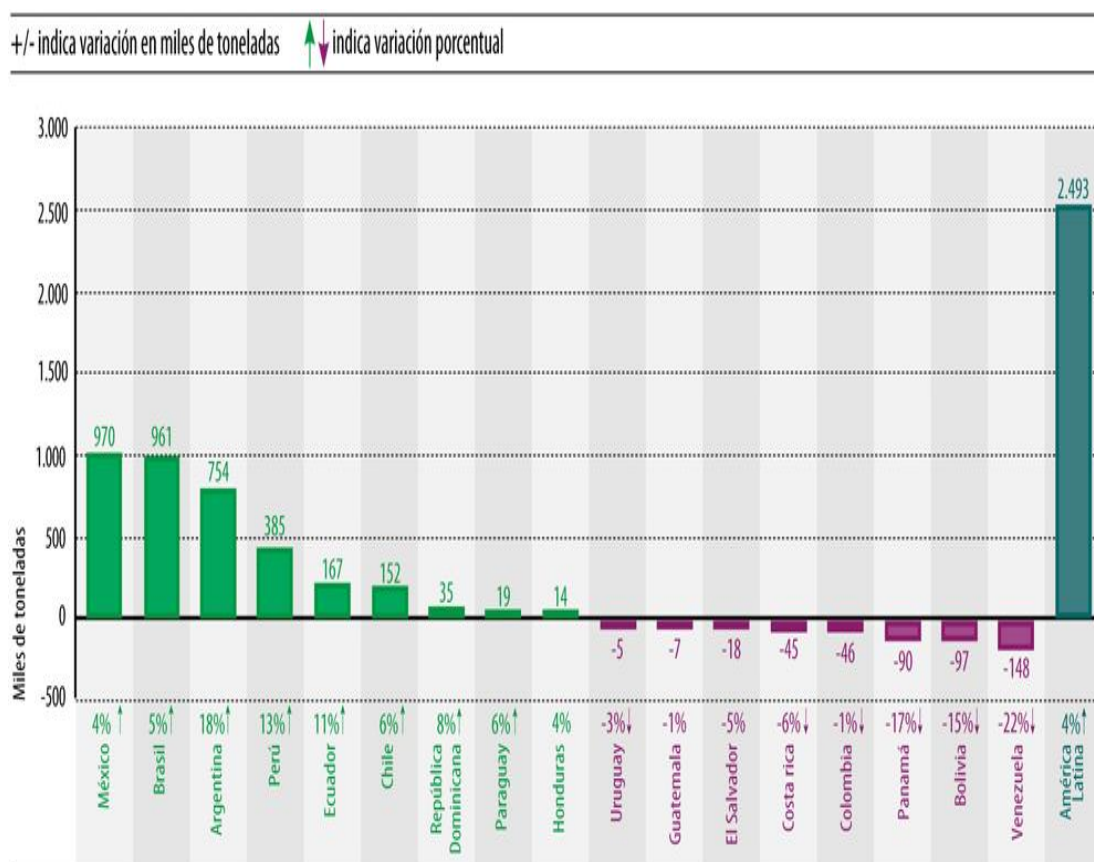


Figura 5. Variación anual en el consumo de aceros laminados 2017 respecto al 2016

Fuente: Asociación Latinoamericana del Acero (2018)

1.1.3 A nivel local

En *Chiclayo*, las autoridades de ese municipio reconocieron que por *falta de presupuesto* no se ha podido ejecutar obras de pavimentación de las vías de la ciudad, por lo cual se estima que aún falta pavimentar aproximadamente el 70% de dichas vías, esta problemática genera el malestar de los vecinos y especialmente de los transportistas. “Sólo se han realizado trabajos de mejoramiento, parchado y recapeo de calles principales, pero aún quedan por realizarse trabajos en avenidas principales” explicaron a un medio de prensa (RPP Noticias website, 2013). A las calles, especialmente de los pueblos jóvenes, sólo se les ha efectuado una nivelación y compactación (Tribunamochica, 2013).



Figura 6. Calles de pueblos jóvenes de Chiclayo sin pavimentar

Fuente: *Tribunamochica* (2013)

En *Chiclayo*, las vías que se pavimentaron en el centro de la ciudad, *presentan fisuras* que avanzan con el pasar de los días según constataron los especialistas del Colegio de Ingenieros de Lambayeque, los cuales manifestaron que de seguir así estas tendrían que ser parchadas. El decano de esta institución, explicó que dicha pavimentación inaugurada hace dos meses no durará ni un año por lo que, según él, se emplearon materiales de mala calidad en su construcción (Perú 21, 2014).



Figura 7. Agrietamiento de las vías recién pavimentadas de Chiclayo

Fuente: *Perú 21* (2014)

En *José Leonardo Ortiz*, la caótica situación política e institucional, ha ocasionado que gran parte de sus calles luzcan prácticamente inservibles. Según autoridades del municipio mencionan que, en este populoso distrito sólo el 10% de sus calles están pavimentadas y a esto se le suma el pésimo estado de las redes de agua y alcantarillado, todo esto es ocasionado por malos manejos del presupuesto y pésimos proyectos, los cuales son construidos y no cumplen con su período de vida útil (Diario Correo, 2017).



Figura 8. Estado de las vías del distrito de J. L. O.
Fuente: Diario Correo (2017)

A nivel regional también estamos expuestos a la misma problemática que genera la extracción de material de construcción en las diferentes canteras, tal como se describió en párrafos anteriores y se muestra en la *Figura 9* y *Figura 10*.



Figura 9. Cantera tres tomas, Ferreñafe.
Fuente: Fotografía propia



Figura 10. Cantera en el sector La Pluma, Batán Grande
Fuente: Fotografía propia

1.2 Antecedentes

1.2.1 A nivel internacional

Asi et al. (2007) en su investigación “*Use of Steel Slag Aggregate in Asphalt Concrete Mixes*” llevada a cabo en Jordania, estudiaron la efectividad del uso del agregado siderúrgico en la mejora de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas locales, para ello iniciaron evaluando la toxicidad, además de las propiedades físicas y químicas de la escoria, luego, al elaborar dicha mezcla, reemplazaron el agregado grueso pétreo por agregado siderúrgico en porcentajes de 0, 25, 50, 75 y 100. La efectividad del agregado siderúrgico se evaluó de acuerdo a la mejora en la resistencia a la tracción indirecta, el módulo resiliente, fatiga, la resistencia al ahuellamiento módulo de fluencia y resistencia a la pérdida de adherencia agregado-ligante de los especímenes de concreto asfáltico. Sus resultados muestran que, reemplazando hasta el 75% de agregado pétreo por siderúrgico, se mejora las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas y que la sustitución del 25% resultó ser la óptima.

Pérez (2008) en su investigación “*Evaluación de la Escoria de Horno Como Agregado en Mezclas Asfálticas*” realizada en Guatemala, se propuso evaluar la escoria como agregado en mezclas asfálticas de acuerdo a estándares internacionales, para lo cual, primero caracterizó el agregado convencional y el siderúrgico, luego diseñó tres mezclas de acuerdo a Marshall empleando distintas combinaciones de escoria-agregado (100%,0%), (70%,30%) y (0%,100%), usando como mezcla patrón la que contenía 100% de agregado convencional. Por último, evaluó las muestras y llegó a la conclusión que, la mezcla que presentó un mejor comportamiento fue la que combina agregados convencionales con escoria de acero.

Kök y Kuloğlu (2008) en su estudio “*Effects of Steel Slag Usage as Aggregate on Indirect Tensile and Creep Modulus of Hot Mix Asphalt*” realizada en Turquía, investigaron los efectos de la escoria de acero en la resistencia a la tracción indirecta (S_m) y la deformación a largo plazo (S), de mezclas asfálticas conteniendo: escoria de acero, basalto y piedra caliza. El contenido óptimo de asfalto se determinó acorde al método Marshall, determinado este, se elaboraron especímenes adicionales sólo para dichos contenidos a los cuales se les realizó un análisis volumétrico, culminando así su respectiva caracterización. Sus resultados muestran que los valores más altos de S_m y S se obtienen de las mezclas conteniendo escoria y basalto respectivamente, sin embargo, las mezclas con escoria también obtienen valores aceptables de S ; por último, también indican que existe cierta correlación entre los vacíos de aire y los valores de S_m y S .

Ahmedzade y Sengoz (2009) en su investigación “*Evaluation of Steel Slag Coarse Aggregate in Hot Mix Asphalt Concrete*” desarrollada en Turquía, evaluaron la influencia del uso de la escoria de acero como agregado grueso en las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas en caliente, para lo cual diseñaron cuatro mezclas diferentes conteniendo dos tipos de cemento asfáltico (AC-5 y AC-10) y dos de agregado grueso (convencional y escoria), luego se prepararon especímenes Marshall con lo que determinaron el contenido óptimo de asfalto y sus propiedades mecánicas mediante estabilidad Marshall, módulo de rigidez a la tracción indirecta, rigidez a la fluencia y pruebas de resistencia a la tracción indirecta. Sus resultados indican que la escoria de acero usada como agregado grueso mejoró las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas elaboradas.

Sofilié, Mladenovič, y Sofilié (2011) en su estudio “*Defining of EAF Steel Slag Application Possibilities in Asphalt Mixture Production*” llevada a cabo en Croacia, decidieron determinar la factibilidad de usar escoria de acero en mezclas asfálticas en caliente, para ello examinaron las propiedades físicas, químicas y mecánicas del mencionado producto (el cual fue recolectado de distintas fabricas de acero) a través de diferentes pruebas de laboratorio. Comparando los resultados de dichas pruebas entre los productos de distintos fabricantes, además con las propiedades del agregado convencional, llegaron a la conclusión de que la escoria de acero posee propiedades físicas y mecánicas igual de buenas y puede usarse en la producción de MACs, con la única desventaja que puede presentar inestabilidad volumétrica.

W. Li et al. (2012) en su investigación “*Laboratory Test Study on Asphalt Concrete with Steel Slag Aggregates*” realizada en China, estudiaron la factibilidad del uso de la escoria de acero como agregado en la capa de rodadura, para lo cual llevaron a cabo una serie de pruebas en mezclas de concreto asfáltico diseñadas empleando el método de Marshall y elaboradas con cemento asfáltico y partículas de agregado siderúrgico, luego se realizó un análisis estadístico de los resultados obtenidos, los cuales fueron comparados con los de la mezcla convencional arrojando que, el concreto asfáltico elaborado con cemento asfáltico y agregado siderúrgico posee muy alta rigidez, alta resistencia a la deformación y al agrietamiento. Por último, mencionan que, si se quiere cumplir con los requerimientos del código chino para mezclas de concreto asfáltico, el agregado siderúrgico puede ser aplicado sin problemas para conformar la capa de rodadura en lugar de los agregados pétreos, además de tener un efecto económico notable y una amplia posibilidad de aplicaciones.

Hainin et al. (2012) en su trabajo denominado “*Steel Slag as an Aggregate Replacement in Malaysian Hot Mix Asphalt*” realizado en Malasia, elaboraron MACs de gradación densa siguiendo el procedimiento Marshall y usando escoria de acero en reemplazo del agregado convencional, ya que posee características similares y es relativamente fácil de obtener. Sometieron a los especímenes elaborados a pruebas de módulo resiliente, ahuellamiento y deformación a largo plazo, encontrando que, la MAC modificada presentó mejor desempeño que la convencional, por lo que concluyeron que, el uso de la escoria de acero en la MACs es factible y favorable para el medio ambiente.

C. H. Li et al. (2014) en su estudio “*Utilization of Steel Slag as Aggregates for Porous Asphalt Mixture*” desarrollada en China, investigaron la viabilidad de usar escoria de acero como agregado en MACs de gradación abierta, para lo que elaboraron especímenes porosos y permeables a base de agregados pétreos y siderúrgicos, luego, evaluaron propiedades como la resistencia a la tracción indirecta, estabilidad residual, filtración y resistencia al ahuellamiento. Sus resultados indican que la combinación de dichos agregados conducen a un buen desempeño del concreto asfáltico. Por otro lado no dejan de hacer mención a la problemática que genera la escoria de acero en ese país, debido a que la mayor parte de ella es depositada en campos de almacenamiento.

Ziari, Nowbakht, Rezaei, y Mahboob (2015) en su “*Laboratory Investigation of Fatigue Characteristics of Asphalt Mixtures with Steel Slag Aggregates*” desarrollada en Irán, estudiaron la efectividad de la escoria de acero en la mejora de las propiedades de MACs, especialmente en la resistencia a la fatiga, para ello empezaron evaluando las propiedades físicas y luego elaboraron 13 tipos de mezcla conteniendo escoria en sustitución proporcional del agregado fino y otras, del agregado grueso. Sus resultados muestran que el reemplazo del 50% de gruesos o finos convencionales por escoria mejora las propiedades mecánicas de las MACs.

Khodary (2015) en su “*Comparative Study of Using Steel Slag Aggregate and Crushed Limestone in Asphalt Concrete Mixtures*” comparó el efecto de reemplazar agregado grueso convencional por escoria de acero en las propiedades de MACs elaboradas con un rango de 4% a 6% de contenido de asfalto, encontrando que el contenido óptimo de este, para la MAC convencional fue de 5.02% y para la modificada de 5.60%, también que, esta última presentó valores de estabilidad Marshall igual a 1.5 veces más altos que la convencional.

Wen, Wu, y Bhusal (2016) en su *“Performance Evaluation of Asphalt Mixes Containing Steel Slag Aggregate as a Measure to Resist Studded Tire Wear”* llevada a cabo en USA, evaluaron el desempeño MACs conteniendo agregado siderúrgico (AS) y mitigar el desgaste en superficies de rodadura sometidas al paso de neumáticos tachonados, para ello evaluaron las propiedades físicas del AS y así determinar qué tan adecuado es para una MAC. Posteriormente se usaron cuatro porcentajes (0, 20, 40 y 60) de AS en las MAC, luego se diseñaron aplicando el método Superpave y por último evaluaron su desempeño en términos de resistencia al desgaste por neumáticos tachonados, ahuellamiento, resistencia al agrietamiento térmico y susceptibilidad a la humedad. Sus resultados indican que la adición de AS en MAC incrementó todas las propiedades antes mencionadas, excepto en la última y en la resistencia al agrietamiento por fatiga, en los cuales no tuvo efecto alguno, con lo cual concluyeron que el uso del AS es beneficioso, especialmente donde usan neumáticos tachonados debido a la nieve, y podría usarse para extender la vida útil de dichos pavimentos.

Segura (2016) en su *“Estudio del Comportamiento Físico y Mecánico de Mezclas Asfálticas; con Materiales Reutilizables en la Construcción Como Escoria de Acero”* desarrollada en Colombia, investigaron el comportamiento físico y mecánico de mezclas asfálticas elaboradas con agregado siderúrgico, para ello realizó pruebas preliminares con diferentes muestras, obteniendo que una muestra con 5.5% de asfalto sería la adecuada para evaluar su comportamiento, entonces procedió a caracterizar tanto el agregado convencional como el siderúrgico para luego diseñar la mezcla de acuerdo al método Marshal, teniendo en cuenta además la norma INV. E-748-13. Usó como mezcla patrón, la mezcla diseñada con 100% de agregado convencional, de esta manera comparó los resultados obtenidos, los cuales muestran que las mezclas asfálticas que combinan agregados convencionales con siderúrgicos presentan un mejor comportamiento frente a las distintas solicitudes.

Groenniger, Cannone, Isailović, Wang, y Wistuba (2017) en su estudio *“Experimental Investigation of Asphalt Mixture Containing Linz-Donawitz Steel Slag”* realizado en Alemania, investigaron la resistencia al agrietamiento a bajas temperaturas, deformación permanente, rigidez y fatiga de diferentes mezclas asfálticas preparadas con 100% de escoria y una mezcla de asfalto convencional, luego emplearon métodos sofisticados de pruebas para evaluar los parámetros clave de desempeño, según sus resultados, concluyen que las mezclas preparadas con escoria de acero, son adecuadas para la construcción de pavimentos y en la mayoría de los casos presentan un mejor comportamiento que las mezclas convencionales.

López (2017) en su investigación de tesis *“Mejoramiento de la Carpeta Asfáltica a Base de Escoria Siderúrgica para Pavimentos Flexibles (mezcla asfáltica)”* realizada en Ecuador, tuvo como objetivo mejorar el comportamiento y durabilidad de capas de rodadura, para lo cual empleó escoria siderúrgica en reemplazo de un porcentaje del agregado convencional. Partió del diseño de una mezcla asfáltica convencional (patrón) empleando el método Marshall, la cual le sirvió como referencia para realizar la comparación de sus propiedades con respecto a mezclas asfálticas usando diferentes porcentajes tanto en peso como en volumen de escoria. Como resultado obtuvo que la combinación de 37.8% de agregado grueso (escoria), 48.87% de agregado intermedio – fino, 5.53% de filler y un 7.80% de cemento asfáltico AC-20 presentó una estabilidad y fluencia adecuada.

Maharaj, White, Maharaj, y Morin (2017) en su investigación *“Re-use of Steel Slag as an Aggregate to Asphaltic Road Pavement Surface”* desarrollada en Trinidad y Tobago, se propusieron investigar la influencia de la escoria de acero (0-20% del peso de agregado ϕ $\frac{3}{4}$ ”) en MACs para lo cual emplearon la estabilidad Marshall como criterio para determinar el óptimo contenido de escoria. Los resultados que obtuvieron revelaron que un contenido de escoria de 15% del peso de agregado de ϕ $\frac{3}{4}$ ” (o 2.25% del peso total de la mezcla) fue el óptimo según la estabilidad Marshall y vacíos de aire, por lo que concluyeron que el agregado siderúrgico usado de este modo, mejora el desempeño de los pavimentos además de ser amigable con el medio ambiente y presentar un manejo eficiente de los materiales residuales, producto de los procesos siderúrgicos, para así preservar el ambiente.

Santos (s.f.) en su estudio *“Utilização do Agregado Siderúrgico (escória de aciária) em Pavimentação Asfáltica”* realizada en Brasil, muestran la viabilidad del uso de la escoria en una mezcla asfáltica del tipo SMA, debido a que la demanda por este tipo de mezcla en ese país viene en incremento por las distintas ventajas que posee, para ello se realizaron diversas pruebas de las cuales se concluye que puede ser una alternativa viable; desde el punto de vista económico el uso de la escoria es ventajoso por su bajo costo, cerca del 12% del agregado convencional y también desde el punto de vista técnico, por ser más resistente.

1.2.2 A nivel nacional

Choque (2012) en su investigación *“Viabilidad Para el Uso de la Escoria de Acería Eléctrica Como Agregado en Mezcla Asfáltica en la Ciudad de Chimbote”* caracterizó la escoria y el agregado convencional, luego elaboró tres tipos de MACs empleando combinaciones de escoria-agregado convencional (100%, 0%), (70%, 30%), (40%, 60%), posterior a ello elaboró los especímenes y realizó las pruebas según el método Marshall. Sus resultados revelan que las mezclas que combinan agregado convencional con siderúrgico presentan mejor desempeño, con lo cual concluye que es viable el uso de la escoria de acero como agregado de mezclas asfálticas, siempre y cuando ésta presente una adecuada estabilidad volumétrica, debido a que de este modo se logra obtener beneficios técnicos, económicos y ambientales en comparación con el agregado convencional.

Cervera B. (2016) en su estudio *“Influencia en las Propiedades Mecánicas de una Mezcla Asfáltica Incorporando Caucho Reciclado de Neumáticos, Cajamarca, 2016”* usó partículas de caucho reciclado (PCR) como agregado grueso, en cantidades de 0.5% y 1% respecto al peso del agregado pétreo para la elaboración de MACs. Las pruebas se realizaron sobre especímenes elaborados con distintos porcentajes de PEN (85/100) y compactados para tráfico pesado, luego comparó sus características de Estabilidad y Flujo. Evaluando los resultados obtenidos llegó a la conclusión de que la adición de PCR en la MAC tiene un efecto positivo ya que, incrementa y mejora la interrelación de Estabilidad vs Flujo en un 50%, por otra parte los costos unitarios de la mezcla mejorada son un 5.05% más caros respecto a la mezcla tradicional cuando se emplea un 1% de PCR, pero esto se compensa con el ahorro en los costos de mantenimiento, debido a que en un plazo de 5 años, los costos se reducen a 8.4% referente al pavimento convencional.

Zelada M. (2016) en su investigación *“Valoración Económica de la Escoria de Horno Eléctrico de Siderperú Como Producto Alternativo a la Piedra Cantero en el Sector Construcción”*, realizó un análisis de la viabilidad técnica y comercial del material para así establecer los requisitos necesarios para su adecuada comercialización dentro de la provincia del Santa. Como resultado obtuvo que al comercializar el producto la empresa generaría ingresos anuales de aproximadamente S/. 402 mil, además de beneficios intangibles debido a que proyectará una imagen ecoamigable y la adopción de una alternativa inteligente de aprovechamiento de sus residuos y por otra parte frenar el impacto ambiental a causa de la explotación de canteras de agregados pétreos.

1.2.3 A nivel local

Chávez Q. y Herna A. (2014) en su estudio *“Elaboración de Mezclas Asfálticas con Partículas de Caucho Reciclado en el Departamento de Lambayeque”* usaron caucho proveniente de neumáticos reciclados en forma de polvo y filamento para elaborar MACs, variando la cantidad de estos en tres porcentajes respecto al peso total de los agregados. Luego de compactar los especímenes para tres tipos de tránsito y de realizar las pruebas respectivas siguiendo el procedimiento Marshall, evaluaron y compararon los resultados obtenidos de Estabilidad y el Flujo de los mismos, llegando a la conclusión de que la incorporación de PCR influye positivamente en dichas propiedades.

Galvez Ch. y Valladolid S. (2015) en su *“Estudio Comparativo de las Mezclas Asfálticas en Frío, con Escoria Siderúrgica y Otra Convencional”* realizada en Chiclayo, caracterizaron los agregados y la emulsión MC-30, para luego elaborar y compactar las mezclas asfálticas siguiendo el método Marshall. Sus resultados muestran que es factible el uso de la escoria de acero, aun cuando no aumenta significativamente la Estabilidad, ya que se aprovecha dicho residuo.

Valera Nuñez (2018) en su *“Evaluación del Efecto de la Cal Hidratada y el Polvo de Ladrillo Utilizado Como Relleno Mineral en las Propiedades de una Mezcla Asfáltica”*, realizó un análisis comparativo de MACs diseñadas por el método Marshall, para lo cual, evaluó una mezcla convencional (usando como filler netamente cal hidratada) elaborada con el óptimo contenido de asfalto y tres mezclas usando como filler combinaciones, en porcentaje, de cal-polvo de ladrillo (80-20, 60-40, 50-50, 40-60, 20-80 y 0-100). El polvo de ladrillo fue producido por desintegración, de trozos de ladrillos los cuales obtuvo de los residuos de demolición de edificaciones. Los resultados revelan que el óptimo contenido de asfalto (5.7%) de la mezcla convencional no sufrió variación al reemplazar la cal por el polvo de ladrillo y también que, el flujo de la mezcla disminuye y la estabilidad aumenta lo que conduce a una mezcla más rígida pero con mayor resistencia a la deformación, con lo cual concluyó que, el polvo de ladrillo altera las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, teniendo efectos positivos en cuanto a estabilidad y medio ambiente pero con efectos negativos para la adherencia y durabilidad, además de resultar más costosa, un 77% con respecto a la mezcla tradicional.

1.3 Bases Teóricas

1.3.1 Introducción

1.3.1.1 General

El pavimento asfáltico es el tipo de pavimento predominante a nivel mundial. El asfalto se usa para todo tipo de aplicaciones, las cuales van desde, pavimentado de calles residenciales a vías expresas, entre otras (Asphalt Institute, 2015).

Dependiendo del tráfico, clima, disponibilidad de materiales y la ubicación dentro de la estructura del pavimento, el tipo de mezcla seleccionada y criterio de diseño de la misma serán diferente. Pruebas de sensibilidad a la humedad, y más recientemente, pruebas de desempeño, se han implementado para determinar el diseño final de la mezcla (Asphalt Institute, 2015).

1.3.1.2 Definición de asfalto y mezcla en caliente

En diferentes partes del mundo, el término “asfalto” tiene diferentes significados, por ejemplo, en Europa, asfalto es sinónimo de lo que en nuestro medio se conoce como Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC) o Concreto Asfáltico, y el término “bitumen” es sinónimo de lo que en nuestro medio se conoce como asfalto, cemento asfáltico o ligante asfáltico.

En el presente documento se usarán los términos “asfalto o cemento asfáltico”, de manera intercambiable, para identificar a la sustancia derivada del petróleo que es utilizada como ligante y “mezcla asfáltica o concreto asfáltico” para referirse a la combinación de agregados, mezclados uniformemente, y cubiertos por una película de asfalto.

1.3.1.3 Clasificación de mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas pueden ser producidas a partir de un amplio rango de combinaciones de agregado, cada una teniendo características particulares, adecuadas para usos específicos de diseño y construcción. Como se mencionó líneas arriba, la mezcla asfáltica consiste de una combinación de agregados y asfalto, los cuales deben ser calentados antes de proceder al mezclado, es por ello que se le agrega la palabra caliente, con lo cual se dice que dicha mezcla es una mezcla asfáltica en caliente.

Mezclas asfálticas de Gradación Densa

Una mezcla de gradación densa posee una gradación de agregado bien distribuida a través del rango de tamices usados. Este tipo de gradación es la que mayormente se especifica para los proyectos y puede ser usada en la capa base, subbase y de rodadura.

Mezclas asfálticas de Gradación Abierta

Una mezcla de gradación abierta, es una mezcla diseñada para tener un gran volumen de vacíos de aire, típicamente entre 18% y 22% (Asphalt Institute, 2015), de modo que el agua drene rápidamente a través de la capa de pavimento.

Mezclas asfálticas de Gradación Incompleta o SMA

Las mezclas de gradación incompleta o SMA es una mezcla asfáltica con un alto contenido de agregado grueso (comúnmente 70 a 80 por ciento), un alto contenido de asfalto (normalmente más de 6%), y un alto contenido de filler (aproximadamente 10 por ciento del peso). El resultado es una mezcla durable que tiene un excelente contacto piedra sobre piedra, el cual es muy resistente al ahuellamiento (Asphalt Institute, 2015).

La mezcla asfáltica tibia, no es un tipo de mezcla, sino que se refiere a cualquier mezcla producida a bajas temperaturas, usando una variedad de tecnologías las cuales mantienen la trabajabilidad requerida para ser colocadas de manera adecuada.

1.3.1.4 Objetivos del diseño de mezcla.

El primer objetivo del diseño de mezcla es determinar la combinación de asfalto y agregado que aportará el mejor desempeño como parte de la estructura del pavimento. El diseño de mezcla involucra procedimientos de laboratorio desarrollados para establecer las proporciones necesarias de material para la elaboración de la mezcla asfáltica, dichos procedimientos incluyen la determinación de una combinación adecuada de agregados para producir una gradación determinada de los mismos y seleccionar el tipo y cantidad de asfalto que será usado como ligante de dicha gradación.

Una mezcla asfáltica bien diseñada puede servir satisfactoriamente por muchos años bajo una variedad de cargas y condiciones ambientales. El diseño de mezcla es sólo el punto de inicio para asegurarse de que una capa de pavimento asfáltico se desempeñe tal como fue prevista (Asphalt Institute, 2015).

El objetivo final de un diseño de mezcla es seleccionar sólo un contenido de asfalto, el cual logrará un balance entre todas las propiedades deseadas. El desempeño último del pavimento está relacionado a la durabilidad, impermeabilidad, resistencia, estabilidad, rigidez, flexibilidad, resistencia a la fatiga y trabajabilidad. Dentro de este contexto, no existe un único contenido de asfalto que maximice todas esas propiedades, en vez de ello, el contenido de asfalto se selecciona en base a la optimización de las propiedades necesarias para condiciones específicas.

1.3.1.5 Evolución del diseño de mezcla

El primer uso registrado del asfalto en pavimentos fue en la ciudad de Babilonia, cuando entre los años 625 A.C. y 604 A.C., se pavimentó la calle Procesión cercana al palacio del rey Nabopolassar. Por otro lado, los primeros pavimentos asfálticos en USA fueron construidos en Newark, New Jersey (1870), y en Washignton D.C. (1876) en la avenida Pennsylvania (Asphalt Institute, 2015).

En 1905 Clifford Richardson, quien fuera considerado como el tecnólogo de asfalto más reconocido de su tiempo, escribió el primer libro acerca de ingeniería de pavimentos, denominado *The Modern Asphalt Pavement* (El pavimento asfáltico moderno), en el cual hace énfasis en la importancia de los vacíos de aire (V_a) y vacíos en el agregado (VMA).

Así fue pasando el tiempo, hasta que, en la década de 1930, Francis Hveem, un ingeniero de materiales e investigador en la división de caminos de California, desarrolló un procedimiento de diseño de mezcla el cual introdujo el uso de un compactador de amasamiento. Hveem sintió que el uso de dicho compactador era más representativo de las mezclas producidas en campo, las cuales eran compactadas con rodillos de acero y neumáticos, además, Hveem reconoció la necesidad de tener una prueba mecánica para evaluar el desempeño de la mezcla, lo cual condujo al desarrollo del Estabilómetro Hveem, el cual fue usado para evaluar la capacidad de la mezcla (principalmente de la estructura del agregado) a resistir fuerzas cortantes aplicadas por el tráfico.

En la misma década, Bruce Marshall del departamento de carreteras de Mississippi, desarrolló el procedimiento de diseño Marshall, él creyó que la compactación de laboratorio debe producir una densidad que represente la densidad in situ después del tráfico. Su recomendación fue, seleccionar el contenido de asfalto que produjera la más alta densidad, mientras se verificaba la estabilidad y flujo para asegurar de que se cumplan los niveles mínimos aceptables. La segunda guerra mundial resultó en la necesidad de construir autopistas en áreas remotas, esto requería un procedimiento de diseño que necesitara de equipo de laboratorio fácil de transportar, para lo cual los ingenieros de la armada norteamericana adoptaron el método Marshall para diseñar pavimentos.

A partir de 1987 a 1993, la Administración Federal de Carreteras (FHWA) auspició y la Junta de Investigación en Transporte (TRB) administró el Programa Estratégico de Investigación en Carreteras (SHRP) de 150 millones de dólares, el propósito fue desarrollar una tecnología basada en el desempeño y especificaciones que resultarían mejoras significativas en la manera en que las carreteras fueran diseñadas y construidas.

En dicha investigación fueron usados 50 millones, y se obtuvo como resultado el sistema de clasificación por desempeño (PG) para asfaltos y un nuevo sistema de diseño de mezcla denominado Superpave (SUPERior PERforming asphalt PAVEMENTS), con el cual se iniciaron a diseñar y construir carreteras a inicios de la década de 1990.

1.3.2 Cemento Asfáltico

1.3.2.1 Definición

Según la ASTM, el asfalto es un material cementoso de color oscuro a negro, en el cual, los constituyentes predominantes son bitúmenes naturales o que son obtenidos del procesamiento de petróleo. El asfalto está presente, en distintas proporciones, en la mayoría de petróleos crudos.

1.3.2.2 Refinado de petróleo crudo

El petróleo crudo está compuesto de una variedad de sustancias, incluyendo el asfalto. En el proceso de refinado (Figura 11) se separan dichas sustancias y permite recuperar el asfalto, durante este proceso, el crudo es colocado en un intercambiador de calor o calentador de tubos, donde su temperatura se incrementa rápidamente para la destilación inicial, luego ingresa en una torre de destilación atmosférica donde los componentes más ligeros (más volátiles), o fracciones se vaporizan y son retirados para seguir refinándolos y producir nafta, gasolina, querosene y una amplia variedad de productos derivados.

El residuo del proceso de destilación atmosférica es la fracción pesada del crudo que comúnmente se le denomina crudo despuntado, esto puede ser usado como aceite combustible residual, o ser procesado en un sinnúmero de productos, incluyendo el asfalto. La destilación al vacío puede remover suficientes fracciones de alto punto de ebullición para producir asfalto o si el crudo despuntado contiene componentes de muy baja volatilidad que no puedan ser removidos económicamente por destilación, puede que sea necesario una extracción solvente del asfalto para producir cemento asfáltico de determinada consistencia. Las refinerías productoras de asfalto pueden usar prácticamente todos los procesos antes mencionados en combinación para poder producir cementos asfálticos de distintos grados, los cuales pueden seguir siendo modificados para producir grados intermedios.

1.3.2.3 Características del cemento asfáltico

Para propósitos de ingeniería y construcción las características más importantes del asfalto son tres: (i) la consistencia (también llamada comúnmente viscosidad o fluidez), (ii) pureza y (iii) seguridad.

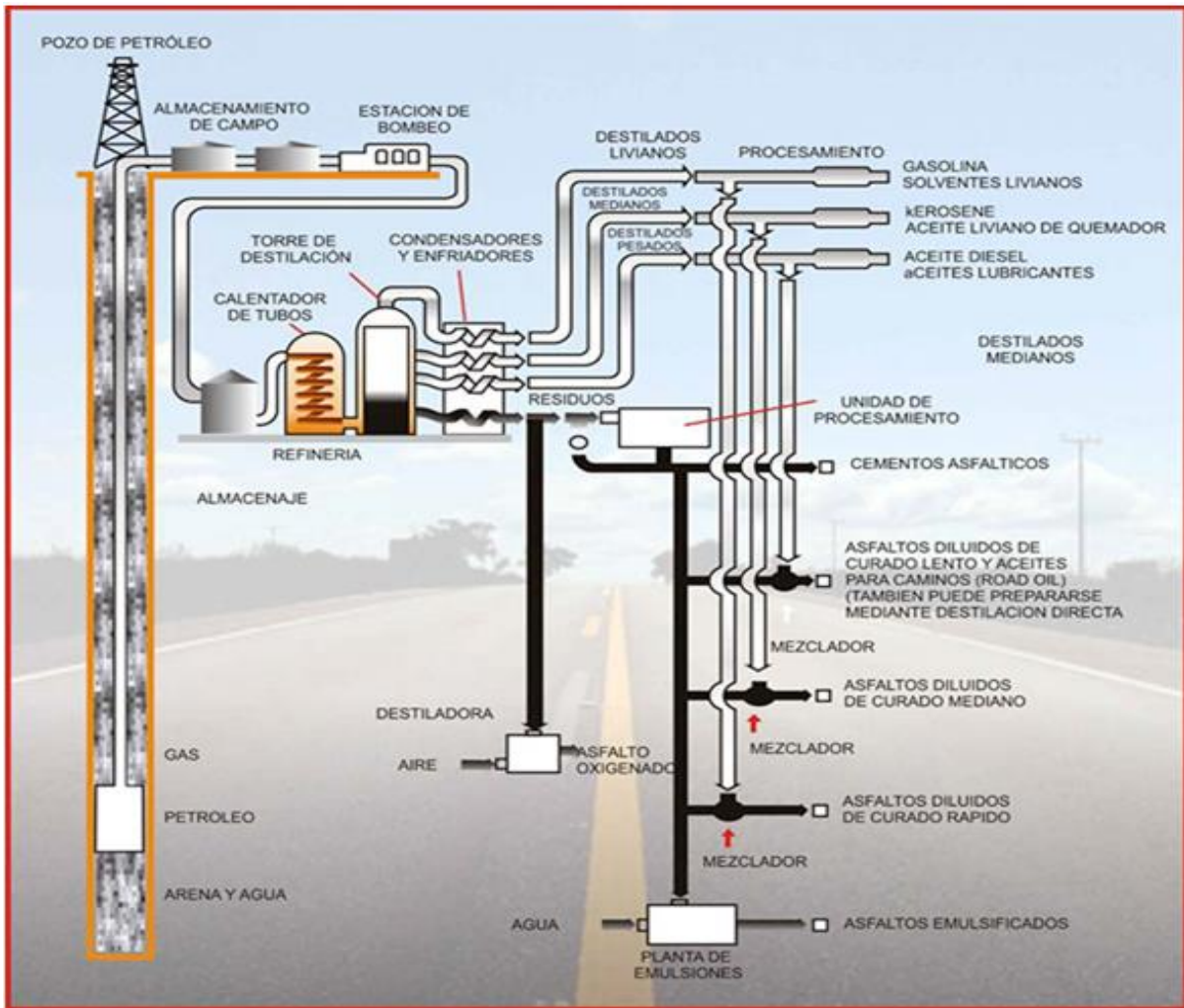


Figura 11. Diagrama de flujo del proceso de refinado de petróleo crudo
 Fuente: Petroperú

Consistencia

Los asfaltos son materiales termoplásticos ya que se licuan gradualmente cuando son calentados. Se caracterizan por su consistencia o capacidad de fluir a distintas temperaturas. El término consistencia se usa para describir la viscosidad o grado de fluidez de un asfalto a una cierta temperatura, la cual varía con esta última, por lo tanto, es necesario usar una temperatura estándar cuando se compara la consistencia de un asfalto con otro. Los cementos asfálticos o simplemente asfaltos se clasifican en base a rangos de consistencia a una temperatura estándar.

Cuando el asfalto es expuesto al aire en finas películas a elevadas temperaturas, por ejemplo, durante el mezclado con agregados, este tiende a endurecer, lo que significa que su consistencia o viscosidad se incrementa, lo cual es permisible hasta cierto límite, sin embargo, la carencia de temperatura y control en el proceso de mezclado puede causar graves daños a un asfalto, por endurecimiento, que, muchos años de servicio en una carretera.

La consistencia del cemento asfáltico normalmente viene especificada y es medida mediante una prueba de viscosidad o penetración (para los asfaltos oxigenados se usa la prueba de punto de ablandamiento).

Pureza

El cemento asfáltico se compone casi en su totalidad de bitumen, el cual por definición es totalmente soluble en disulfuro de carbono. Los asfaltos que pasan el proceso de refinado son casi bitumen puro (si aún quedaran impurezas estas son inertes) y normalmente son solubles, en un 99.5 por ciento, en disulfuro de carbono.

Por lo general, el asfalto está libre de agua o humedad mientras se encuentra en la refinería, sin embargo cuando es transportado es posible que en los tanques de vehículos transportadores haya presencia de humedad, si esto ocurriera, este entraría en contacto con el asfalto, lo cual ocasionaría que este produzca espuma cuando se calienta sobre los 100°C.

Seguridad

El asfalto espumado es peligroso, para ello las especificaciones comúnmente exigen que el asfalto no produzca espuma hasta temperaturas de 175°C.

Cuando el asfalto es calentado a una temperatura relativamente alta, desprenderá humos que destellarán en la presencia de chispas o llama abierta, la temperatura a la cual esto ocurre es denominada punto de inflamación o destello, pero suele estar muy por encima de las temperaturas de trabajo. Sin embargo, para asegurarse de que exista un adecuado margen de seguridad, el punto de inflamación es medido y controlado.

1.3.2.4 Especificaciones y pruebas para cementos asfálticos

Especificaciones para cementos asfálticos

El cemento asfáltico está comercialmente disponible en distintos rangos estandarizados de consistencia (grados), los cuales por muchos años estuvieron basados únicamente en mediciones obtenidas de la prueba de penetración. Los grados estandarizados disponibles son cinco: 40-50, 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300, en donde los valores numéricos indican el rango permisible de penetración para cada grado. El grado de penetración más blando (200-300) es moderadamente firme a temperatura ambiente, a esta temperatura la presión suave de un dedo humano hunde la superficie de la muestra, por otro lado, el grado de penetración más duro (40-50) posee una consistencia que sólo permite que se dibuje una pequeña huella bajo una presión firme cuando el material está a temperatura ambiente.

La clasificación de asfaltos basada en la prueba de penetración es un método empírico, el cual, con el advenimiento de la tecnología moderna, se sabe que es inadecuado. Un método más apropiado y moderno de clasificación es mediante la prueba de viscosidad, la cual se determina a una temperatura de 60° y es medida comúnmente en poises ($P = 1\text{g/cm-s}$) o en el sistema internacional (SI) en pascales por segundo (Pa-s) el cual equivale a 10P. Existen dos series de grados de viscosidad mediante las cuales está disponible el asfalto, una consiste en grados de AC-2.5, AC-5, AC-10, AC-20, AC-40 y a veces AC-30, en donde el valor numérico indica la viscosidad en cientos de poises, a 60°C. La tolerancia permisible para cada grado es de $\pm 20\%$. La otra serie consiste de los siguientes grados: AR-1000, AR-200, AR-4000, AR-8000 y AR-16000, aquí, el valor numérico indica la viscosidad (en poises) medida después de que el asfalto ha sido sometido a la prueba del horno de película delgada rodante, por lo que, la serie AR puede ser interpretada como una serie de “residuo envejecido”; además la tolerancia permisible para cada grado es de $\pm 25\%$.

Tanto la AASHTO como la ASTM han adoptado ciertas especificaciones para obtener grados estandarizados de cementos asfálticos. Además de la prueba de viscosidad a 60° o la prueba de penetración para definir el rango consistencia o grado, se requiere de otras pruebas para determinar las propiedades restantes de dichos productos, las cuales se muestran en la *Tabla 2* **Tabla 1**, junto al método de prueba estandarizado.

Tabla 2

Pruebas requeridas para cementos asfálticos en la construcción de pavimentos.

Prueba	Método de Prueba		
	AASHTO	ASTM	MTC
Viscosidad a 60°C	T 202	D 2171	E 308
Viscosidad a 135°C	T 201	D 2170	E 310
Penetración	T 49	D 5	E 304
Punto de Inflamación	T 48	D 92	E 303
Horno de película delgada	T 179	D 1754	E 315
Horno de película delgada rodante	T 240	D 2872	E 316
Ductilidad	T 5	D 113	E 306
Solubilidad en tricloroetileno	T 44	D 2042	E 302
Prueba de la mancha	T 102	-----	E 314
Contenido de Agua	T 55	D 95	-----
Gravedad Específica y Densidad	-----	D 70	E 318

Fuente: Elaboración propia basada en recomendaciones del Instituto del Asfalto

Pruebas de Viscosidad

Las especificaciones para los cementos asfálticos clasificados por viscosidad son normalmente basadas en rangos a 60°C, pero también se especifica una viscosidad mínima a 135°C, esto con el propósito es prescribir valores límites de consistencia a dichas temperaturas. Se eligió la temperatura de 60°C debido a que esta se aproxima a la temperatura máxima que tienen que soportar las superficies de los pavimentos en servicio tanto en USA como en otras partes del mundo, donde la construcción de carreteras va en progreso. Además, se eligió la temperatura de 135°C ya que esta se aproxima a las temperaturas de mezclado y tendido de la mezcla asfáltica.

La prueba de viscosidad a 60°C se realiza usando un viscosímetro de tubo capilar. Por lo general existen dos tipos, el viscosímetro de vacío Asphalt Institute y viscosímetro de vacío Cannon-Manning, cada uno se calibra mediante el uso de aceites de calibradores estandarizados, para de esta manera obtener un factor de calibración para cada viscosímetro y luego usar dicho factor como se describe más adelante. Normalmente, los viscosímetros son calibrados por el fabricante y sus factores de calibración son suministrados con estos.

El viscosímetro es montado en un baño a temperatura constante, termostáticamente controlada (pudiéndose usar agua como el medio líquido en dicho baño), luego se vierte el asfalto previamente calentado en el viscosímetro hasta que alcance la línea de tope. Una vez llenado se mantiene en el baño por un período de tiempo prescrito para permitir al sistema alcanzar una temperatura de equilibrio la cual es 60°C.

Ya que el cemento asfáltico a 60°C, es demasiado viscoso para fluir con facilidad a través de los viscosímetros de tubo capilar, se le aplica un vacío parcial al lado pequeño de éstos, para que el asfalto comience a fluir.

Después del baño, el viscosímetro y el asfalto se han estabilizado a 60°C, entonces se le aplica el vacío prescrito y mediante un cronómetro, se mide el tiempo (en segundos) requerido para que el asfalto fluya entre dos marcas de tiempo. Multiplicando dicho tiempo por el factor de calibración del viscosímetro, se obtiene el valor de la viscosidad, en poises, la cual es la unidad estándar para medirla.

El viscosímetro de vacío del Instituto del Asfalto tiene varias marcas de tiempo, esta característica permite usarlo para asfaltos de un amplio rango de consistencias con tan sólo seleccionar el par de marcas más apropiadas.

A una temperatura de 135°C, los cementos asfálticos son lo suficientemente fluidos como para fluir a través de los tubos capilares sólo por acción a la fuerza de gravedad, por lo que ya no es necesario someterlos al vacío, pero para ello se utiliza un tipo diferente de viscosímetro. El que se usa con más frecuencia es el viscosímetro de brazo cruzado Zeifuchs, el cual también es calibrado mediante aceites calibradores.

Dado que las pruebas de viscosidad son conducidas a 135°C, se debe usar un aceite adecuado y limpio como medio para el baño, hecho esto, el viscosímetro es montado en dicho baño y luego se vierte el asfalto en la abertura más grande hasta que alcance la línea de tope. Luego se deja que el sistema alcance una temperatura de equilibrio, como se explicó líneas arriba, es en ese instante en que se le aplica una presión leve en la abertura grande o se somete a un leve vacío en la abertura pequeña para dar inicio al flujo del asfalto sobre la sección del sifón, justo arriba de la línea de tope. Entonces el asfalto fluirá hacia abajo de la sección vertical del tubo capilar debido a la fuerza gravitacional, para lo cual será necesario iniciar un cronómetro cuando el asfalto haya alcanzado la primera marca de tiempo y pararlo cuando este alcance la segunda. El intervalo de tiempo transcurrido se multiplica por el factor de calibración del viscosímetro, obteniendo así la viscosidad cinemática en centistokes.

Se debe notar que las mediciones de la viscosidad a 135°C se expresan en centistokes y aquellas a 60°C en poises. En la prueba de viscosidad cinemática, la gravedad induce al flujo y la densidad del material afecta la velocidad de este a través del tubo capilar, en cambio en la prueba de viscosidad el flujo a través del tubo capilar es inducido mediante un vacío parcial donde los efectos gravitacionales son despreciables. Las unidades de las dos pruebas, Stokes o centistokes y poises, están relacionadas entre sí, por la densidad del asfalto.

Las mediciones de la viscosidad realizadas a las dos temperaturas son comúnmente graficadas en la denominada carta de viscosidad y una línea extendida entre dos puntos, donde la pendiente de dicha línea es un indicador de la susceptibilidad a la temperatura, mientras más pendiente más susceptibilidad a la temperatura. Cabe resaltar que la gráfica de esta línea es importante para determinar el rango de temperatura óptima para mezclado y compactación de la mezcla asfáltica en caliente. El Instituto del Asfalto recomienda que, para la preparación de especímenes el mezclado debe hacerse entre los 150 y 190 centistokes y la compactación entre los 250 y 310 centistokes.

Prueba de Penetración

La prueba de penetración es una medida empírica de la consistencia del asfalto, sobre la base de esta prueba, los cementos asfálticos se clasifican en grados estandarizados. Para la prueba, se calienta un contenedor de asfalto a una temperatura estándar de 25°C, en un baño de agua de temperatura controlada, luego se deja caer una aguja estandarizada de 100g sobre la superficie del asfalto por 5 segundos. La distancia, en unidades de 0.1mm, que la aguja penetra en el asfalto, es la medida de penetración.

Prueba de Punto de Inflamación

Cuando se calienta asfalto se liberan gases que son combustibles. El punto de inflamación indica la temperatura a la cual el asfalto se inflamará en presencia de llama abierta. Sin embargo, dicha temperatura se encuentra muy por debajo de la cual el material soportará la combustión. La temperatura a la cual el material soporta la combustión, es denominada *punto de llama*, pero es, por si misma usada en las especificaciones para asfaltos.

El punto de inflamación de un cemento asfáltico normalmente se mide mediante la prueba denominada punto de inflamación y llama con la copa abierta Clevelan. En dicha prueba se llena una copa de lata con un volumen de asfalto especificado y luego se calienta a una velocidad prescrita. Se pasa una pequeña llama sobre la superficie del asfalto a intervalos de tiempo especificados, la temperatura a la cual se liberan suficientes volátiles como para causar una inflamación instantánea es el punto de inflamación.

Prueba del Horno de Película Delgada

En realidad, esta no es una prueba, es un procedimiento y se hace con el fin de someter a la muestra de asfalto a condiciones de endurecimiento las cuales se aproximan a aquellas que se dan en operaciones normales de una planta de asfalto. La pérdida de masa por calentamiento y las pruebas de viscosidad y penetración realizadas sobre la muestra antes y después de la prueba de película delgada, se consideran como una medida de la resistencia del material, a cambiar bajo condiciones a la cuales se produce un endurecimiento.

Prueba de Ductilidad

La ductilidad es considerada, por algunos ingenieros, como una característica importante de los cementos asfálticos, sin embargo, se considera más importante la presencia o ausencia de ductilidad que el grado actual de la misma. Los asfaltos que poseen un alto grado de ductilidad también son más susceptibles a la temperatura, es decir, el cambio en la consistencia con el cambio en la temperatura es bien marcado.

Prueba de Solubilidad

La prueba de solubilidad es una medida de la pureza del cemento asfáltico, la porción del cemento asfáltico que es soluble en disulfuro de carbono representa los constituyentes cementante activos. Sólo la materia inerte como las sales, carbono libre o contaminantes inorgánicos son insolubles.

Debido a la naturaleza peligrosa del disulfuro de carbono, en la prueba de solubilidad se emplea el tricloroetileno, el cual es también un solvente excelente para cementos asfálticos.

1.3.3 Agregados para mezclas asfálticas

1.3.3.1 Introducción

La cantidad de agregado presente en una mezcla asfáltica es, por lo general, un 90 a 95% del peso o 75 a 85% del volumen. El agregado es el principal responsable de la capacidad de carga y desempeño de las mezclas asfálticas.

El agregado se define como cualquier material mineral duro e inerte usado para mezclas, en partículas gradadas o fragmentos, esto incluye a la arena, arenilla, grava, piedra chancada, escoria.

Se han dado también otras definiciones de agregado, que por lo general reflejan el propósito para el cual dicho material va a ser usado, por ejemplo, la designación D8 de la ASTM define al agregado como un material granular de composición mineral tal como la arena, grava, escoria y piedra chancada, usado con o sin un medio cementoso para formar morteros y concreto, o capas base, etc.

1.3.3.2 Fuentes de agregado

Los agregados para pavimentación son clasificados de acuerdo a su fuente o medio de preparación, estos pueden ser agregados naturales, procesados y sintéticos o artificiales.

Agregados Naturales

Las gravas y arenas naturales se encuentran en canteras. La grava usualmente se define como partículas de agregado cuyos tamaños se encuentran en el rango de 75 mm (3 in) a 4.75 mm (N°4) y la arena consiste de partículas en el rango de 4.75 mm (N°4) a 75 μ m (N°200) y las más pequeñas incluyen la fracción de limos.

Las rocas expuestas son erosionadas y degradadas por procesos físicos y químicos que ocurren naturalmente, luego de ello son movidos por el viento, agua o bloques de hielo en movimiento y depositados como suelo mineral en varias formaciones terrestres.

Agregados Procesados

Los agregados procesados son aquellos procedentes de las gravas naturales o rocas pero que han sido previamente chancados o triturados y luego cribados. En ocasiones es más adecuado chancar la grava para su posterior uso en mezclas asfálticas, dado que, por lo general, el chancado, mejora la forma de la partícula, pasando de tener forma redondeada a ser más angular, además de mejorar la distribución y rango de los tamaños de partículas.

En el proceso de chancado, el polvo de roca producido es comúnmente separado del material chancado de diámetros iguales o mayores a 6 mm (1/4 in), dicho material puede ser usado, o como arena chancada o seguir siendo procesado hasta un tamaño máximo de 0.6 mm de diámetro para su uso como filler.

Agregados Artificiales

Los agregados que resultan de la modificación de materiales, los cuales pueden involucrar cambios físicos y químicos, son a veces llamados agregados sintéticos o artificiales. Estos pueden tomar la forma de subproducto o derivado, es decir, desarrollados en las refinerías de minerales o aquellos especialmente producidos o procesados de materia prima para su último como agregado.

Los agregados manufacturados son relativamente nuevos en pavimentos asfálticos, son más ligeros y tiene una resistencia inusual al desgaste. Se usan preferentemente en tableros de puentes, sellado de cubiertas y en capas superficiales de pavimentos asfálticos, donde se requiere de un alto grado de resistencia al deslizamiento.

La escoria de alto horno es el agregado artificial de mayor uso, se deriva de la fundición de hierro en altos hornos, es no metálica y flota sobre el hierro fundido, donde luego es retirada y reducida mediante enfriamiento en agua o chancado después del enfriado al aire.

1.3.4 Escoria de Acero

1.3.4.1 Definición

La escoria de acero es un producto no metálico, compuesto esencialmente de silicatos y aluminosilicatos de cal y otras bases, que se genera simultáneamente con hierro o acero en un alto horno.

1.3.4.2 Producción de metal y escoria ferrosa

Los metales ferrosos, en general, se refieren a materiales de hierro y acero. El acero es el principal metal ferroso, hecho de una aleación de hierro y carbono, es ampliamente usado en la construcción y otras aplicaciones.

La producción moderna de acero es un proceso integrado consistente altos hornos (BF) productores de hierro y hornos de oxígeno básico (BOF) o hornos de arco eléctrico (EAF) productores de acero. Durante la fabricación de hierro, al fundir mineral, chatarra de hierro, coque y fundente, se forma escoria de alto horno y se descarga posteriormente. La escoria de acero se forma y descarga al fundir hierro, chatarra de acero y fundente durante el proceso de fabricación de acero. Después de que la escoria fundida se descarga, se enfría con aire o se trata bajo diferentes regímenes de enfriamiento y se procesa, se pueden producir productos de escoria para diversas aplicaciones. La *Figura 12* es un diagrama de flujo del proceso de fabricación de hierro y acero además de los tipos de escoria generados en cada etapa.

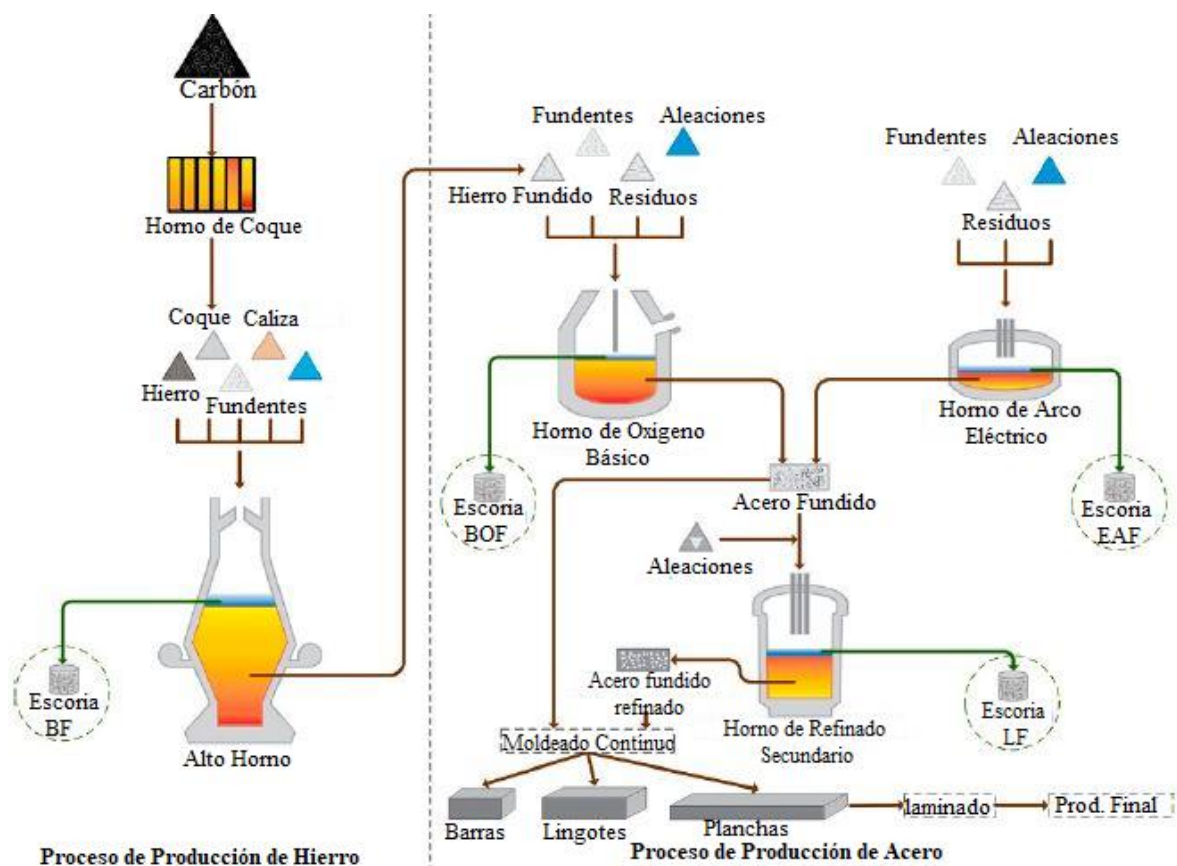


Figura 12. Diagrama de flujo de los procesos de producción de hierro y acero.
Fuente: Adaptado de Yildirim y Prezzi (2011)

Como se puede observar, el proceso EAF usa principalmente una combinación de residuos de acero reciclado y electricidad. En promedio, este proceso usa aproximadamente 800 kg de acero reciclado, 16 kg de carbón y 64 kg de fundente para producir 1000 kg de acero crudo (World Steel Association, 2014)

Las escorias procesadas de BF, BOF y EAF, están siendo consideradas materiales de construcción no tradicionales por su potencial uso en aplicaciones ingenieriles.

1.3.4.3 Proceso de producción de acero y formación de la escoria

Como se muestra en la *Figura 12*, el hierro crudo es refinado en un BOF o un EAF para convertirse en acero en crudo, este también puede pasar por un proceso secundario de refinado en un horno de cucharón.

En el Perú, el proceso de producción de acero mediante horno de arco eléctrico es la tecnología de producción dominante, ya que el 100 por ciento de acero crudo se produce bajo dicho proceso (WSA, 2017), esto se debe principalmente a la disponibilidad de residuos de acero reciclado, menor consumo de energía y el grado de acero producido.

1.3.4.3.1 Producción de acero en EAF y formación de la escoria.

Una característica importante del proceso de producción en EAF es que las materias primas son residuos de acero reciclado y fundentes obviándose el paso de extracción de mineral de hierro.

Para iniciar el proceso los residuos de acero son separados, clasificados y ordenados en diferentes clases de acero en campos de reciclado. El operador del depósito de chatarra preparará cubos de chatarra de acuerdo con las necesidades de la fundición. La chatarra se coloca en capas en el balde de acuerdo con el tamaño y la densidad para promover la rápida formación de acero fundido en el horno y minimizar los derrumbes de la chatarra, que pueden romper los electrodos. La carga puede incluir cal y carbono (Yildirim y Prezzi, 2011).

Los EAF están equipados con electrodos de grafito y se asemejan a las teteras gigantes con un pico o una muesca excéntrica en un lado. Una corriente eléctrica pasa a través de tres electrodos de grafito y forma un arco. El calor generado por este arco funde la chatarra. El techo de un EAF puede pivotar y girar para facilitar la carga de materias primas. La capacidad de los EAF se ha desarrollado de aproximadamente 135 a 270 t de acero por ciclo.

La operación EAF comienza con la carga de varios tipos de chatarra de acero al horno. El techo y los electrodos se levantan y se giran hacia un lado del horno para permitir que la grúa de carga de chatarra mueva una cubeta llena de chatarra hasta posicionarla sobre el horno. De dos a tres cubetas de chatarra por calentada son normales. Algunas operaciones logran cargar sólo una cubeta. La chatarra cae en el horno y la grúa de chatarra retira la cubeta de chatarra. El techo y los electrodos se vuelven a colocar sobre el horno. Se baja el techo y luego se bajan los electrodos para formar un arco sobre la chatarra, lo que hace que la electricidad viaje a través de los electrodos y el metal en sí. El arco eléctrico y la resistencia del metal a ese flujo de electricidad genera el calor y así comienza la parte de fundición.

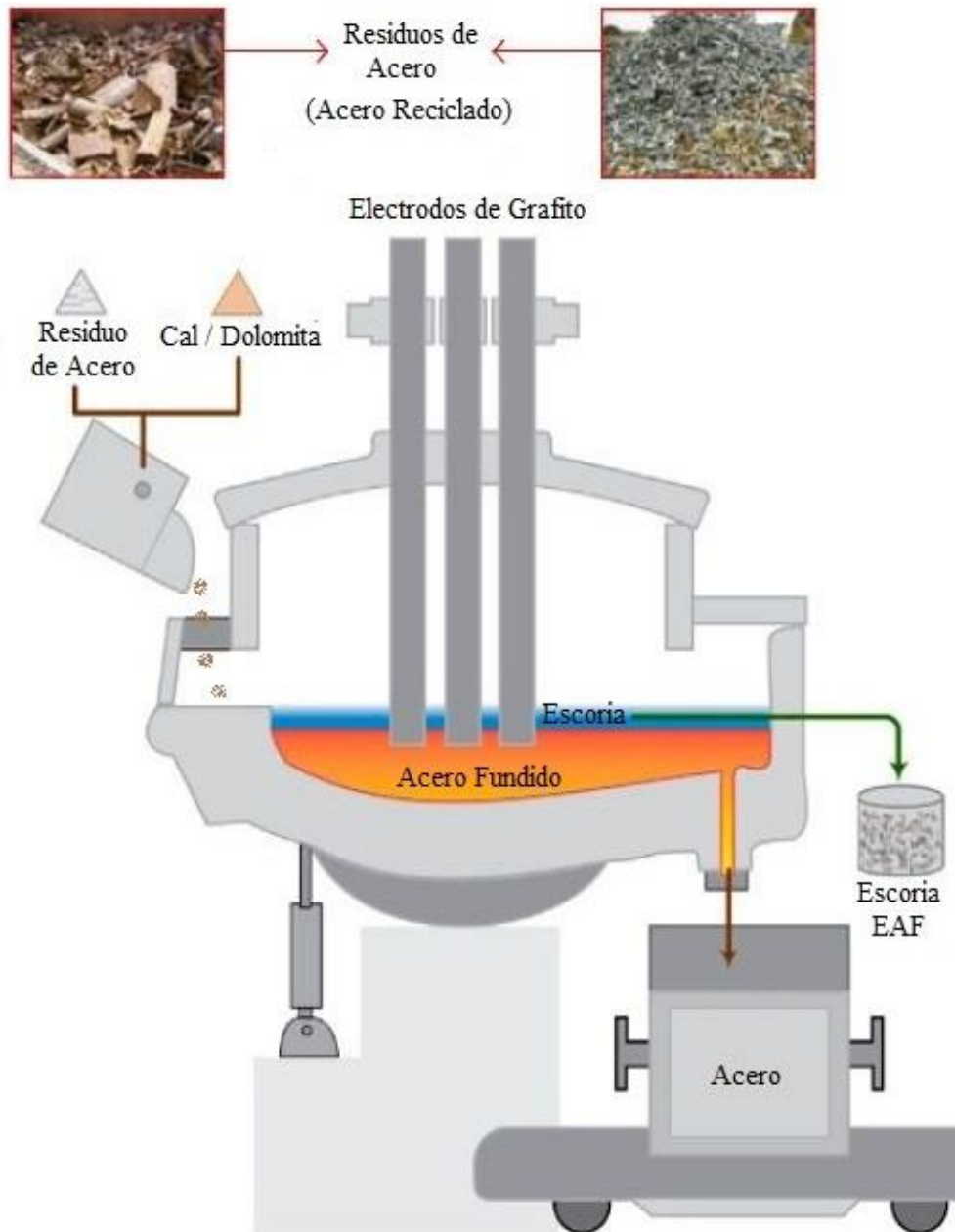


Figura 13. Representación Esquemática de un Horno de Arco Eléctrico (EAF)

Fuente: Adaptado de Yildirim y Prezzi (2011)

A medida que la chatarra se derrite, los electrodos son empujados a mayor profundidad a través de las capas de chatarra. También se puede inyectar oxígeno a través de una lanza para cortar la chatarra en tamaños más pequeños. Por lo general, la chatarra liviana se coloca encima de la carga para acelerar la perforación. Aproximadamente el 15% de la chatarra se derrite durante el período inicial de perforación. Después de unos minutos, los electrodos penetran lo suficiente en la chatarra de manera que se puede utilizar una toma de arco largo (alto voltaje). El arco largo maximiza la transferencia de energía a la chatarra y al conjunto líquido en el corazón del horno. Una vez que se forma la piscina de fundición, el arco se vuelve bastante estable y la entrada de potencia promedio aumenta.

El óxido de calcio, en forma de cal quemada o dolomita, se introduce en el horno junto con la chatarra o se inserta en el horno durante la fundición. Después de que se hayan derretido varias cestas de desechos, se realizan las operaciones metalúrgicas de refinación (p. Ej., Descarburación y desfosforación). Durante el período de refinación del acero, el oxígeno se inyecta en el acero fundido a través de una lanza de oxígeno. Algo de hierro, junto con otras impurezas en el metal caliente, como el aluminio, el silicio, el manganeso, el fósforo y el carbono, se oxidan durante las inyecciones de oxígeno. Estos componentes oxidados se combinan con la cal (CaO) para formar escoria. A medida que el acero se refina, el polvo de carbono también se inyecta a través de la escoria fundida que flota en la superficie del acero fundido, lo que conlleva a la formación de monóxido de carbono. Una vez que se logra la composición química deseada del acero, el EAF se inclina, y la escoria fundida se vierte y se lleva a una unidad de procesamiento de escoria con cucharas o portadores de escoria y el acero se saca del horno en un cucharón separado (Seetharaman, 2005). Las operaciones modernas apuntan a un tiempo de toque a toque de menos de 60 min. La *Figura 13* muestra el esquema de un EAF.

Tradicionalmente, la escoria de EAF se puede clasificar en escoria oxidante y escoria reductora. La escoria oxidante se genera durante la etapa de refinamiento por oxidación, y la escoria reductora se genera durante el refinamiento de reducción. Se generan aproximadamente 70 kg de escoria EAF oxidante y 40 kg de escoria reductora por cada tonelada de acero de horno eléctrico (Nippon Slag Association [NSA], 2018)

1.3.4.4 Propiedades básicas de la escoria de acero

Las propiedades físicas y químicas de una escoria en particular, antes de ser procesada y enviada a tratamientos especiales, básicamente depende del tipo de proceso y grados de acero producidos. Sin embargo, la mayoría de las propiedades tanto de escoria de BOF y EAF son similares.

1.3.4.4.1 Propiedades químicas

Durante el proceso de producción de acero, la temperatura a la que se forma la escoria está alrededor de los 1700°C, a esa temperatura, ocurren muchas reacciones químicas. La escoria de acero líquida contiene cantidades apreciables de CaO, SiO₂, FeO, Fe₂O₃, MnO, MgO y cantidades menores de P₂O₅, Al₂O₃, K₂O y Cr₂O₃, por lo que obviamente muchas combinaciones posibles de óxidos están disponibles.

Composición Química

Análisis químicos realizados por Siderperú, muestran que la escoria que producen mediante el proceso de EAF, presenta la composición química mostrada en la *Tabla 3* o *Figura 14*.

Tabla 3

Composición química de la escoria de acero.

Tipo	Óxidos							Metales				
Grava	Al ₂ O ₃	CaO	FeO	MnO	MgO	SiO ₂	As	Cd	Cr	Hg	Pb	Zn
	6.52	21.58	30.4	6.14	10.62	15.81	0.00089	0.00005	0.11	0.00027	0.009	0.03

Fuente: Siderperú

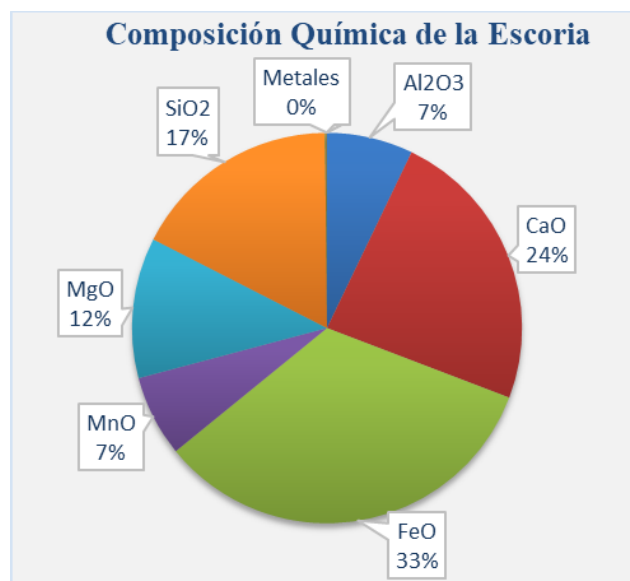


Figura 14. Composición química de la escoria de acero.

Fuente: Elaboración propia basada en resultados de Siderperú.

Cal Libre

Se sabe que una cierta cantidad de cal no combinada (sin quemar o cal libre) es expresada como CaO libre o f-CaO, la cual puede reaccionar con la humedad produciendo Ca (OH)₂. Teniendo en cuenta que presentan una gravedad específica de 3.34 y 2.23 respectivamente, el resultado de dicha reacción sería el incremento de volumen de aproximadamente 90%, esta es la principal razón por la que algunos tipos de escorias de acero son susceptibles a expansión volumétrica.

Tradicionalmente se considera que es la cantidad de f-CaO, en lugar de su forma existente, lo que contribuye a la expansión del volumen. Sin embargo, la investigación ha encontrado que la forma existente de f-CaO juega un papel importante en ello (Geiseler, 1996): (i) f-CaO en solución sólida puede causar expansión de volumen; (ii) las partículas más finas de f-CaO no son, probablemente, la causa de la expansión volumétrica.

Análisis han demostrado que existen dos tipos de cal libre en la escoria de acero: la pura y la solución sólida. La primera es CaO libre y el última es CaO + x% FeO ($0\% < x < 10\%$ en peso). Estas se pueden distinguir en patrones de difracción de rayos X (XRD), f-CaO con $d = 2.41 \text{ \AA}$ y f-CaO en estado de solución sólida con $d = 2.38 \text{ \AA}$. El exceso de f-CaO, especialmente en presencia de una solución sólida con pequeñas cantidades de FeO, es la causa principal de la inestabilidad volumétrica (Wang, 1992)

Por último, cabe resaltar que, para ciertas aplicaciones se ha demostrado que no son necesarias restricciones en cuanto a la estabilidad volumétrica, por ejemplo, para caminos no pavimentados y áreas de estacionamiento. En contraste, donde la escoria es usada en capas confinadas o no de carreteras, la estabilidad volumétrica debe estar entre límites estrictos. Para escorias frescas que no han sido expuestas al clima, el contenido de cal libre es un criterio de clasificación. Las escorias con un contenido de cal libre pueden usarse hasta un 7% para las capas no confinadas y hasta un 4% para las capas bituminosas de pavimentos (Geiseler, 1996).

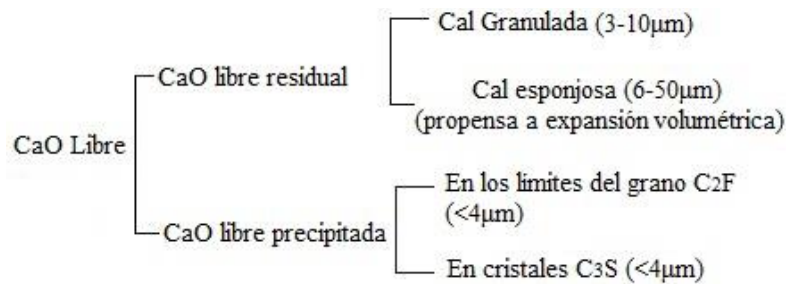


Figura 15. Formas en las que existe la cal libre.

Fuente: Adaptado de Geiseler (1996)

El óxido de magnesio MgO y su Forma Cristalina

Los resultados de la investigación muestran que el óxido de magnesio combinado no es, de hecho, la causa de la insensibilidad de la escoria de acero. Sólo la forma libre de MgO (periclasa) es propensa a la expansión. La periclasa solo puede formarse en caso de menor basicidad, mientras que, en la condición de mayor basicidad, la cual existe en la escoria de acero, el MgO generalmente forma una solución sólida principalmente con FeO y MnO (es decir, fase RO).

Las investigaciones sobre el contenido de magnesio libre de escorias de acero han demostrado que la buena disolución de la dolomita agregada en el horno es lo más importante. Para este propósito, la dolomita debe agregarse en una etapa temprana del proceso de fabricación de acero y el tamaño del grano debe ser lo más pequeño posible para permitir que la dolomita se disuelva y reaccione completamente.

1.3.4.4.2 Propiedades físicas

La escoria de acero sólida exhibe forma de bloque y forma de panal. La escoria de acero formadora posee brillo; esta última es no brillante y más quebradiza. La gravedad específica de la escoria de acero depende de la viscosidad, la tensión superficial de la escoria de acero líquida y la cantidad de dióxido contenido, los materiales ferrosos y la porosidad. La dureza y la gravedad específica son mayores que las de la escoria BF. Al igual que la escoria BF enfriada por aire, la escoria de acero exhibe excelentes propiedades de resistencia al deslizamiento. Algunas propiedades físicas fundamentales de la escoria de acero se muestran en la *Tabla 4*.

Tabla 4

Propiedades físicas fundamentales de la escoria de acero

Gravedad Específica	Aplast. (%)	Absorción. (%)	Abrasión (%)	Pulimiento (%)	Documento de Referencia
2.38-2.76	25-39	21-42	5-31	50-63	
3.20-3.80		0.2-1.0	8-15	58-63	(Geiseler, 1996)
3.1-4.5	---	1-4	17-25	50-60	(CEDEX, 2013)
3.30	12.10	1.29	13.20	58.00	(Wu et al.)
3.30	12.10	1.29	13.20	12.10	(Ziari y Khabiri, 2007)
3.10	---	2.30	16.40	---	(Asi et al., 2007)
3.16	---	2.97	24.10	---	(Pérez, 2008)
3.12	---	---	20.00	---	(Kök y Kuloğlu, 2008)
3.02	---	---	20.00	---	(Ahmedzade y Sengoz, 2009)
3.41	---	2.20	13.00	54.50	(Sofilié et al., 2011)
---	23.00	5.46	24.00	54.00	(Hainin et al., 2012)
3.44	---	1.70	20.70	---	(Behnood y Ameri, 2012)
---	17.50	---	18.50	67.00	(W. Li et al., 2012)
3.45	---	2.10	---	---	(Krayushkina, Prentkovskis, Bieliatynskyi, y Junevičius, 2012)
3.40	---	---	13.60	48.20	(C. H. Li et al., 2014)
2.64	---	1.70	21.68	---	(Ziari et al., 2015)
3.34	---	---	21.00	---	(Khodary, 2015)
2.81	---	3.90	5.10	55.30	(Oluwasola, Hainin, y Aziz, 2016)
3.25	---	2.50	20.00	---	(Wen et al., 2016)
2.26	---	2.65	49.20	---	(Patiño S., 2017)
3.10	---	3.20	10.00	---	(Zumrawi y Khalil, 2017)
2.58	---	---	34.30	---	(López, 2017)
3.01	---	9.21	22.00	---	(Santos, s.f.)

Fuente: Elaboración propia basada en resultados obtenidos de los documentos de referencia

1.3.4.5 Uso práctico de la escoria en pavimentos asfálticos

La escoria puede ser procesada como agregado fino o grueso, para su uso en mezclas asfálticas en frío o en caliente y de gradación densa o abierta y en cualquier capa de la estructura del pavimento.

En este sentido la escoria de acero ha sido la pionera en cuanto a su uso en lo que respecta a pavimentación asfáltica. Para su aplicación es muy importante un procesamiento adecuado y procedimientos de control de calidad especiales, de particular importancia su potencial expansión volumétrica que podría resultar en un agrietamiento de la capa de rodadura, si es ignorada.

1.3.4.5.1 Uso de la escoria de acero en MACs

Historia del uso de la escoria en pavimentación asfáltica

La tecnología del uso de escoria en pavimentos asfálticos ha experimentado sus primeras etapas de desarrollo. En la década de 1960, la compañía británica Steelphalt produjo MAC y mezclas de astillado recubierto utilizando escoria de acero del horno de arco eléctrico (EAF) de las plantas de British Steel Corporation en Rotherham y Scunthorpe. La escoria de EAF se almacenó durante 1 año en grandes pilas antes del procesamiento para la recuperación, dimensionamiento e incorporación de acero en mezclas de asfalto en dos plantas de MAC completamente automatizadas. Las mezclas de concreto asfáltico se produjeron de la manera habitual y cumplieron con las especificaciones apropiadas. Las astillas se recubrieron con cemento asfáltico en una planta de producción de mezclas y se rociaron con agua de refrigeración cuando se descargó de la máquina. Una aplicación importante fue en la carretera M62 donde se utilizaron astillas recubiertas de 19 mm en 1969 con excelentes resultados.

En la década de 1960, la Compañía Levy en los Estados Unidos produjo una mezcla de concreto asfáltico de escoria de horno abierto de 9.5 mm para pavimentación en áreas de estacionamiento e industriales. Desde entonces, las mezclas de concreto asfáltico de escoria de acero han logrado una amplia aceptación en esta región. Se adoptó un procedimiento para regar la escoria de acero y almacenarla durante al menos 1 mes antes de su uso para eliminar pequeñas superficies emergentes.

En 1969, la escoria de acero se usó en mezclas de concreto asfáltico en el área de Hamilton-Toronto en Ontario, Canadá. Las especificaciones de la ciudad de Hamilton incluían mezcla de asfalto de escoria de acero de 9.5 mm. La escoria de acero se usó en mezclas calientes para los parches de invierno, lo que demostró que la escoria de acero era generalmente bastante seca por lo que se redujeron los costos de calefacción; el hormigón asfáltico de escoria de acero retuvo muy bien el calor, de modo que un equipo de parcheo podía manejar grandes bachadas y el alto peso unitario y estabilidad del concreto asfáltico de escoria de acero ayudó al parcheo.

DESARROLLO RECIENTE

Junto con el desarrollo de la fabricación de acero, el procesamiento de escoria y la tecnología de tratamiento, se ha producido más escoria de EAF y se ha utilizado en diversas aplicaciones de pavimentación que se centran principalmente en la investigación de escoria (Hainin et al., 2014).

En las últimas dos décadas, se han utilizado otros tipos de escoria en la pavimentación de asfalto; p. ej., escoria de ferromanganeso (Wang, Thompson, y Wang, 2011), escoria de cobre (Hassan y Al-Jabri, 2011), y escoria de caldera (Federal Highway Administration, 2016).

Estabilidad Marshall

Las MAC con escoria de acero ofrece una gran estabilidad, lo cual es una clara ventaja para aplicaciones donde se requiere resistencia ahuellamiento, como para carreteras dentro de acerías, áreas de estacionamiento industriales sometidas a cargas de ejes pesados, autopistas, carreteras urbanas principales, paraderos de autobuses e intersecciones. La capa de MAC de escoria de acero más delgada puede proporcionar un rendimiento satisfactorio que a veces las mezclas ordinarias no pueden desarrollar bajo tráfico intenso.

Prevención de la Deformación Permanente

El agregado de escoria de acero procesado posee forma angular y la superficie de textura rugosa, lo que le da a la escoria de acero la capacidad de sustituir agregados en mezclas asfálticas, donde se requiere estabilidad (resistencia al ahuellamiento) y resistencia al deslizamiento. La durabilidad de la MAC (resistencia a la humedad, fatiga) también se puede mejorar cuando se usan agregados de escoria (Pasetto y Baldo, 2012).

Resistencia al Deslizamiento

La experiencia con mezclas de escoria de acero en muchos países ha indicado que la resistencia al deslizamiento es muy satisfactoria para la mayoría de las aplicaciones (Kehagia, 2009; Kök y Kuloğlu, 2008). Los PSV para agregados naturales típicos respaldan los hallazgos de que la escoria de acero y la escoria de alto horno son superiores a muchos agregados naturales. La tasa de accidentes en carreteras mojadas no excedió significativamente la tasa de accidentes en carreteras secas para la superficie de MAC de escoria de acero, mientras que lo contrario fue generalmente cierto para otros materiales de superficie.

Cal Libre y Desprendimiento (stripping)

La cal libre asociada con la escoria de acero da como resultado una excelente resistencia a la separación del cemento asfáltico del agregado para una amplia gama de fuentes y penetraciones de cemento asfáltico. Esta resistencia al decapado es importante porque garantiza que el agua no penetre en la escoria de acero en mezclas de asfalto e inicie problemas potenciales de expansión de óxido de magnesio y cal libre.

Óptima Sustitución con Escoria

La proporción de escoria de reemplazo de agregados naturales es un factor importante que afecta el uso satisfactorio. La proporción o contenido óptimo debe decidirse según las pruebas de laboratorio sobre una mezcla proporcionada seleccionada para una escoria específica. En general, la escoria de acero utilizada en las mezclas de pavimentación debe limitarse a la sustitución de la fracción agregada fina o gruesa, pero no de ambas, ya que el HMA que contiene 100% de escoria de acero es susceptible a un alto porcentaje de vacíos, un excesivo contenido de asfalto durante la producción y el posterior esprimimiento debido a compactación del tráfico de servicio (Asi et al., 2007; Federal Highway Administration, 2016). Sin embargo, diferentes resultados de investigación del uso específico de escoria sugieren una proporción de reemplazo diferente. Por ejemplo, se informa que (i) el 100% de escoria de BOF es el porcentaje de sustitución óptimo basado en el análisis estadístico de rango múltiple de Duncan que procesa la mayor resistencia al deslizamiento, mejor resistencia al decapado (stripping) y mejor resistencia a la deformación permanente (ahuellamiento) (Shen, Wu, y Du, 2009); (ii) 80% de escoria de EAF es la mejor proporción (Oluwasola et al., 2016); (iii) el 30% de reemplazo de escoria de EAF presenta el mejor número de resistencia al deslizamiento (Asi, 2007); (iv) la sustitución de hasta el 75% del agregado grueso de piedra caliza por agregado de escoria de acero mejora las propiedades mecánicas de las MACs, sin embargo, la sustitución del 25% fue el nivel de reemplazo óptimo (Asi et al., 2007); (v) Kavussi y Qazizadeh (2014) reportaron que el aumento en el contenido de escoria en las mezclas de asfalto resultó en un aumento de la estabilidad Marshall y el cociente de Marshall, y la resistencia a la fatiga de las mezclas que contienen escoria de EAF es mayor que las mezclas de control; y (vi) El Departamento de Transporte de Oregon utilizó un 30% de escoria de acero para reemplazar el agregado convencional en MACs (Hunt y Boyle, 2000). En resumen, es de vital importancia determinar la proporción de reemplazo o sustitución óptima en función de las pruebas de laboratorio en una escoria específica y su uso.

Compactabilidad

La MAC con escoria de acero, que presenta alta estabilidad, tiene una compactabilidad razonable. La relación de estabilidad Marshall a flujo está relacionada con la compactabilidad. La compactabilidad razonable se asocia con un valor de relación bajo. Los flujos altos de MAC de escoria de acero generalmente resultan en una relación razonable de estabilidad a flujo. Además, su retención de calor y el consiguiente tiempo de compactación son excelentes, ya que la velocidad de enfriamiento es de aproximadamente dos tercios de la de las mezclas asfálticas con agregados convencionales en el rango clave de temperatura de colocación y de compactación de 135°C bajando a 90°C. Esta combinación de relación favorable de estabilidad a flujo y retención de calor, junto con la estabilidad inherente que permite que el rodillo vibratorio se mantenga cerca de la pavimentadora, generalmente garantiza la compactación adecuada del concreto asfáltico de escoria de acero, según fue confirmada por experiencia de campo.

Análisis del Coste del Ciclo de Vida

Mroueh, Eskola, y Laine-Ylijoki (2001) realizaron un análisis del costo del ciclo de vida de la construcción de carreteras centrándose en las cargas ambientales de la construcción. El estudio indicó que el uso de escoria de alto horno puede disminuir las cargas ambientales en comparación con los materiales convencionales de referencia utilizados.

1.3.4.5.2 Propiedades de MACs conteniendo escoria

Marshall y Propiedades Físicas

Las prácticas en los años 1970 a 1980 mostraron que la MAC de escoria BOF puede diseñarse de la misma manera que las MAC ordinarias o convencionales, mediante el método Marshall, y presentar valores de estabilidad muy altos (1.5 - 3 veces más que la mayoría de las otras MAC). La resistencia a la separación del cemento asfáltico de la escoria de acero es un 15–25% mayor que otras MACs. Las características Marshall típicas promedio para MACs que contienen una mezcla de escorias de horno de hogar abierto (OHF) y BOF con la gradación promedio dada se resumen en desde la *Tabla 5* hasta la *Tabla 7*.

Tabla 5

Resultados de la prueba de desprendimiento agregado-bitumen, Inmersión-Marshall.

Escoria de acero	Estabilidad retenida	Número de desprendimiento	
		No decapado	Decapado
OHF	73.4	3	4
BOF	82.5	3	4

Fuente: Tomado de Wang (1992)

Tabla 6*Gradación típicas para escorias de OHF y BOF usadas en MACs*

Tamiz ASTM (mm)	Porcentaje que pasa	
	MACs de escoria de:	
	OHF	BOF
19	100	100
12.5	99.9	99.9
9.5	94.4	96
4.75	62.2	67.1
2.36	33.2	36.9
1.18	16.5	20.7
0.6	9	12.7
0.3	5.8	8.5
0.15	3.4	4.7
0.075	1.1	1.4

*Fuente: Tomado de Wang (1992)***Tabla 7***Propiedades de valores Marshall en MACs de escoria de acero*

Parámetro	Escoria de OHF	Escoria de BOF
Estabilidad (kN)	15.4	16.0 – 22.0
Índice de Flujo (mm)	4.3	4.0 – 5.5
Vacíos en el Ag. (%)	20.5	17.0 – 20.4
Vacíos de aire (%)	3.3	3.0 – 4.0
Contenido de asfalto (%)	6.2	5.5 – 6.2
Densidad	2.782	2.85 – 2.9

Fuente: Tomado de Wang (1992)

Numerosos informes técnicos han indicado que las MACs de escoria de acero proporciona una alta resistencia al ahuellamiento, resistencia al deslizamiento y otras propiedades físicas (Bagampadde et al., 1999; Shatnawi, Abdel-Jaber, Abdel-Jaber y Ramadan, 2008; Sofilic et al., 2010; Zohrabi y Karami, 2010). La estabilidad Marshall de MACs con escoria de acero generalmente puede alcanzar hasta 16 kN y un flujo Marshall promedio de 2.8 mm (Sorlini, Sanzeni y Rondi, 2012).

Resistencia a la Tracción Indirecta (RTI)

La resistencia a la tracción indirecta de MACs con escoria de acero mostraron características más superiores que las MAC convencionales.

Las mezclas que contenían 100% de escoria de acero habían mostrado una mejor resistencia al ahuellamiento y al agrietamiento por bajas temperaturas (Ali et al., 1992). Kök y Kuloğlu (2008) obtuvieron el módulo de tracción indirecta más alto para MACs con escoria de acero. Xue et al. (2006) informaron que las mezclas de SMA con escoria de acero tienen una alta resistencia a la flexión en comparación con mezclas SMA con agregado de basalto, obteniéndose 1.64 MPa y 1.52 MPa respectivamente. La investigación realizada por Pasetto y Baldo (2013) mostró que las MACs con escoria de acero (70%) dio un rendimiento mecánico positivo para RTI a 25°C en muestras secas y húmedas de hasta 1.27 MPa y 1.07 MPa, respectivamente.

Módulo Resiliente (MR)

Los valores del módulo de resiliencia de MACs con escoria de acero, tienden a ser entre 20% y 80% más altos que los de MACs con agregados convencionales a la temperatura de diseño típica (29°C). El análisis elástico mostró que, para los mismos niveles críticos de deformación, un pavimento de MAC con escoria de acero más delgado puede alcanzar el mismo nivel que una MAC con agregado convencional. Obviamente que, si se puede usar pavimento de MAC con escoria de acero más delgado, esto ayudaría a compensar cualquier desventaja de alta densidad aparente debido al costos de cemento de asfáltico y transporte. Amuchi, Abtahi, Koosha, Hejazi y Sheikhzeinoddin (2013) informaron que la adición de fibra de polipropileno (PP) al concreto asfáltico con escoria de acero puede aumentar la RTI y MR de MACs con escoria de acero. Amuchi, Abtahi, Koosha, Hejazi y Sheikhzeinoddin (2013) también informaron que MACs con escoria de acero mostraron un aumento de RTI y MR.

Durabilidad

MACs con escoria de acero utilizada en SMA de gradación densa, y gradada con finos, 9.5–12.5, 19–37.5 mm de espesor, vacíos de aire 4%, asfalto entre 4.5–6, dependiendo del contenido de escoria, la durabilidad es muy buena y la fricción es superior. Las MACs con escoria de alto horno requieren más asfalto debido a la alta absorción de la superficie, y la durabilidad y la fricción son muy buenas (Al-Qadi, Son y Carpenter, 2013). La estabilidad Marshall inmersa y los resultados de las pruebas de congelación y descongelación muestran que las MACs con escoria de acero tienen un buen rendimiento de estabilidad frente al agua, y la estabilidad dinámica de las MACs con escoria de acero es mayor que 1000 veces / mm y con un excelente rendimiento a altas temperaturas (Zhang, 2012).

Comportamiento en Fatiga

La prueba de fatiga de una viga en flexión en cuatro puntos se realizó en modo de esfuerzos controlados a varios niveles de esfuerzo para caracterizar el comportamiento a la fatiga de MACs que contenían escoria de EAF. Los resultados mostraron que la inclusión de EAF en mezclas mejoró considerablemente la resistencia a la fatiga de las muestras. Esto puede explicarse por la mayor adhesión entre el cemento asfáltico y el agregado de escoria (Kavussi y Qazizadeh, 2014; Puy, Jove, Scheibmeir, Abad y Martínez, 2008).

Estabilidad Volumétrica y Problemas de Expansión

El almacenamiento y el envejecimiento son las técnicas de tratamiento básicas para el uso de escorias de acero en pavimentos asfálticos. Rohde, Nez y Ceratti (2003) informaron que las escorias de acero deben almacenarse al aire libre durante al menos 4 meses antes de que puedan usarse en la construcción de pavimentos. Sin embargo, los tiempos de almacenamiento varían dependiendo de cada escoria y experiencia específicas. Los usuarios deben determinar el tiempo suficiente para el envejecimiento basándose en pruebas y exámenes exhaustivos.

MAC con escoria de acero se ha utilizado en Ontario, Canadá, en las principales autopistas desde finales de los años setenta. En 1992, su uso se suspendió debido a un deterioro prematuro del pavimento (Afrani, Bradbury y Hajek, 1995; Hajek y Bradbury, 1995). Se realizó una investigación para investigar las causas (Farrand y Emery, 1995) y concluyó que la escoria de acero de calidad y consistencia adecuada puede usarse para producir un buen agregado para su uso en MACs. La expansión de volumen del agregado de escoria de acero es un problema que debe controlarse antes de que este sea usado en MAC; Las prácticas de flujo de producción acero y escoria deben ser compatibles para la fabricación de agregados de escoria de bajo volumen de expansión; se deben utilizar pruebas basadas en el rendimiento para medir la expansión del volumen del agregado de escoria de acero; y la gestión total de la calidad es necesaria para cubrir todos los aspectos de la producción de agregados de escoria de acero para garantizar que se entrega al usuario final un agregado de calidad adecuada. El SHRP canadiense (C-SHRP) desarrolló un enfoque de análisis estadístico bayesiano como consecuencia del deterioro prematuro del pavimento de MAC con escoria, que proporciona una revisión independiente y el respaldo de los modelos de predicción por parte de expertos, y facilita la cuantificación de la influencia y contribución de los datos de campo y peritaje de expertos en el proceso de modelización.

1.3.4.6 Casos de estudio del uso escoria en MACs

La escoria de acero se ha usado como componente de las MACs en distintos países del mundo, pero en las siguientes líneas se presenta uno de los casos donde se usó a mayor escala.

1.3.4.6.1 Uso de escoria en la construcción de la autopista Egnatia

El caso de estudio más importante trata sobre el uso de escoria de EAF en Egnatia Odos, el proyecto de 670 km cerca de Tesalónica, Grecia. La autopista Egnatia es el mayor proyecto de construcción de carreteras en Grecia. El proyecto de 5900 millones de euros que se extiende de oeste a este en Grecia continental se completó en 2009. La seguridad, que tiene una gran importancia, combinada con soluciones rentables, dio como resultado la adaptación de una nueva especificación para la superficie antideslizante de la capa de rodadura. La nueva especificación, estrechamente relacionada con normas españolas, implica una mezcla de arena fina y agregados gruesos del mismo origen, de 25 mm y bien gradada, que utiliza un ligante asfáltico modificado.

Este caso es el resultado de una estrecha cooperación entre la compañía administradora de la autopista, Egnatia Odos SA, y el único productor de agregados de EAF en Grecia, AEIFOROS SA, y describe los resultados desde dos perspectivas. El primero, al ser la vista del organismo administrador, resume los resultados de las mediciones tales como SRV, LA, profundidad de macrotextura, penetración de agua, contenido efectivo de asfalto, todo comparado con los estudios de mezcla originales. La comparación se realiza con superficies de capas de rodadura similares hechas con agregados convencionales de origen ígneo.

1.3.5 Método de diseño Marshall

1.3.5.1 Introducción

El método Marshall es para MACs de gradación densa. Se utiliza en casi todo el mundo. Es el método de diseño de mezcla predominante para pavimentos de aeropuertos.

Para una única gradación de agregados seleccionada, se prueban cinco contenidos de asfalto diferentes, en función de varios criterios volumétricos y de resistencia para seleccionar el contenido óptimo de asfalto. Los resultados de las pruebas siempre deben reportarse como el promedio de tres especímenes compactados “idénticos”. La selección del contenido óptimo de asfalto requiere un juicio de ingeniería, dependiendo del tráfico, el clima y experiencia con los materiales locales utilizados. En la mayoría de casos, se debe seleccionar el contenido óptimo de asfalto para el cual los especímenes compactados tengan 4 por ciento de vacíos de aire.

1.3.5.1.1 Estándares aplicables

Los procedimientos de prueba Marshall han sido estandarizados por la ASTM y AASHTO. Los procedimientos son dados en:

ASTM D6926, “Preparación de mezclas bituminosas usando el aparato Marshall”

ASTM D6927, “Método de prueba estándar para estabilidad Marshall y flujo de mezclas bituminosas.

AASHTO T245, “Resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas usando el aparato Marshall

1.3.5.1.2 Descripción del método

El procedimiento para el método Marshall comienza con la preparación de los especímenes de prueba. Los pasos preliminares a la preparación de especímenes son:

- (a) Todos los materiales propuestos para su uso en MACs cumplen con los requerimientos físico-mecánicos establecidos en las especificaciones del proyecto;
- (b) Las combinaciones de agregado cumplen los requerimientos de gradación establecidas en las especificaciones del proyecto; y
- (c) Con el fin de realizar análisis de densidad y vacíos, se determina la gravedad específica bulk de todos los agregados utilizados en la mezcla y la gravedad específica del cemento asfáltico.
- (d) Estos requerimientos son cuestión de pruebas rutinarias, especificaciones y técnicas de laboratorio que deben considerarse para cualquier método de diseño de mezcla.
- (e) El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de 63.5 mm (2 ½ in.) de altura por un diámetro de 101.6 mm (4 in.). Estos se preparan utilizando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar la mezcla de asfalto y agregado. Las dos características principales del método Marshall de diseño de mezcla son, un análisis de densidad-vacíos y una prueba de estabilidad-flujo de los especímenes de prueba compactados.
- (f) La estabilidad del espécimen de prueba es la resistencia de carga máxima en Newtons que el espécimen de prueba estándar desarrollará a 60°C cuando se analiza cómo se describe. El valor de flujo es la deformación total, en unidades de 0.25 mm (1/100 in.), que se produce en el espécimen entre la no carga y el punto de carga máxima durante la prueba de estabilidad

1.3.5.2 Preparación de los especímenes de prueba

1.3.5.2.1 General

Para determinar el contenido óptimo de asfalto de una mezcla o gradación de agregados en particular, mediante el método Marshall, se prepara una serie de especímenes de prueba para un rango de diferentes contenidos de asfalto, de manera que las curvas de datos de prueba, muestren relaciones bien definidas. Las pruebas deben planearse en base a incrementos de 0.5 por ciento del contenido de asfalto, con al menos dos contenidos de asfalto por encima del valor óptimo esperado y al menos dos por debajo de ese valor.

El contenido de asfalto “óptimo esperado” puede estar basado en la experiencia y/o fórmula de cálculo. Entonces dicho contenido, en porcentaje del peso total de la mezcla, puede estimarse ser aproximadamente equivalente al porcentaje de agregado en la gradación final que pasa el tamiz de 75 μm (No. 200).

Un ejemplo de fórmula de cálculo es la ecuación siguiente:

$$P = 0.035^a + 0.045b + Kc + F$$

Donde:

P = contenido de asfalto aproximado de la mezcla, en porcentaje del peso de la mezcla

a = porcentaje de agregado retenido en el tamiz 2.36 mm (N°8)

b = porcentaje de agregado que pasa la malla N°8 y es retenido en la 75- μm (No. 200)

c = porcentaje de agregado que pasa la malla N° 200

K = 0.15 para agregados que pasan en un 11–15% la malla 75- μm (No. 200)

0.18 para aquellos que pasan en un 6–10 % la malla 75- μm (No. 200)

0.20 para los que pasan en un 5 o menos la malla 75- μm (No. 200)

F = 0 – 2.0%. Basado en la absorción de los agregados, sean ligeros o pesados, en la ausencia de datos, se sugiere usar un valor de 0.70.

Para proporcionar datos adecuados, se preparan al menos tres especímenes de prueba para cada contenido de asfalto seleccionado. Por lo tanto, un diseño de mezcla Marshall usando cinco contenidos de asfalto diferentes normalmente requerirá al menos 15 especímenes de prueba. Cada espécimen de prueba generalmente requerirá aproximadamente 1.2 kg (2.7 lb.) de agregado. Suponiendo desperdicios menores, la cantidad mínima de agregados para una serie de especímenes de prueba de una mezcla y gradación determinadas, serán de aproximadamente 23 kg (50 lb.) y por lo menos 4 litros (1 gal) de cemento asfáltico.

1.3.5.2.2 Equipo

El equipo (calibrado según sea necesario) requerido para la preparación de los especímenes de prueba es:

Bandejas metálicas de fondo plano para calentar áridos;

Bandejas redondas de metal o un tazón para mezclar, de aproximadamente 4 litros de capacidad, para mezclar asfalto y agregados;

Horno y placa caliente, preferiblemente controlados termostáticamente, para calentar agregados, asfalto y equipos;

Cuchara para mezcla los agregados;

Termómetros u otros dispositivos termométricos: blindados, de vidrio o de cuadrante con vástago metálico, de 10°C (50 ° F) a 235°C (450 ° F), para determinar la temperatura de los agregados, asfalto y mezcla;

Balanzas: Con capacidad de 5 kg, sensible a 1 g, para el pesaje de agregados y asfalto, y capacidad de 2 kg, sensible a 0,1 g, para el pesaje de especímenes compactados;

Cuchara mezcladora grande o paleta pequeña;

Espátula grande;

Mezclador mecánico (opcional): mezclador de masa de pan comercial con capacidad de 4 litros o más, equipado con dos tazones de metal y dos agitadores de alambre, o un mezclador de tipo equivalente;

El pedestal de compactación consiste en un poste de madera de 200 × 200 × 460 mm, rematado con una placa de acero de 305 × 305 × 25 mm. El poste de madera debe asegurarse con cuatro soportes de ángulo a una losa de concreto sólido. La tapa de acero debe estar firmemente sujeta al poste. El pedestal debe instalarse de manera que el poste esté a plomo, el nivel de la tapa y todo el conjunto libre de movimiento durante la compactación. Los martillos de compactación pueden operarse manualmente o mecánicamente.

El molde de compactación, consiste de una placa base, molde y collar. El molde tiene un diámetro interior de 101.6 mm y una altura de aproximadamente 75 mm; La placa base y el collar están diseñadas para ser intercambiables con cualquier extremo del molde.

Martillo de compactación, que consiste en una cara plana de apisonamiento circular, de 98.4 mm de diámetro y equipado con un peso de 4.5 kg, construido para obtener una altura especificada de caída de 457 mm, además debe cumplir con los requisitos de la ASTM D6926;

El sujetador del molde, que consiste en un dispositivo de tensión de resorte diseñado para mantener el molde de compactación centrado en su lugar sobre el pedestal de compactación, debe cumplir con los requisitos de ASTM D6926;

Discos de papel, de 100 mm de diámetro;

Extractor de especímenes de acero, en forma de un gato hidráulico y un disco con un diámetro de no menos de 100 mm y 13 mm de espesor para extraer el espécimen compactado.

Guantes de soldador, para manejo de equipos calientes. Guantes de goma para sacar los especímenes del baño de agua; y

Crayones de marcado, para la identificación de los especímenes de prueba.

1.3.5.2.3 Preparación de los especímenes de prueba

Para elaborar especímenes Marshall se recomienda ejecutar los pasos siguientes:

- (a) *Número de muestras*, preparar al menos tres muestras para cada combinación de agregados y contenido de asfalto.
- (b) *Preparación de agregados*, secar los agregados hasta peso constante de 105°C a 110°C y separarlos por tamizado en seco, en las fracciones de tamaño deseado.
- (c) *Determinación de la temperatura de mezclado y compactación*, la temperatura a la que debe calentarse el asfalto para producir viscosidades de 170 ± 20 centistokes cinemáticos y 280 ± 30 centistokes cinemáticos se establecerá como la temperatura de mezclado y de compactación respectivamente. Estas temperaturas se pueden estimar a partir de una gráfica que relacione la viscosidad (escala log-log en centistokes) versus temperatura (escala log en grados Rankine, $^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 459.7$) para el cemento asfáltico que se va a utilizar.
- (d) *Preparación del molde y martillo*, Limpie a fondo el molde y la cara del martillo de compactación y caliéntelos en un baño de agua o en una placa caliente a una temperatura entre 95 y 150°C.
- (e) *Preparación de las mezclas*, pese en bandejas separadas para cada espécimen de prueba, la cantidad de cada fracción de agregado a usar para producir la gradación requerida y una bachada que dará como resultado un espécimen compactado de 63.5 ± 1.27 mm de altura. Esto normalmente será con una cantidad de material de aproximadamente 1.2 kg. Luego colocar los depósitos en el horno y calentar a una temperatura que no exceda los 28°C por encima de la temperatura de mezclado especificada en ©. Cargar el recipiente con los agregados calientes y mezclar bien.

Formar un cráter en la mezcla seca y pesar la cantidad requerida de cemento asfáltico para la mezcla, de acuerdo con los pesos de las bachadas calculados. En este punto, la temperatura del agregado y el asfalto debe estar dentro de los límites de temperatura de mezcla establecidas en el párrafo (c). El cemento asfáltico no debe mantenerse a temperaturas de mezclado durante más de una hora antes de usarlo. Mezcle el agregado y el cemento asfáltico, preferiblemente con un mezclador mecánico o a mano con una paleta, lo más rápida y completamente posible para obtener una mezcla que tenga una distribución uniforme de asfalto.

- (f) *Llenado del molde*, colocar un filtro o un disco de papel no absorbente cortado a medida en la parte inferior del molde. Colocar toda la bachada en el molde con collar y luego chucé la mezcla vigorosamente con una espátula o paleta calentada 15 veces alrededor del perímetro y 10 veces en el interior. Alise la superficie a una forma ligeramente redondeada. La temperatura de la mezcla inmediatamente antes de la compactación deberá estar dentro de los límites de temperatura de compactación establecida en el párrafo (c); caso contrario, se desechará, en ningún caso se recalentará la mezcla.
- (g) *Compactación de especímenes*, colocar un disco de papel encima de la mezcla y luego colocar molde sobre el pedestal de compactación en el soporte del molde. Aplicar 35, 50 o 75 golpes con el martillo de compactación, según el nivel de tráfico de diseño, liviano, medio o pesado respectivamente, usando una caída libre de 457 mm. Sostenga el eje del martillo de compactación lo más perpendicular a la base del conjunto de molde como sea posible durante la compactación. Retire la placa base y el collar, e invierta y vuelva a montar el molde. Aplique el mismo número de golpes de compactación en la cara del espécimen invertido. Después de la compactación, retire la placa base y los discos de papel y deje que la muestra se enfríe a temperatura ambiente hasta que no se produzca ninguna deformación al retirarla del molde. Cuando se desea un enfriamiento más rápido, se pueden usar ventiladores eléctricos, pero no agua, a menos que la muestra esté en una bolsa de plástico. Retire el espécimen del molde por medio de un gato hidráulico u otro dispositivo de compresión, y luego colóquelo en una superficie lisa y nivelada hasta que esté listo para la prueba. Normalmente, los especímenes se dejan enfriar durante la noche.

1.3.5.3 Procedimiento para las pruebas

1.3.5.3.1 General

En el método Marshall, cada espécimen de prueba compactado, es sometido a las pruebas y análisis según el orden siguiente:

Determinación de la altura del espécimen;

Determinación de la gravedad específica bulk;

Análisis de densidad y vacíos; y

Prueba de estabilidad y flujo.

1.3.5.3.2 Determinación de la gravedad específica bulk

La prueba de gravedad específica bulk se puede realizar tan pronto como los especímenes recién compactados se hayan enfriado a temperatura ambiente. Esta prueba se realiza de acuerdo con la norma ASTM D1188, “Gravedad específica bulk de mezclas bituminosas compactadas que utilizan especímenes recubiertos con parafina” o ASTM D2726, “Gravedad específica bulk de mezclas bituminosas compactadas que utilizan especímenes saturados de superficie seca”.

1.3.5.3.3 Prueba Marshall

Equipo para las pruebas de Estabilidad y Flujo

El equipo requerido para la prueba de los especímenes de 101.6 mm de diámetro por 63.5 mm de altura es el siguiente:

El aparato Marshall es un dispositivo de prueba de compresión, conforme a ASTM D6927 y está diseñada para aplicar la carga a los especímenes de prueba, a través de los cabezales de segmentos cilíndricos, a una velocidad de carga constante de 51 mm por minuto. Se incluyen dos postes de guía perpendiculares para permitir que los dos segmentos mantengan la posición horizontal y el movimiento vertical libre durante la prueba. Además, está equipado con un anillo calibrado para determinar la carga aplicada, un cabezal de estabilidad Marshall para su uso en la prueba del espécimen y un medidor de flujo Marshall para determinar la cantidad de deformación a la carga máxima en la prueba. En lugar del aparato Marshall se puede usar una máquina de prueba universal equipada para tal fin.

El baño de agua debe tener una profundidad de al menos 150 mm y debe controlarse termostáticamente a $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. El tanque debe tener un falso fondo perforado o estar equipado con un estante para suspender muestras al menos 50 mm por encima del fondo del baño.

Procedimiento para la prueba de Estabilidad y Flujo

Una vez que se ha determinado la gravedad específica bulk de los especímenes de prueba, se realizan las pruebas restantes de estabilidad y flujo:

- (a) Determinar la altura del espécimen;
- (b) Sumergir el espécimen en un baño de agua a $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, durante 30 a 40 minutos antes de la prueba, o en un horno a la misma temperatura durante 120 a 130 minutos; y
- (c) Usar un dispositivo de registro automático, o un anillo de prueba y un medidor de flujo. Colocar el medidor de flujo sobre la barra de guía marcada y “poner a cero” el medidor de flujo mientras se sostiene firmemente contra el segmento superior del cabezal de prueba mientras se aplica la carga.
- (d) Limpiar a fondo las superficies internas de los cabezales de prueba. La temperatura de los cabezales se mantendrá entre 21.1 y 37.8°C , usando un baño de agua, cuando sea necesario, se lubricará las barras de guía con una película delgada de aceite para que el cabezal de prueba superior se deslice libremente sin atascarse. Si se usa un anillo de prueba para medir la carga aplicada, verifique que el dial indicador esté firmemente fijo y “puesto a cero” para la posición de “sin carga”.
- (e) Con el aparato de prueba listo, retirar el espécimen de prueba del baño de agua y secar cuidadosamente la superficie con una toalla. Colocar la muestra en la parte inferior del cabezal de prueba y el centro; luego coloque el cabezal de prueba superior en su posición y centre el ensamblaje completo en el dispositivo de carga. Coloque la barra guía marcada con el medidor de flujo como se indica en ©.
- (f) Aplicar la carga de prueba al espécimen a una tasa constante de deformación, 51 mm por minuto, hasta que se produzca la falla. El punto de falla se define cuando se obtiene la lectura de carga máxima. La fuerza total en Newtons (N) requerida para producir la falla de la muestra se registrará como su valor de estabilidad Marshall.
- (g) Mientras la prueba de estabilidad está en curso (si no se usa un dispositivo de registro automático), sostener el medidor de flujo firmemente en posición sobre la barra guía y retirarlo inmediatamente cuando la carga comience a disminuir, tomar la lectura y registrarla. Esta lectura es el valor de flujo para el espécimen, expresado en unidades de 0.25 mm (1/100 in.). Por ejemplo, si el espécimen se deformó 3.8 mm (0.15 in.), El valor de flujo es 15.

- (h) El procedimiento completo para las mediciones de estabilidad y flujo, comenzando con la remoción del espécimen del baño de agua, debe completarse dentro de un período de 30 segundos.
- (i) La estabilidad Marshall será corregida, para aquellos especímenes que tengan una altura diferente de 63.5 mm.

1.3.5.3.4 Densidad y análisis de vacíos

Después de completar la prueba de estabilidad y flujo, se realiza un análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba.

- (a) Promediar los valores de gravedad específica bulk para todos los especímenes de prueba de un contenido de asfalto dado; los valores obviamente erróneos no se incluirán en el promedio. El valor promedio de la gravedad específica bulk para cada contenido de asfalto se usará en cálculos adicionales de vacíos
- (b) Determinar el peso unitario promedio para cada contenido de asfalto multiplicando el valor promedio de la gravedad específica bulk por la densidad del agua.
- (c) Determinar la gravedad específica máxima teórica (G_{mm} por ASTM D2041) para al menos dos contenidos de asfalto, preferiblemente en mezclas en o cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor medio para la gravedad específica efectiva del agregado total se calcula a partir de estos valores. Este valor se puede usar para calcular la gravedad específica máxima de mezclas con diferentes contenidos de asfalto.
- (d) Utilizando la gravedad específica efectiva (G_{se}) y bulk (G_{sb}) del agregado total, la gravedad específica media bulk de la mezcla compactada (G_{mb}), la gravedad específica del asfalto (G_b) y la gravedad específica máxima teórica de la mezcla (G_{mm}) determinadas como se explica anteriormente en ©, calcular el porcentaje de asfalto absorbido (P_{ba}) en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos de aire (P_a), porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA) y porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

1.3.5.4 Interpretación de los resultados

1.3.5.4.1 Preparación de los datos de prueba

Preparar los valores de estabilidad, flujo y vacíos

- (a) Los valores de estabilidad medidos para especímenes que se aparten del grosor estándar de 63.5 mm se convertirán a un valor equivalente de 63.5 mm, mediante un factor de conversión. Las relaciones de correlación aplicables para convertir los

valores de estabilidad medidos se exponen en la tabla 1 de MTC (2016, p. 592). Se debe tener en cuenta que la conversión se puede realizar sobre la base del espesor o del volumen medido.

- (b) Promediar los valores de flujo y los de estabilidad convertidos finales para todos los especímenes de un contenido de asfalto dado. Los valores que están obviamente en error no se incluirán en el promedio.
- (c) Elaborar gráficas separadas para los siguientes valores y unir los puntos trazados con una curva suave que obtenga el “mejor ajuste” para todos los valores, como se ilustra en la :

Porcentaje de vacíos de aire (Pa) versus contenido de asfalto;

Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) versus asfalto;

Porcentaje de vacíos llenos con asfalto (VFA) versus contenido de asfalto;

Peso unitario de la mezcla total versus contenido de asfalto;

Estabilidad versus contenido de asfalto; y

Flujo versus contenido de asfalto.

- (d) Determinar el contenido óptimo de asfalto y las propiedades de la mezcla utilizando los gráficos antes mencionados, según se explica en el numeral 1.3.5.4.5.

1.3.5.4.2 Tendencias y relaciones de los datos de prueba

Al examinar las curvas de propiedades de prueba graficadas según el numeral 1.3.5.4.1 (c) y , se puede obtener información sobre la sensibilidad de la mezcla al contenido de asfalto. Se ha encontrado que las curvas de propiedades de prueba de mezclas de asfálticas de gradación densa siguen un patrón razonablemente consistente, *pero las variaciones ocurren y siempre ocurrirán*. Las tendencias generalmente notadas son:

Los valores de estabilidad se incrementan con el incremento del contenido de asfalto hasta un máximo, luego del cual inician a decrecer.

Los valores de flujo se incrementan con el incremento del contenido de asfalto.

La curva para el peso unitario de la mezcla total sigue la tendencia similar a la curva de estabilidad, excepto que el peso unitario máximo normalmente (pero no siempre) se produce con un contenido de asfalto ligeramente más alto que la estabilidad máxima.

El porcentaje de vacíos de aire (Pa), disminuye constantemente al aumentar el contenido de asfalto, y en última instancia se aproxima a un contenido de vacío mínimo.

El porcentaje de vacíos en el agregado mineral, VMA, generalmente disminuye (debido a una mejor compactación) a un valor mínimo, y luego aumenta con el aumento del contenido de asfalto, porque el agregado comienza a ser separado por un exceso de asfalto en la mezcla.

El porcentaje de vacíos llenos de asfalto, VFA, aumenta constantemente al aumentar el contenido de asfalto porque el VMA se está llenando de asfalto.

1.3.5.4.3 Criterios para la aceptación de una MAC satisfactoria

Decidir si la mezcla asfáltica para pavimentación será satisfactoria al diseño seleccionado de contenido de asfalto, se determinará aplicando ciertos criterios limitantes a los datos obtenidos de la prueba. Los criterios de diseño de mezcla del método Marshall en la *Tabla 8*, son recomendados por el Manual de Especificaciones Generales (MTC, 2013), basados en las recomendaciones del Instituto del Asfalto (Asphalt Institute).

Tabla 8

Requisitos para mezclas asfálticas en caliente.

Parámetro de Diseño	Tipo de Tráfico		
	Liviano	Medio	Pesado
Nº de golpes por lado	35	50	75
Estabilidad mín. (kN)	4.53	5.44	8.15
Flujo 0.01" (0.25mm)	8 - 20	8 - 16	8 - 14
Vacíos de aire (%)	3 - 5	3 - 5	3 - 5
Vacíos llenos c/Asf. (%)	70 - 80	65 - 78	65 - 75

Fuente: Adaptado de MTC (2013).

1.3.5.4.4 Determinación del contenido de asfalto óptimo preliminar

El contenido óptimo de asfalto para la mezcla de pavimentación asfáltica se selecciona considerando todos los datos discutidos anteriormente. *En general, el Instituto de Asfalto recomienda elegir el contenido de asfalto en la media de los porcentajes límites de vacíos de aire especificados, es decir 4 por ciento.* Luego, si todas las propiedades de mezcla calculadas y medidas a este contenido de asfalto cumplen con los criterios de diseño de mezcla de la *Tabla 8*, entonces ese es el contenido óptimo de asfalto para el diseño de mezcla.

Sin embargo, si no se cumplen todos los criterios de diseño, entonces es necesario algún ajuste o la combinación puede necesitar un nuevo diseño.

1.3.5.4.5 Selección contenido óptimo definitivo

El Instituto de Asfalto (Asphalt Institute, 2015) recomienda que el diseño final de la mezcla seleccionada sea uno cuya estructura de agregado y contenido de asfalto, compactada al número de golpes de diseño, resulte en un 4 por ciento de vacíos de aire y cumpla satisfactoriamente con todos los otros criterios establecidos en la Tabla 8. Las

desviaciones de los criterios de diseño recomendados deben especificarse claramente en los documentos del proyecto y deben ser apropiados para el uso previsto de la mezcla asfáltica. La mezcla debe contener la mayor cantidad posible de cemento asfáltico para maximizar la durabilidad, al mismo tiempo que se mantiene la estabilidad requerida para soportar las cargas previstas durante la vida útil del pavimento.

1.4 Formulación del Problema

¿Qué efectos produce sustituir agregado grueso convencional por siderúrgico, en las propiedades físico-mecánicas de mezclas asfálticas en caliente?

1.5 Justificación e Importancia

La presente investigación se justifica y es importante por:

1.5.1 Académica

Se ha recopilado, consultado e interpretado información de fuentes nacionales e internacionales reconocidas, confiables y relativamente actuales (Groenniger et al., 2017; Nikolaidis, 2014; entre otros), además se generará información propia obtenida de los resultados para que los lectores del presente documento actualicen y/o complementen sus conocimientos académicos en cuanto al tema de mezclas asfálticas en caliente y tendencias alternativas en su elaboración, como es el uso de residuos de la industria siderúrgica, específicamente escoria de acero. Por otro lado, también servirá como referencia para futuras investigaciones acerca del tema, así, optimizar lo realizado y obtener resultados más precisos.

1.5.2 Tecnológica

Se aportará con conocimientos innovadores a nivel local, dado que se trata de diseñar y experimentar con un material compuesto (poco estudiado en nuestro medio) usando materia prima local, para el caso de los agregados, ya que este es un factor muy importante y determinante (Wen et al., 2016, p. 2). De obtener resultados favorables como los que obtuvieron Groenniger et al. (2017); López (2017); Maharaj et al. (2017); Santos (s.f.); Segura (2016); Wen et al. (2016); entre otros, dichos conocimientos servirán para que las instituciones interesadas, en esta nueva tecnología de mezclas asfálticas, la pongan a prueba en condiciones reales construyendo, de ser posible, un tramo de prueba, y finalmente empleándola para la construcción de futuras obras de pavimentación, tal como se viene haciendo en países desarrollados.

1.5.3 Ambiental

El uso persistente de agregados convencionales en la construcción es una amenaza potencial para el medio ambiente, acciones efectivas de mitigación y mucha investigación sobre materiales alternativos podrían minimizar el problema (Oluwasola et al., 2016, p. 1; Wu et al., 2006, p. 1), es por ello que se investigarán los efectos de la escoria de acero, usándola como agregado grueso, en la elaboración de mezclas asfálticas, por ser una alternativa inteligente y sostenible de aprovechamiento de los residuos generados por las empresas productoras de acero, debido a que, de no ser utilizados se dispondrán en vertederos generando impactos ambientales significativos (Behnood y Ameri, 2012, p. 1; C. H. Li et al., 2014, p. 1; W. Li et al., 2012, p. 1; Maharaj et al., 2017, p. 2; WSA, 2018b; Wu et al., 2006, p. 1), aun estando acondicionados para tal fin; además de perder áreas verdes o mejor aprovechadas (Maryland DOT, 2015, p. 1).

De obtener resultados positivos y para evitar tales impactos, se adquirirá en masa y se destinará a la producción de mezclas asfálticas, lo cual es conveniente tanto para el cuidado del medio ambiente como para las empresas del sector metalúrgico, las cuales también están priorizando la búsqueda de soluciones al depósito final de sus residuos (Gerdau, 2018), especialmente de la escoria de acero, la cual representa entre un 15 y 20% de la producción de acero (C. H. Li et al., 2014, p. 1; W. Li et al., 2012, p. 1; Wu et al., 2006, p. 1), es decir, entre unas 180 000 y 240 000 toneladas, si consideramos la exorbitante cantidad de 1.2 millones de toneladas de acero crudo que se produjo en el Perú el año pasado (WSA, 2018^a).

1.5.4 Social

El uso de escoria siderúrgica, al mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas (Skaf, Manso, Aragón, Fuente-Alonso, y Ortega-López, 2017), conforma una capa de rodadura con mejor desempeño, tanto a corto como a largo plazo además de hacerla más durable (Masoudi; Abtahi y Goli, 2017; citados por Maharaj et al., 2017, p. 4), lo cual se traduce en una mejor experiencia y comodidad para el usuario, evitando además posibles accidentes o problemas de salud que son ocasionados por golpes repentinos a causa de transitar por vías pavimentadas, por ejemplo, con problemas de ahuellamiento u hoyos.

1.5.5 Económica

El empleo de agregado siderúrgico da como resultado MACs más rentables, conclusión a la que llegaron Xue et al. (2006), Wu et al. (2007) y Wen et al. (2014), citados por Groenniger et al. (2017, p. 373), luego de evaluar sus resultados experimentales, debido a que es más resistente y duradera que la mezcla con agregados convencionales, lo cual se

traduce en una reducción de los costos de mantenimiento de vías pavimentadas. Por otra parte, también generaría un tipo de ingreso económico más provechoso y sostenible debido a que los espacios destinados a vertederos de escoria, servirían para fines más beneficioso, además de reducir la demanda por dichos espacios, dada la creciente demanda de acero, aproximadamente un 13% en 2017 (Alacero, 2018; WSA, 2018b) y por ende de escoria.

En resumen, la importancia radica en que se minimizará el consumo de agregados pétreos y reducirá los impactos ambientales al aprovechar residuos siderúrgicos, ya que en los últimos años toda la materia prima para producir acero es producto del reciclaje (Gerdau, 2018) dado que el acero es un material único, en su capacidad para ser continuamente reciclado, sin pérdida de propiedades o rendimiento (WSA, 2018b)

1.6 Hipótesis

Los efectos de sustituir agregado grueso convencional por siderúrgico, en las propiedades físico-mecánicas de mezclas asfálticas en caliente son: *Incremento del porcentaje de vacíos y optimización de la densidad, flujo y estabilidad Marshall.*

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivo general

Determinar los efectos que produce sustituir agregado grueso convencional por siderúrgico, en las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas en caliente.

1.7.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar los agregados convencionales y el agregado siderúrgico.
- b) Estimar los porcentajes óptimos de combinación de agregados.
- c) Determinar la cantidad necesaria (en peso) de cada uno de los materiales (basado en un peso total de 1200 g, porcentajes de asfalto de 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5 y de escoria de 0, 25, 50, 75 y 100 con respecto al peso total y al peso del agregado grueso convencional respectivamente).
- d) Evaluar las propiedades físico-mecánicas de 125 especímenes, elaborados con porcentajes de asfalto preliminares.
- e) Estimar el porcentaje óptimo de asfalto para cada porcentaje de escoria.
- f) Evaluar las propiedades físico-mecánicas optimizadas de 25 especímenes, elaborados con los porcentajes óptimos de asfalto y.
- g) Determinar el porcentaje óptimo de escoria de acero.
- h) Comparar el costo unitario de la partida: Carpeta Asfáltica en Caliente de 2”.

1.8 Limitaciones de la Investigación

La principal limitación del presente estudio fue la determinación de los efectos, basándose sólo en las propiedades físico-mecánicas fundamentales, tal como: Densidad, Vacíos (Pa, VAM, VFA), Estabilidad y Flujo.

Por otra parte, las propiedades antes mencionadas sólo fueron determinadas bajo la suposición de que la MAC va a estar sometida a las condiciones siguientes:

Nivel de Tráfico: *tráfico medio* ($10^4 \leq \text{ESAL de Diseño} \leq 10^6$)

Temperatura máxima de operación: 60°C.

Tipo de vías: Vías locales y colectoras.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Tipo y Diseño de Investigación

2.1.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación es *Cuantitativa Correlacional*, ya que tiene como finalidad dar conocer la relación o grado de asociación que existe entre dos o más variables (H. Sampieri, 2013, p. 93);

Para nuestro caso, nos interesa conocer la relación entre las dos variables involucradas: agregado siderúrgico (en diferentes porcentajes) y propiedades físico-mecánicas de mezclas asfálticas en caliente.

2.1.2 Diseño de la investigación

Este estudio se adecúa a un diseño *Experimental*, debido a que, en este, el experimentador cambia al menos una de las variables a ser estudiada y entonces observa el efecto de su acción sobre las restantes.

En nuestro caso se cambiará o variará gradualmente el porcentaje de agregado siderúrgico contenido en la MAC y luego se observará su efecto sobre las propiedades físico-mecánicas de la misma.

2.2 Población y Muestra

2.2.1 Población

Cualquier mezcla asfáltica en caliente que vaya a ser elaborada, empleando los materiales y métodos usados en la presente investigación (*entiéndase por materiales al asfalto y agregados obtenidos de las fuentes indicadas líneas abajo*).

2.2.2 Muestra

150 especímenes elaborados con aproximadamente 200 kg de escoria de acero provenientes de la productora de acero Siderperú® ubicada en la ciudad de Chimbote, 350 kg de agregados pétreos de la cantera ubicada en el sector La Pluma – Batán Grande, Chiclayo y seis galones de asfalto (PEN 60-70) procedentes de la refinería ubicada en la ciudad de Talara, perteneciente a Petroperú®

2.3 Variables, Operacionalización

H. Sampieri (2013, p. 105) afirma que “*una variable es una propiedad que puede fluctuar y cuya variación es susceptible de medirse u observarse*”, entonces teniendo en cuenta este concepto se identificaron las variables involucradas en la presente investigación, así como sus dimensiones e indicadores, tal y como se muestra en la *Tabla 9* y *Tabla 10*.

2.3.1 Variable independiente

Tabla 9.

Operacionalización de la variable independiente

Variable	Dimensión*	Indicadores	Índice	Técnica / Instrum. de recolección de datos
Agregado Siderúrgico (Escoria de Acero)	Granulometría	Distribución de partículas	g	Observación / Formatos de Laboratorio
	Peso Unitario	Suelto y Compactado	g/cm ³	
	Peso Específico	Seco y Saturado Sup. Seca	g/cm ³	
	Absorción	Absorción de agua	%	
	Los Ángeles	Desgaste	%	

Fuente: Elaboración propia

**Mayor detalle en tablas 10 - 15 de CE.010 (2010) y sección 2 de MTC (2016)*

2.3.2 Variable dependiente

Tabla 10.

Operacionalización de la variable dependiente

Variable	Dimensión	Indicadores*	Índice	Técnica / Instr. de recolección de datos
Propiedades Físico-Mecánicas de Mezclas Asfálticas en Caliente	Propiedades Físicas	Densidad	g/cm ³	Observación / Formatos del Laboratorio de Ensayo de Materiales USS
		Vacíos	%	
	Propiedades Mecánicas	Estabilidad	kN	
		Flujo	mm	

Fuente: Elaboración propia

**Mayor detalle en sección 5 de MTC (2016)*

2.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.

2.4.1 Técnicas de recolección de datos

Observación

Se observaron cuidadosamente las características físicas de los materiales antes y durante la ejecución las pruebas. Antes, para asegurarnos de que la cantidad y estado del material a probar cumple con ciertos estándares establecidos por instituciones nacionales e internacionales y, durante, para lograr registrar los datos con cautela y precisión, para que los resultados conserven similares características.

También se observó de manera minuciosa los procedimientos de elaboración y prueba de especímenes (briquetas), y por otra parte también fue necesaria para registrar los resultados arrojados por los instrumentos usados para dichas pruebas.

Análisis de contenido

Se consultó documentos, tal como, artículos científicos, libros, informes, manuales, normas legales, tesis, boletines, etc., tanto en formato digital como impreso, además se navegó por la web en busca de información adicional relevante.

2.4.2 Instrumentos de recolección de datos

Los datos fueron recolectados haciendo uso de los formatos elaborados de recolección de datos, los mismos que fueron leídos de los instrumentos de medición con las que cuenta el LEM para llevar a cabo este tipo de trabajo, entre los cuales y más importantes tenemos: balanzas, hornos eléctricos, termómetros, aparato Marshall y máquina de Los Ángeles.



Figura 16. Algunos instrumentos de recolección de datos.

Fuente: Fotografías propias

2.5 Procedimientos de Análisis de Datos

Los métodos de análisis de datos estuvieron basados tanto en estadística descriptiva como inferencial (H. Sampieri, 2013), las cuales se describen brevemente a continuación.

2.5.1 Estadística descriptiva

La estadística descriptiva se aplicó para el análisis de los datos recopilados, para lo cual se emplearon, medidas de tendencia central (media), medidas de dispersión (desviación estándar, varianza).

2.5.2 Estadística inferencial

La estadística inferencial se aplicó para la estimación de parámetros de una población a partir de muestras y para probar la hipótesis, empleando para ello, análisis paramétrico (regresiones, coeficientes de correlación), entre otros.

2.5.3 Procedimiento para la obtención de datos y resultados

2.5.3.1 Programa Experimental

El trabajo fue dividido en cuatro fases, las cuales se describen, a grandes rasgos, en los párrafos subsiguientes:

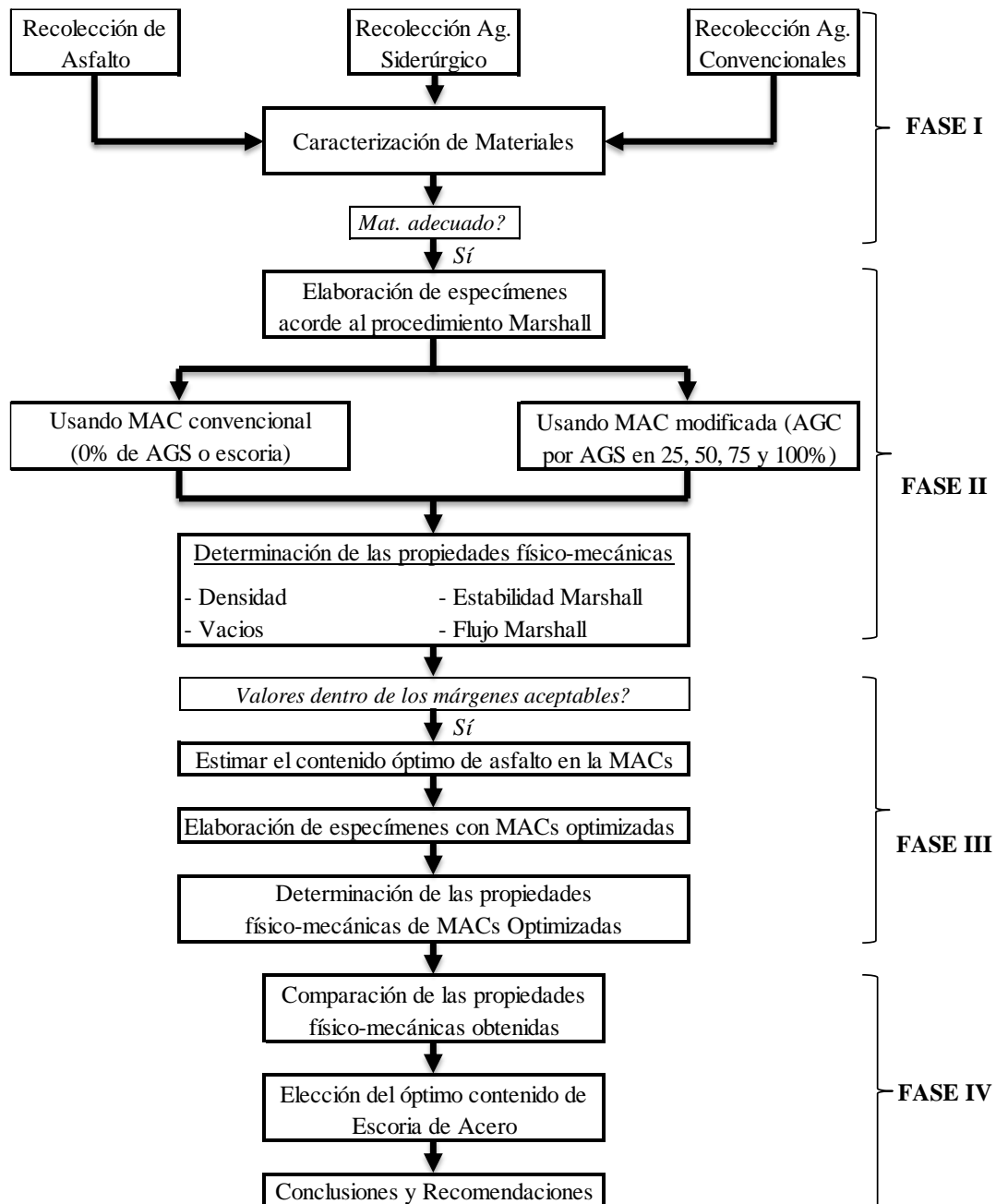


Figura 17. Representación esquemática del programa experimental llevado a cabo
Fuente: Elaboración propia

2.5.3.1.1 Fase I

La fase I, se inició con la recolección del cemento asfáltico, los agregados convencionales y siderúrgico (escoria de acero), para luego proceder a la caracterización de los mismos, la cual consistió en la determinación sus propiedades físico-mecánicas más relevantes, mediante la realización de pruebas acorde a estándares nacionales e internacionales, cuyos resultados se muestran resumidos desde la *Tabla 11* hasta la *Tabla 19*. Como se puede apreciar, parte de ellos sirvieron para realizar el debido control de calidad y así determinar si son o no adecuados para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente, para lo cual se tomaron como referencia los requerimientos establecidos en estándares y reglamentación nacional, además sirvieron para observar la distribución de partículas (*Figura 18* a *Figura 20*) según sus dimensiones (caso de los agregados), y de este modo establecer su respectiva gradación con la cual determinar al huso granulométrico al cual mejor se ajustan, por último, también sirvieron para calcular los porcentajes de combinación óptima de agregados (*Tabla 20* a *Tabla 25*), con los cuales se logró estimar las cantidades necesarias de cada material para la elaboración de las MACs (*Tabla 26* y *Tabla 27*).

2.5.3.1.2 Fase II

En la Fase II se elaboraron, compactaron y probaron, de acuerdo al procedimiento Marshall, un total de 125 especímenes. Como se indica, esta fase inició con la elaboración de cinco tipos de mezclas asfálticas en caliente, en las cuales se reemplazó el agregado grueso convencional (piedra chancada) por siderúrgico (escoria de acero) en porcentajes de 0, 25, 50, 75 y 100, es decir las mezclas contenían asfalto, arena y una combinación de escoria-piedra de 0%-100%, 25%-75%, 50%-50%, 75%-25% y 100%-0% (*Tabla 26* y *Tabla 27*), donde la primera fue usada como mezcla control (patrón). A medida que se iba avanzando con la elaboración de las mezclas, se compactaba y probaba los especímenes, cuyos resultados se muestran resumidos a partir de la *Tabla 28* hasta la *Tabla 32*. También cabe mencionar que, los contenidos de asfalto usados variaron desde 4.5% a 6.5%, en incrementos de 0.5%, de los cuales se elegiría el óptimo.

2.5.3.1.3 Fase III

La Fase III, comenzó mediante la evaluación los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a los especímenes (*Tabla 34*), para luego continuar con la determinación del óptimo contenido de asfalto de cada tipo de mezcla cuyos resultados se resumen en la *Tabla 33*. Determinados los contenidos óptimos de asfalto, se volvieron a elaborar los cinco tipos de mezclas para obtener cinco especímenes de cada tipo (un total de 25 especímenes), pero

esta vez sólo con los porcentajes óptimo determinados. Posteriormente se les sometió a las pruebas respectivas para determinar sus propiedades físico-mecánicas las cuales se reportan en la *Tabla 35*.

2.5.3.1.4 Fase IV

La Fase IV estuvo enfocada en la determinación del óptimo contenido de agregado siderúrgico (escoria de acero) presente en la mezcla asfáltica, para ello, primero se realizó la evaluación de los resultados obtenidos en la fase anterior (*Tabla 35*), luego se compararon dichos resultados entre los 5 tipos de mezclas y se determinó el óptimo contenido de escoria (*Tabla 36*), es decir el porcentaje de reemplazo con el cual se obtiene el mejor desempeño de la mezcla, en términos de estabilidad, flujo, y vacíos. Por último, se comparó las propiedades de la MAC convencional con la modificada (*Tabla 37*), y se dedujeron las conclusiones y se redactaron las recomendaciones en base a la experiencia adquirida.

2.5.3.2 Pruebas efectuadas

En la sección *Anexos > Pruebas Efectuadas*, se describe brevemente sólo las pruebas más importantes y los trabajos efectuados para llevarlas a cabo, además en la misma sección, pero en la parte de Panel Fotográfico, se muestran algunas fotografías tomadas durante la ejecución de las mismas. Para mayores detalles de las pruebas descritas revisar MTC (2016).

2.5.4 Procesamiento de los datos

Para el procesamiento de los datos se usó *Libre Office* (freeware).

2.6 Criterios Éticos

En el desarrollo del presente estudio se tomó en cuenta los principios éticos siguientes.

2.6.1 Confiabilidad

La investigación se condujo de manera ética y responsable, siguiendo toda legislación pertinente y se ejecutó tomando las precauciones respectivas. Por otro lado, se usaron los métodos apropiados para el análisis y visualización de los datos.

Se verificaron cuidadosamente los cálculos, presentación de datos, escritura y pruebas realizadas. También se verificó la edición en todas sus etapas, para asegurar que los métodos y resultados fueron reportados con precisión.

2.6.2 Honestidad

Los resultados presentados en este documento son verídicos, dado que se tuvo muy en cuenta la honestidad, evitando así la creación, falsificación y manipulación inapropiada o malintencionada de los datos. Las imágenes producto de la investigación (fotografías, gráficos, esquemas, etc.), no fueron modificadas de manera malintencionada.

Se describen los métodos y se presentan los resultados de manera clara y sin ambigüedades. Además, se proporciona los detalles necesarios para permitir que los cálculos puedan ser corroborados por otros investigadores.

Se presenta un reporte completo de los resultados, sin omitir resultados inconsistentes, inexplicables o resultados que no respaldan la hipótesis del estudio.

Las investigaciones de otros autores son mencionadas y citadas de manera precisa. No se copió referencias de otras publicaciones sino se tuvo acceso al trabajo citado.

2.6.3 Equilibrio

Los resultados se presentan en el contexto de trabajos previos, representando dichos trabajos de manera justa y sin manipulaciones.

Los trabajos académicos y síntesis de investigaciones existentes que se han revisado se presentan de manera completa, equilibrada e incluyendo sus resultados independientemente de si apoyan o no, la hipótesis e interpretación que se propone.

Se abordan también las limitaciones del presente estudio.

2.6.4 Originalidad

Se respetaron los derechos de autor. Se referenció los trabajos y publicaciones previas de otros autores, además se citó la literatura básica donde fue posible.

Se reconoció adecuadamente y no se presentó como si fuera propio, datos, tablas, figuras o ideas originadas por otros investigadores.

2.6.5 Transparencia

Se divulgó toda fuente de financiamiento, incluyendo suministro de equipos o materiales.

2.6.6 Adecuada autoría y agradecimiento

Se reconoció con precisión los aportes de las personas que contribuyeron en el trabajo y su reporte. No se agradeció de manera engañosa, para implicar una contribución o aprobación, a personas que no han participado o dado su aprobación al presente estudio.

2.6.7 Responsabilidad y seriedad

Se asumirá la responsabilidad por el trabajo y contenido de esta investigación. Se corregirán de inmediato, cualquier error u omisión detectada después de la publicación. Se verá la manera de que los datos estén disponibles para investigadores que los soliciten. Se responderá adecuadamente a comentarios y preguntas posteriores a la publicación, aclarando o brindando detalles adicionales cuando sea necesario.

2.7 Criterios de Rigor Científico

Se tomaron en cuenta los criterios de rigor científico, según *Noreña et al. (2012)*

2.7.1 Fiabilidad

Los datos empleados en la presente investigación son reales, los métodos utilizados para su recolección están acorde con estándares internacionales y los procedimientos llevados a cabo estuvieron bajo la supervisión de un especialista.

2.7.2 Validez

El análisis de los datos y la interpretación de los resultados son adecuados, dado que se recibió el asesoramiento de profesionales especializados en el tema.

2.7.3 Credibilidad

Los resultados obtenidos guardan estrecha relación con la realidad observable.

2.7.4 Transferibilidad o aplicabilidad

Se realizó una descripción exhaustiva de las características del contexto en que se realiza la investigación por lo que los resultados son comparables con otros estudios.

2.7.5 Replicabilidad

Para lograr la replicabilidad del estudio se emplearon procedimientos estandarizados y una descripción detallada del proceso de recolección y análisis de datos, además de la interpretación de resultados, de este modo, cualquier investigador puede replicar los resultados obtenidos.

2.7.6 Relevancia

El estudio es relevante porque los resultados obtenidos ayudarán a los profesionales especialistas en ingeniería de pavimentos de nuestro medio, a emplear materiales alternativos en la elaboración de mezclas asfálticas y de este modo contribuir con la conservación del medio ambiente.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados en Tablas y Figuras

En las siguientes páginas se muestran figuras y cuadros resumen conteniendo los valores de los resultados obtenidos de las diversas pruebas que se efectuaron, los cuales fueron extraídos de los reportes de pruebas anexados al presente documento, y que sirven para corroborar con detalle los valores presentados en el presente capítulo.

3.1.1 Caracterización de agregados

3.1.1.1 Pruebas de control de calidad de agregados

Tabla 11

Resultados de pruebas de control de calidad Ag. Fino (Arena)

Prueba	Referencia	Requerimiento	Resultado
<i>Equivalente de Arena</i>	<i>MTC E 114</i>	<i>45 % mín.</i>	<i>66.80</i>
<i>Adhesividad (Riedel Weber)</i>	<i>MTC E 220</i>	<i>4 % mín.</i>	<i>4.00</i>
<i>Índice de Plasticidad</i>	<i>MTC E 111</i>	<i>4% máx.</i>	<i>2.38</i>
<i>Sales solubles totales</i>	<i>MTC E 219</i>	<i>0.5 % máx.</i>	<i>0.08</i>
<i>Absorción</i>	<i>MTC E 205</i>	<i>0.5% max.</i>	<i>0.49</i>

Nota: Para ser usada en vías locales y colectoras, región costa y tráfico mediano

Fuente: Elaboración propia, basada en MTC (2016)

Tabla 12

Resultados de pruebas de control de calidad Ag. Grueso (Piedra chancada)

Prueba	Referencia	Requerimiento	Resultado
<i>Pérdida en Sulfato de Mg</i>	<i>MTC E 209</i>	<i>12 % máx.</i>	<i>6.23</i>
<i>Abrasión Los Angeles</i>	<i>MTC E 207</i>	<i>40 % máx.</i>	<i>16.48</i>
<i>Partículas chatas y alargada</i>	<i>MTC E 223</i>	<i>15 % máx.</i>	<i>2.82</i>
<i>Partículas fracturadas</i>	<i>MTC E 210</i>	<i>65 / 40</i>	<i>26 / 68</i>
<i>Sales Solubles</i>	<i>MTC E 219</i>	<i>0.5 % máx.</i>	<i>0.06</i>
<i>Absorción</i>	<i>MTC E 206</i>	<i>1% max.</i>	<i>0.99</i>
<i>Adherencia</i>	<i>MTC E 517</i>	<i>+ 95</i>	<i>+95</i>

Nota: Para ser usada en vías locales y colectoras, región costa y tráfico mediano

Fuente: Elaboración propia, basada en MTC (2016)

Tabla 13

Resultados de pruebas de control de calidad Ag. Grueso (Escoria de Acero)

Prueba	Referencia	Requerimiento	Resultado
<i>Pérdida en Sulfato de Mg</i>	<i>MTC E 209</i>	<i>12 % máx.</i>	<i>4.38</i>
<i>Abrasión Los Angeles</i>	<i>MTC E 207</i>	<i>40 % máx.</i>	<i>26.34</i>
<i>Partículas chatas y alargada</i>	<i>MTC E 223</i>	<i>15 % máx.</i>	<i>0.21</i>
<i>Partículas fracturadas</i>	<i>MTC E 210</i>	<i>65/40</i>	<i>0 / 0</i>
<i>Sales Solubles</i>	<i>MTC E 219</i>	<i>0.5 % máx.</i>	<i>0.07</i>
<i>Absorción</i>	<i>MTC E 206</i>	<i>1% max.</i>	<i>2.40</i>
<i>Adherencia</i>	<i>MTC E 517</i>	<i>+ 95</i>	<i>+ 95</i>

Nota: Para ser usada en vías locales y colectoras, región costa y tráfico mediano

Fuente: Elaboración propia, basada en MTC (2016)

3.1.1.2 Pruebas fundamentales

Tabla 14

Resultados de pruebas fundamentales Ag. Fino (Arena)

Parámetro	Und	Referencia	Resultado
Peso Unit. Suelto humedo	g/cm ³	MTC E 203	1.590
Peso Unit. Suelto Seco	g/cm ³	MTC E 203	1.577
Peso Unit. Compacto humedo	g/cm ³	MTC E 203	1.744
Peso Unit. Compacto seco	g/cm ³	MTC E 203	1.730
Contenido de humedad natural	%	MTC E 108	0.816
Peso específico	g/cm ³	MTC E 205	2.621
Peso específico S. S. S.	g/cm ³	MTC E 206	2.633
Peso específico aparente	g/cm ³	MTC E 207	2.654

Fuente: Elaboración propia, basada en MTC (2016)

Tabla 15

Resultados del análisis granulométrico Ag. Fino (Arena)

Muestra : Arena		Cantera : La Pluma			
P. húm. (g) : 555.55		P. Seco (g) : 555.55			
Tamiz ASTM (in)	Retenido (mm)	Retenido (g)	Retenido (%)	Ret. Acum. (%)	Pasa (%)
N°4	4.76	0.00	0.00	0.00	100.00
N°8	2.38	83.55	15.04	15.04	84.96
N°10	2.00	24.56	4.42	19.46	80.54
N°16	1.19	106.33	19.14	38.60	61.40
N°30	0.59	109.80	19.76	58.36	41.64
N°40	0.42	44.92	8.09	66.45	33.55
N°50	0.30	61.14	11.01	77.45	22.55
N°80	0.18	44.34	7.98	85.44	14.56
N°100	0.15	11.12	2.00	87.44	12.56
N°200	0.07	29.89	5.38	92.82	7.18
Fondo	---	39.90	7.18	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

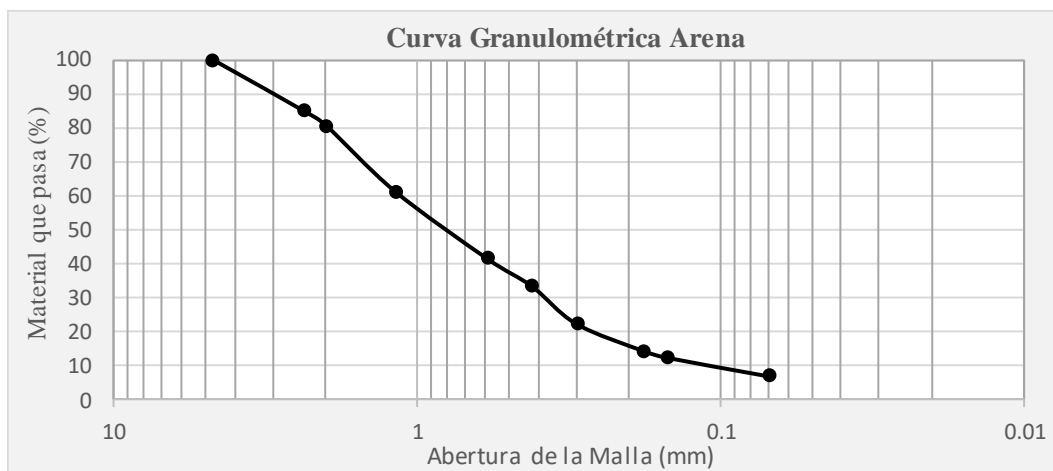


Figura 18. Curva granulométrica Ag. Fino (Arena)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16*Resultados de pruebas fundamentales Ag. Grueso (Piedra Chancada)*

Parámetro	Und	Referencia	Resultado
Peso Unit. Suelto humedo	g/cm ³	MTC E 203	1.471
Peso Unit. Suelto Seco	g/cm ³	MTC E 203	1.463
Peso Unit. Compacto humedo	g/cm ³	MTC E 203	1.606
Peso Unit. Compacto seco	g/cm ³	MTC E 203	1.598
Contenido de humedad natural	%	MTC E 108	0.525
Peso específico	g/cm ³	MTC E 206	2.649
Peso específico S. S. S.	g/cm ³	MTC E 206	2.675
Peso específico aparente	g/cm ³	MTC E 206	2.720

*Fuente: Elaboración propia, basada en MTC (2016)***Tabla 17***Resultados del análisis granulométrico Ag. Grueso (Piedra Chancada)*

Muestra : Piedra Chancada		Cantera : La Pluma			
P. húm. (g) : 2370.5		P. Seco (g) : 2358.14			
Tamiz ASTM	Retenido	Retenido	Ret. Acum.	Pasa	
(in)	(g)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	25.40	0.00	0.00	0.00	100.00
0.75	19.05	0.00	0.00	0.00	100.00
0.5	12.70	534.28	22.66	22.66	77.34
0.375	9.53	625.99	26.55	49.20	50.80
0.25	6.35	668.83	28.36	77.57	22.43
N°4	4.76	269.92	11.45	89.01	10.99
N°8	2.38	249.22	10.57	99.58	0.42
N°10	2.00	5.21	0.22	99.80	0.20
Fondo	---	4.69	0.20	100.00	0.00

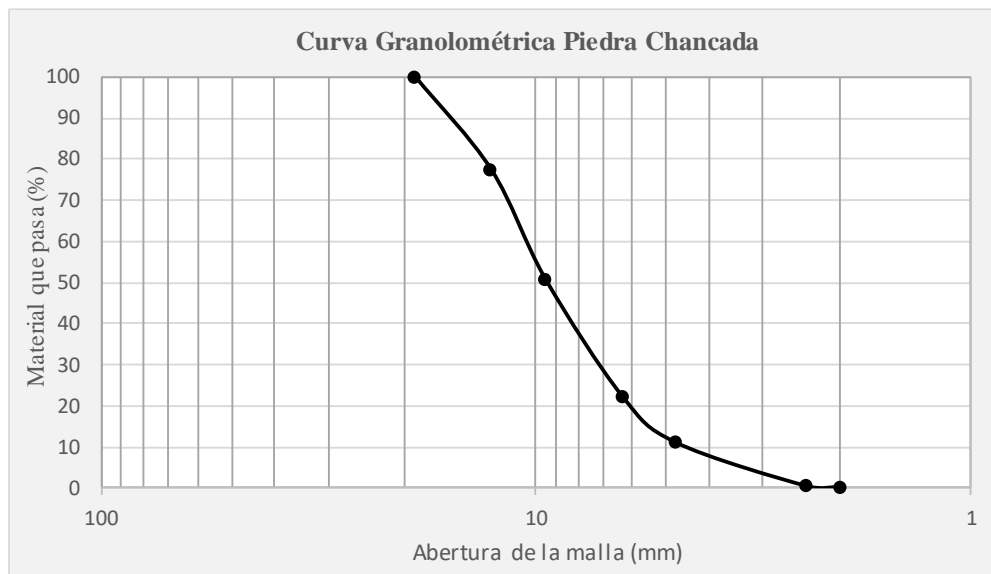
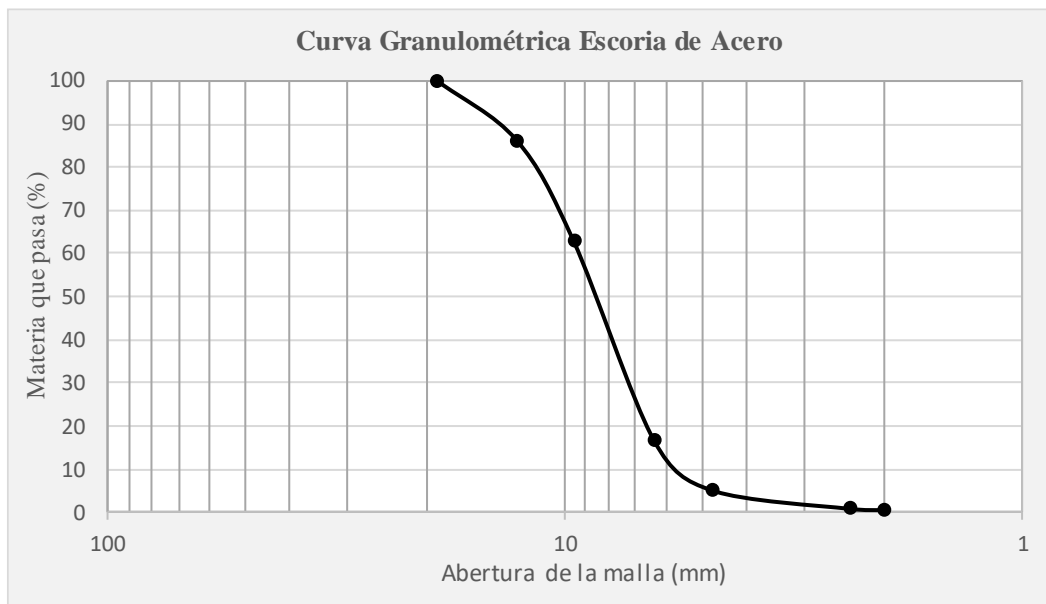
Fuente: Elaboración propia**Figura 19.** Curva granulométrica Ag. Grueso (Piedra Chancada).*Fuente: Elaboración propia*

Tabla 18*Resultados de pruebas fundamentales Ag. Grueso (Escoria de Acero)*

Parámetro	Und	Referencia	Resultado
<i>Peso Unit. Suelto humedo</i>	<i>g/cm³</i>	<i>MTC E 203</i>	<i>1.293</i>
<i>Peso Unit. Suelto Seco</i>	<i>g/cm³</i>	<i>MTC E 203</i>	<i>1.292</i>
<i>Peso Unit. Compacto humedo</i>	<i>g/cm³</i>	<i>MTC E 203</i>	<i>1.429</i>
<i>Peso Unit. Compacto seco</i>	<i>g/cm³</i>	<i>MTC E 203</i>	<i>1.427</i>
<i>Contenido de humedad natural</i>	<i>%</i>	<i>MTC E 108</i>	<i>0.110</i>
<i>Peso específico</i>	<i>g/cm³</i>	<i>MTC E 206</i>	<i>2.561</i>
<i>Peso específico S. S. S.</i>	<i>g/cm³</i>	<i>MTC E 206</i>	<i>2.622</i>
<i>Peso específico aparente</i>	<i>g/cm³</i>	<i>MTC E 206</i>	<i>2.728</i>

*Fuente: Elaboración propia, basada en MTC (2016)***Tabla 19***Resultados del análisis granulométrico Ag. Grueso (Escoria de Acero)*

Muestra : Escoria de Acero		Cantera : Siderperú			
P. húm. (g) : 2462.4		P. Seco (g) : 2462.40			
Tamiz ASTM	Retenido	Retenido	Ret. Acum.	Pasa	
(in)	(mm)	(g)	(%)	(%)	(%)
1	25.40	0.00	0.00	0.00	100.00
0.75	19.05	0.00	0.00	0.00	100.00
0.5	12.70	341.87	13.88	13.88	86.12
0.375	9.53	572.08	23.23	37.12	62.88
0.25	6.35	1136.5	46.15	83.27	16.73
N°4	4.76	282.39	11.47	94.74	5.26
N°8	2.38	105.67	4.29	99.03	0.97
N°10	2.00	8.03	0.33	99.35	0.65
Fondo	---	15.90	0.65	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia**Figura 20.** Curva granulométrica Ag. Grueso (Escoria de Acero)*Fuente: Elaboración propia*

3.1.2 Combinación Óptima de agregados

Tabla 20

Resultados del análisis gran. de la comb. teórica de agregados con 0% de Escoria

Tamiz	in	mm	Arena 55 %		P. Ch. 45 %		M.Total (%)	MAC-2	
			Pasa (%)	Mezcla(%)	Pasa (%)	Mezcla(%)		Mín.	Máx.
1	25.40	100.00	55.00	100.00	45.00	100.0	---	---	
3/4	19.05	100.00	55.00	100.00	45.00	100.0	100	100	
1/2	12.70	100.00	55.00	77.34	34.80	89.8	80	100	
3/8	9.53	100.00	55.00	50.80	22.86	77.9	70	88	
1/4	6.35	100.00	55.00	22.43	10.10	65.1	---	---	
N°4	4.76	100.00	55.00	10.99	4.94	59.9	51	68	
N°8	2.38	84.96	46.73	0.42	0.19	46.9	---	---	
N°10	2.00	80.54	44.30	0.20	0.09	44.4	38	52	
N°16	1.19	61.40	33.77		0.00	33.8	---	---	
N°30	0.59	41.64	22.90		0.00	22.9	---	---	
N°40	0.42	33.55	18.45		0.00	18.5	17	28	
N°50	0.30	22.55	12.40		0.00	12.4	---	---	
N°80	0.18	14.56	8.01		0.00	8.0	8	17	
N°100	0.15	12.56	6.91		0.00	6.9	---	---	
N°200	0.07	7.18	3.95		0.00	3.95	4	8	

Fuente: Elaboración propia

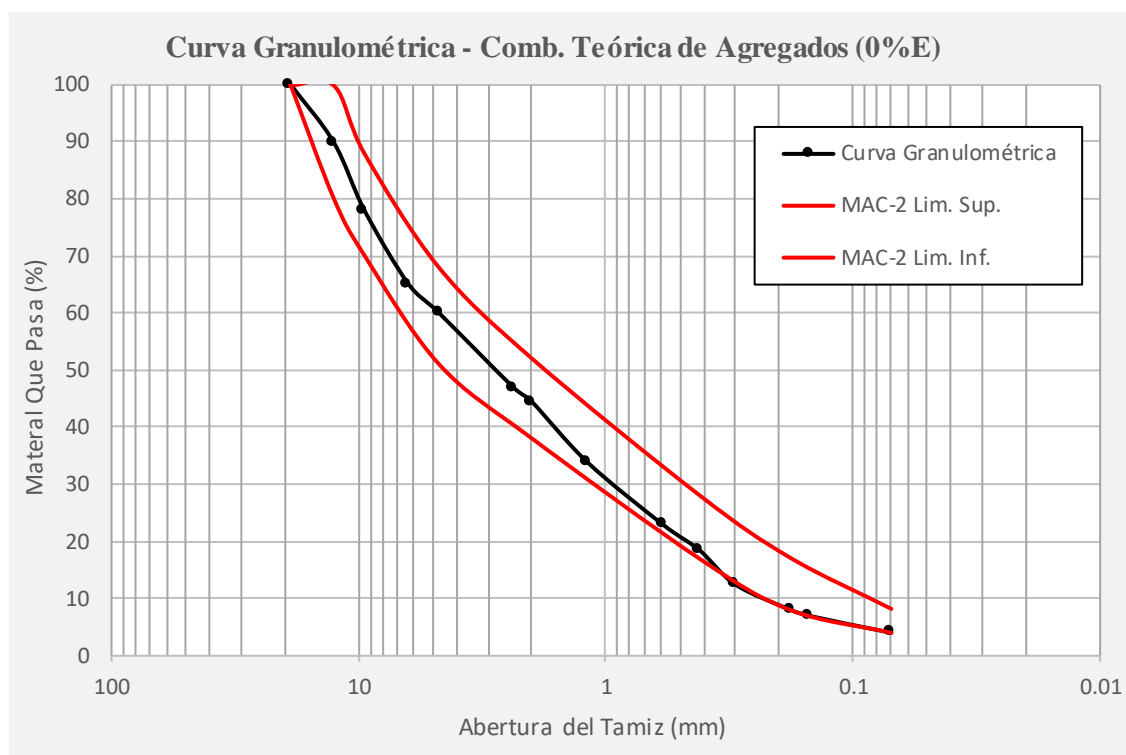


Figura 21. Curva granulométrica de la comb. teórica de agregados con 0% de Escoria

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21

Resultados del análisis gran. de la comb. física de agregados con 0% de Escoria

Tamiz (ASTM)		Retenido	% Peso	% Ret.	% Que Pasa	MAC-2	
in	mm	(g)	Retenido	Acum.		Mín.	Máx.
1	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00	---	---
3/4	19.05	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
1/2	12.7	262.82	9.14	9.14	90.86	80	100
3/8	9.53	368.05	12.81	21.95	78.05	70	88
1/4	6.35	470.51	16.37	38.32	61.68	---	---
N°4	4.76	200.97	6.99	45.32	54.68	51	68
N°8	2.38	187.49	6.52	51.84	48.16	---	---
N°10	2	57.24	1.99	53.83	46.17	38	52
N°16	1.19	273.92	9.53	63.36	36.64	---	---
N°20	0.84	223.84	7.79	71.15	28.85	---	---
N°30	0.59	139.38	4.85	76.00	24.00	---	---
N°40	0.42	143.70	5.00	81.00	19.00	17	28
N°50	0.3	158.07	5.50	86.50	13.50	---	---
N°80	0.18	157.78	5.49	91.99	8.01	8	17
N°100	0.15	31.64	1.10	93.09	6.91	---	---
N°200	0.07	85.04	2.96	96.05	3.95	4	8
< 200	---	113.52	3.95	100.00	0.00	---	---

Fuente: Elaboración propia

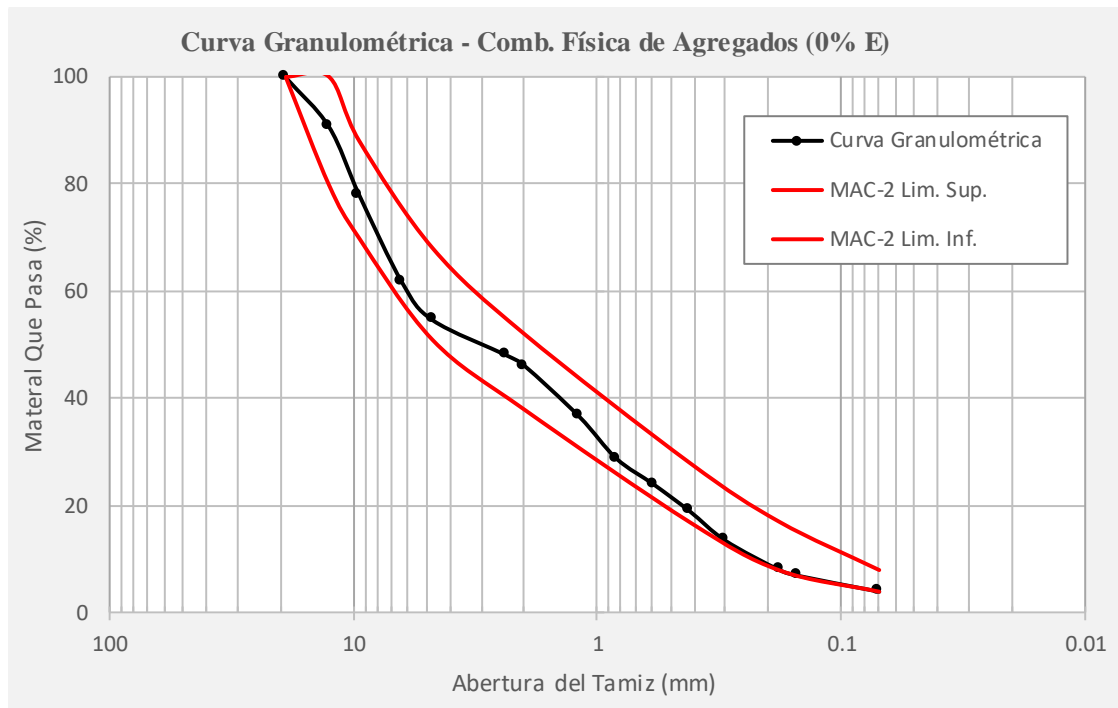


Figura 22. Curva granulométrica de la comb. física de agregados con 0% de Escoria

Fuente: Elaboración propia

Al notar que los resultados del análisis granulométrico de la combinación teórica arrojan resultados muy similares a los de la combinación física de agregados, para los porcentajes restantes de sustitución, sólo se optó por realizar la combinación teórica de los mismos, lo cual sirve para asegurarnos que en todos los porcentajes de dicha sustitución la gradación esté dentro de los límites del huso granulométrico MAC-2, cuyos resultados se muestran en las tablas y gráficas siguientes:

Tabla 22

Resultados del análisis gran. de la comb. teórica de agregados con 25% de Escoria

Tamiz in	mm	Arena 55 %		P. Ch. 34 %		Escoria 11 %		M.Total (%)	MAC-2	
		P.(%)	M. (%)	P.(%)	M. (%)	Pas.(%)	Mez.(%)		Mín.	Máx.
1	25.40	100.0	55.0	100.00	33.75	100.0	11.25	100.0	---	---
3/4	19.05	100.0	55.0	100.00	33.75	100.0	11.25	100.0	100	100
1/2	12.70	100.0	55.0	77.34	26.10	86.1	9.69	90.8	80	100
3/8	9.53	100.0	55.0	50.80	17.14	62.9	7.07	79.2	70	88
1/4	6.35	100.0	55.0	22.43	7.57	16.7	1.88	64.5	---	---
N°4	4.76	100.0	55.0	10.99	3.71	5.3	0.59	59.3	51	68
N°8	2.38	84.96	46.73	0.42	0.14	1.0	0.11	47.0	---	---
N°10	2.00	80.54	44.30	0.20	0.07	0.6	0.07	44.4	38	52
N°16	1.19	61.40	33.77	0.00				33.8	---	---
N°30	0.59	41.64	22.90	0.00				22.9	---	---
N°40	0.42	33.55	18.45	0.00				18.5	17	28
N°50	0.30	22.55	12.40	0.00				12.4	---	---
N°80	0.18	14.56	8.01	0.00				8.0	8	17
N°100	0.15	12.56	6.91	0.00				6.9	---	---
N°200	0.07	7.18	3.95	0.00				4.0	4	8

Fuente: Elaboración propia

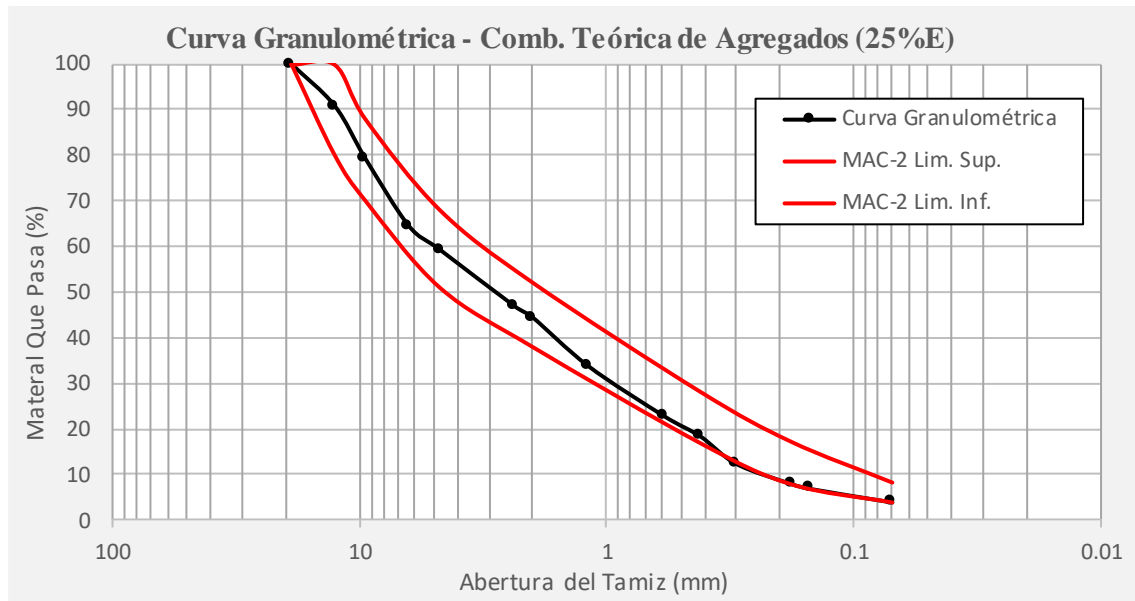


Figura 23. Curva granulométrica de la comb. física de agregados con 25% de Escoria

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23

Resultados del análisis gran. de la comb. teórica de agregados con 50% de Escoria

Tamiz in	mm	Arena 55 %		P. Ch. 23 %		Escoria 23 %		M. Total (%)	MAC-2	
		P.(%)	M. (%)	P.(%)	M. (%)	Pas.(%)	Mez.(%)		Mín.	Máx.
1	25.40	100.0	55.0	100.00	22.50	100.0	22.50	100.0	---	---
1	19.05	100.0	55.0	100.00	22.50	100.0	22.50	100.0	100	100
1	12.70	100.0	55.0	77.34	17.40	86.1	19.38	91.8	80	100
0	9.53	100.0	55.0	50.80	11.43	62.9	14.15	80.6	70	88
0	6.35	100.0	55.0	22.43	5.05	16.7	3.76	63.8	---	---
N°4	4.76	100.0	55.0	10.99	2.47	5.3	1.18	58.7	51	68
N°8	2.38	84.96	46.73	0.42	0.09	1.0	0.22	47.0	---	---
N°10	2.00	80.54	44.30	0.20	0.04	0.6	0.15	44.5	38	52
N°16	1.19	61.40	33.77					33.8	---	---
N°30	0.59	41.64	22.90					22.9	---	---
N°40	0.42	33.55	18.45					18.5	17	28
N°50	0.30	22.55	12.40					12.4	---	---
N°80	0.18	14.56	8.01					8.0	8	17
N°100	0.15	12.56	6.91					6.9	---	---
N°200	0.07	7.18	3.95					4.0	4	8

Fuente: Elaboración propia

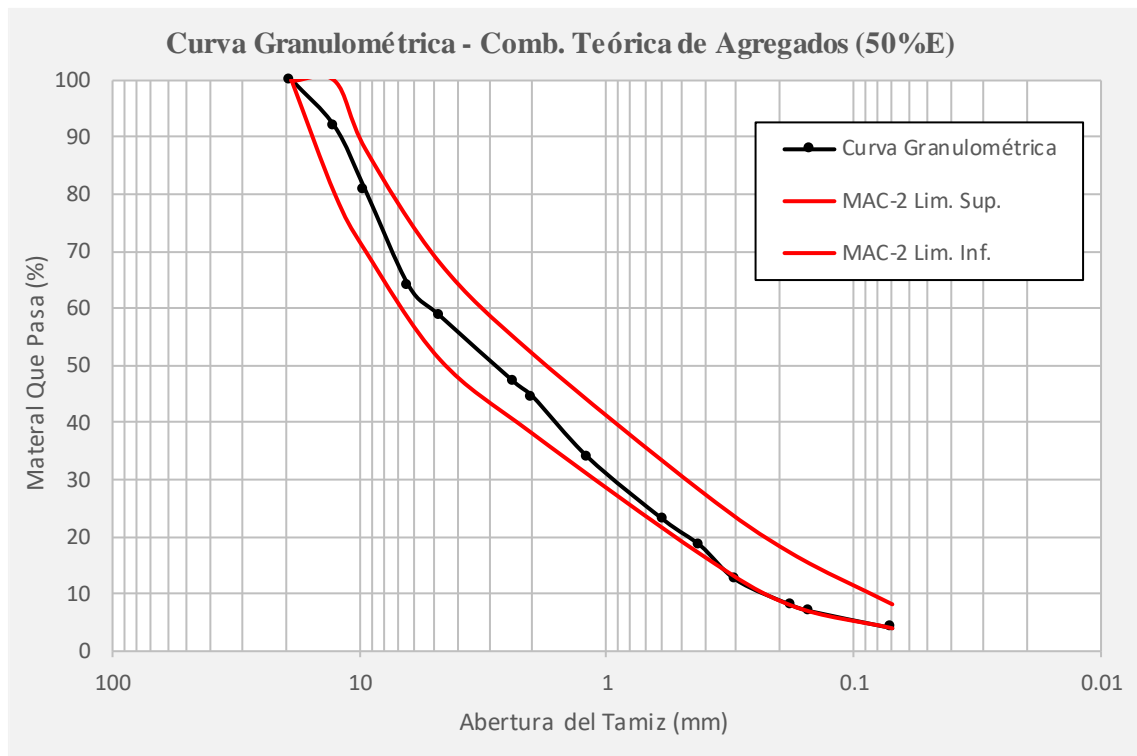


Figura 24. Curva granulométrica de la comb. física de agregados con 50% de Escoria

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24

Resultados del análisis gran. de la comb. teórica de agregados con 75% de Escoria

Tamiz in	mm	Arena 55 %		P. Ch. 11 %		Escoria 34 %		M. Total (%)	MAC-2	
		P.(%)	M. (%)	P.(%)	M. (%)	Pas.(%)	Mez.(%)		Mín.	Máx.
1	25.40	100.0	55.0	100.00	11.25	100.0	33.75	100.0	---	---
1	19.05	100.0	55.0	100.00	11.25	100.0	33.75	100.0	100	100
1	12.70	100.0	55.0	77.34	8.70	86.1	29.06	92.8	80	100
0	9.53	100.0	55.0	50.80	5.71	62.9	21.22	81.9	70	88
0	6.35	100.0	55.0	22.43	2.52	16.7	5.65	63.2	---	---
N°4	4.76	100.0	55.0	10.99	1.24	5.3	1.78	58.0	51	68
N°8	2.38	84.96	46.73	0.42	0.05	1.0	0.33	47.1	---	---
N°10	2.00	80.54	44.30	0.20	0.02	0.6	0.22	44.5	38	52
N°16	1.19	61.40	33.77					33.8	---	---
N°30	0.59	41.64	22.90					22.9	---	---
N°40	0.42	33.55	18.45					18.5	17	28
N°50	0.30	22.55	12.40					12.4	---	---
N°80	0.18	14.56	8.01					8.0	8	17
N°100	0.15	12.56	6.91					6.9	---	---
N°200	0.07	7.18	3.95					4.0	4	8

Fuente: Elaboración propia

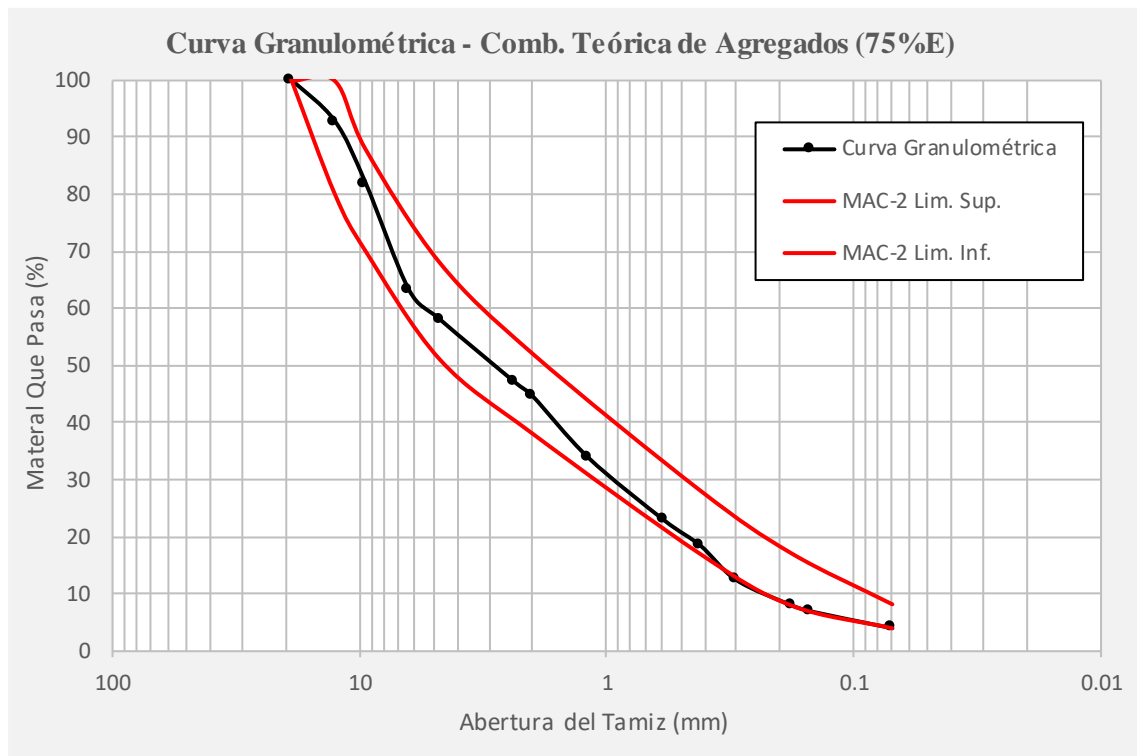


Figura 25. Curva granulométrica de la comb. física de agregados con 75% de Escoria

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25

Resultados del análisis gran. de la comb. teórica de agregados con 100% de Escoria

Tamiz	in	mm	Arena 55 %		Escoria A. 45 %		M. Total (%)	MAC-2	
			Pasa(%)	Mez.(%)	Pasa(%)	Mez.(%)		Mín.	Máx.
1	25.40		100.00	55.00	100.00	45.00	100.0	---	---
1	19.05		100.00	55.00	100.00	45.00	100.0	100	100
1	12.70		100.00	55.00	86.12	38.75	93.8	80	100
0	9.53		100.00	55.00	62.88	28.30	83.3	70	88
0	6.35		100.00	55.00	16.73	7.53	62.5	---	---
N°4	4.76		100.00	55.00	5.26	2.37	57.4	51	68
N°8	2.38		84.96	46.73	0.97	0.44	47.2	---	---
N°10	2.00		80.54	44.30	0.65	0.29	44.6	38	52
N°16	1.19		61.40	33.77		0.00	33.8	---	---
N°30	0.59		41.64	22.90		0.00	22.9	---	---
N°40	0.42		33.55	18.45		0.00	18.5	17	28
N°50	0.30		22.55	12.40		0.00	12.4	---	---
N°80	0.18		14.56	8.01		0.00	8.0	8	17
N°100	0.15		12.56	6.91		0.00	6.9	---	---
N°200	0.07		7.18	3.95		0.00	4.0	4	8

Fuente: Elaboración propia

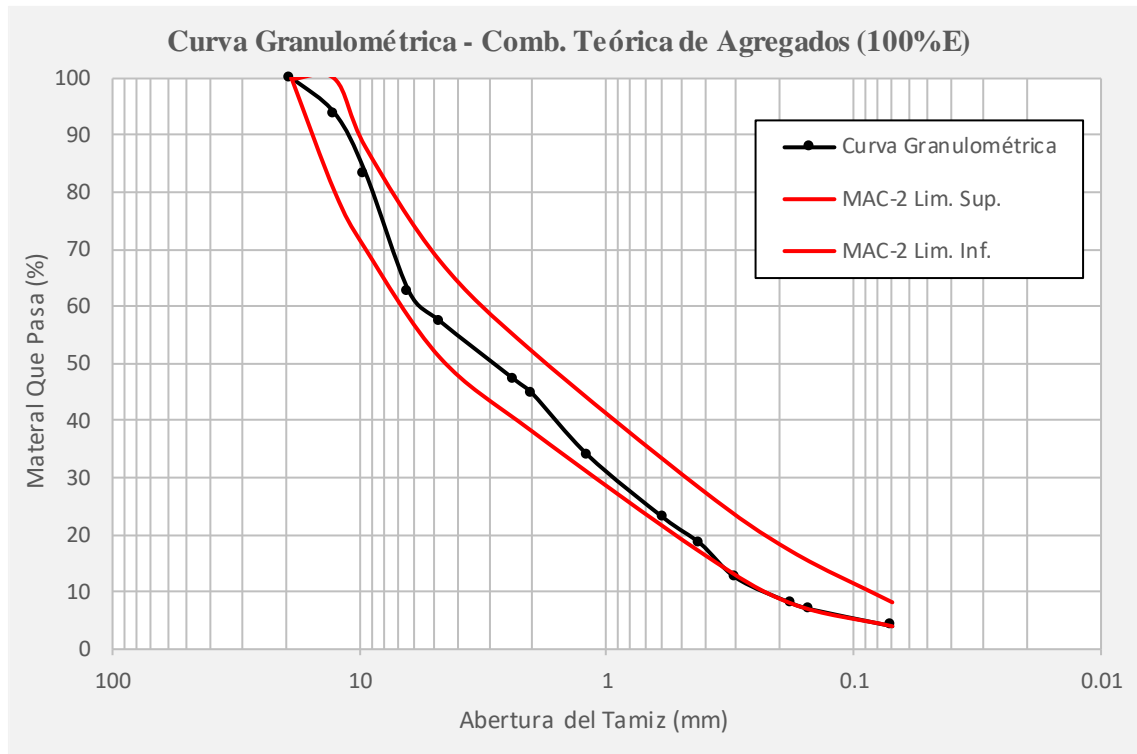


Figura 26. Curva granulométrica de la comb. física de agregados con 100% de Escoria

Fuente: Elaboración propia

3.1.3 Diseño de la MAC

La cantidad de materiales para cada tipo de mezcla se calcularon en base a un peso promedio del espécimen (briqueta) de aproximadamente 1200 g y una gradación MAC-2.

Tabla 26

Resumen de resultados del diseño de mezcla

<i>Descripción</i>	<i>Und</i>	<i>Cantidad</i>					<i>% Escoria</i>
<i>Asfalto (PEN 60-70)</i>	<i>%</i>	<i>4.5</i>	<i>5.0</i>	<i>5.5</i>	<i>6.0</i>	<i>6.5</i>	
<i>P. prom. de briqueta</i>	<i>g</i>	<i>1200.0</i>	<i>1200.0</i>	<i>1200.0</i>	<i>1200.0</i>	<i>1200.0</i>	<i>Todos</i>
<i>P. Asfalto</i>	<i>g</i>	<i>54.0</i>	<i>60.0</i>	<i>66.0</i>	<i>72.0</i>	<i>78.0</i>	
<i>P. Arena</i>	<i>g</i>	<i>630.3</i>	<i>627.0</i>	<i>623.7</i>	<i>620.4</i>	<i>617.1</i>	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27

Resumen de resultados del diseño de mezcla (continuación)

<i>Descripción</i>	<i>Und</i>	<i>Cantidad</i>					<i>% Escoria</i>
<i>Asfalto (PEN 60-70)</i>	<i>%</i>	<i>4.5</i>	<i>5.0</i>	<i>5.5</i>	<i>6.0</i>	<i>6.5</i>	
<i>P. Escoria de Acero</i>	<i>g</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0</i>
<i>P. Piedra Chancada</i>	<i>g</i>	<i>515.7</i>	<i>513.0</i>	<i>510.3</i>	<i>507.6</i>	<i>504.9</i>	
<i>P. Escoria de Acero</i>	<i>g</i>	<i>128.9</i>	<i>128.3</i>	<i>127.6</i>	<i>126.9</i>	<i>126.2</i>	<i>25</i>
<i>P. Piedra Chancada</i>	<i>g</i>	<i>386.8</i>	<i>384.8</i>	<i>382.7</i>	<i>380.7</i>	<i>378.7</i>	
<i>P. Escoria de Acero</i>	<i>g</i>	<i>257.9</i>	<i>256.5</i>	<i>255.2</i>	<i>253.8</i>	<i>252.5</i>	<i>50</i>
<i>P. Piedra Chancada</i>	<i>g</i>	<i>257.9</i>	<i>256.5</i>	<i>255.2</i>	<i>253.8</i>	<i>252.5</i>	
<i>P. Escoria de Acero</i>	<i>g</i>	<i>386.8</i>	<i>384.8</i>	<i>382.7</i>	<i>380.7</i>	<i>378.7</i>	<i>75</i>
<i>P. Piedra Chancada</i>	<i>g</i>	<i>128.9</i>	<i>128.3</i>	<i>127.6</i>	<i>126.9</i>	<i>126.2</i>	
<i>P. Escoria de Acero</i>	<i>g</i>	<i>515.7</i>	<i>513.0</i>	<i>510.3</i>	<i>507.6</i>	<i>504.9</i>	<i>100</i>
<i>P. Piedra Chancada</i>	<i>g</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	

Fuente: Elaboración propia

3.1.4 Propiedades físico-mecánicas preliminares

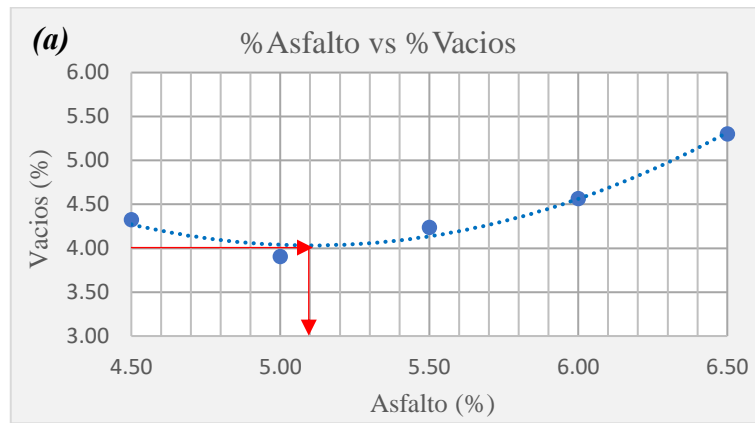
3.1.4.1 Resultados para una sustitución con 0% de Escoria de Acero

Tabla 28

Propiedades físico-mecánicas, sustitución con 0% de Escoria (MAC Convencional)

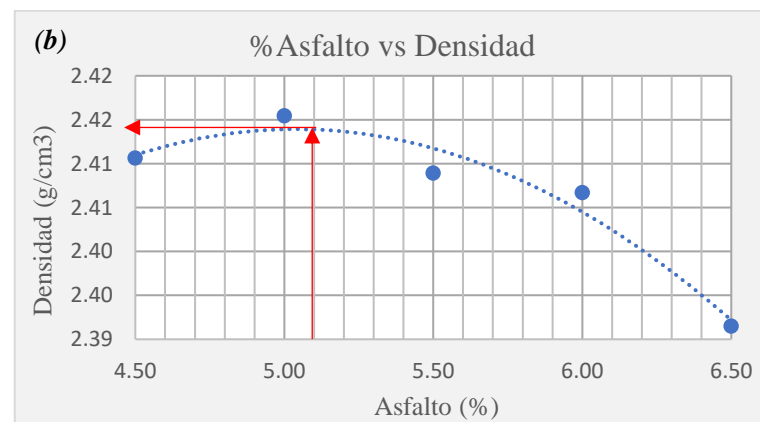
Descripción	Intentos					Especificación
% Cemento Asfáltico (Pb):	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	N/A
Densidad, g/cm ³ :	2.41	2.42	2.41	2.41	2.39	N/A
Estabilidad Corregida, kN (Sc):	19.61	21.13	20.46	20.27	19.23	> 5.44
Flujo en 1/100 in:	9.20	12.00	12.80	12.80	12.40	8 – 16
Porcentaje de Vacíos (Pa):	4.32	3.90	4.23	4.56	5.30	3 – 5
Vacíos en el Ag. Mineral (VMA):	12.32	12.60	13.30	13.84	14.84	12 – 14
Vacíos Llenos con Asfalto (VFA):	65.07	69.04	68.18	67.02	64.31	65 – 78

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

De la **Figura 27a** se puede observar el porcentaje de asfalto que corresponde a un porcentaje de vacíos de 4%, el cual será elegido como el porcentaje óptimo, es 5.10%, con el cual se determina las propiedades físico-mecánicas restantes.



Fuente: Elaboración propia

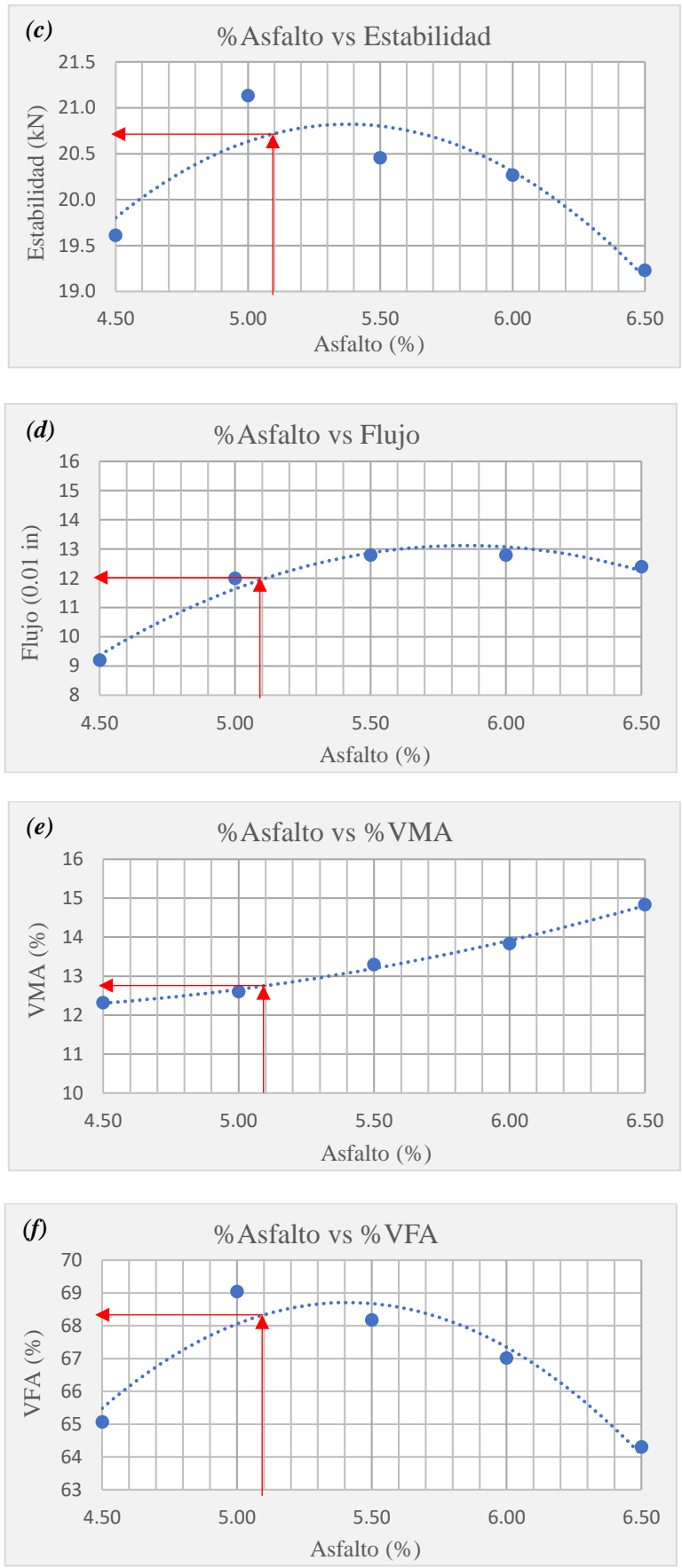


Figura 27. Propiedades físico-mecánicas para una sustitución con 0% de Escoria
Fuente: Elaboración propia

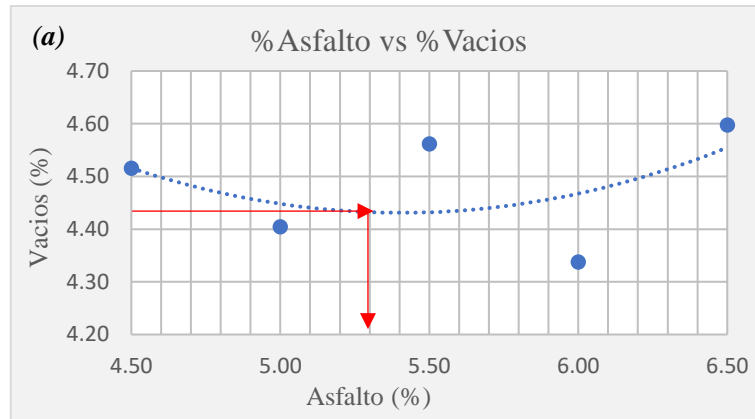
3.1.4.2 Resultados para una sustitución con 25% de Escoria de Acero

Tabla 29

Propiedades físico-mecánicas para una sustitución con 25% de Escoria

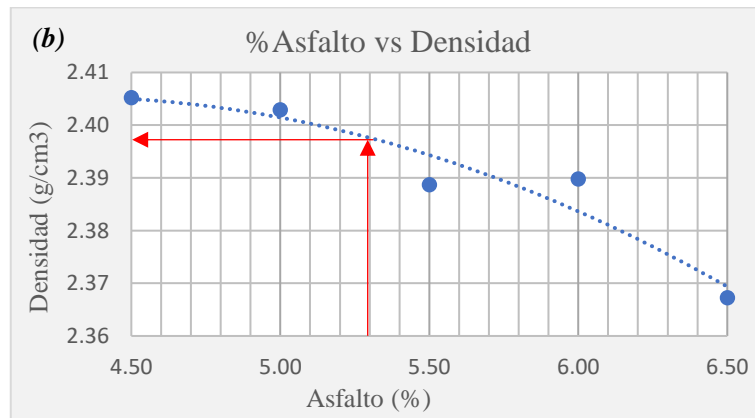
Descripción	Intentos					Especificación
% Cemento Asfáltico (Pb):	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	N/A
Densidad, g/cm ³ :	2.41	2.40	2.39	2.39	2.37	N/A
Estabilidad Corregida, kN (Sc):	22.02	21.88	22.13	21.51	20.72	> 5.44
Flujo en 1/100 in:	10.20	11.20	12.60	12.20	12.00	8 – 16
Porcentaje de Vacíos (Pa):	4.52	4.40	4.56	4.34	4.60	3 – 5
Vacíos en el Ag. Mineral (VMA):	12.18	12.73	13.70	14.12	15.38	12 – 14
Vacíos Llenos con Asfalto (VFA):	63.00	65.41	66.70	69.27	70.11	65 – 78

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

De la **Figura 28a** se puede observar el porcentaje de asfalto que corresponde a un porcentaje de vacíos mínimo, el cual será elegido como el porcentaje óptimo, es 5.30%, con el cual se determina las propiedades físico-mecánicas restantes. Cabe resaltar que no se determina con el porcentaje de vacíos ideal (4%) debido a que resultan mayores.



Fuente: Elaboración propia

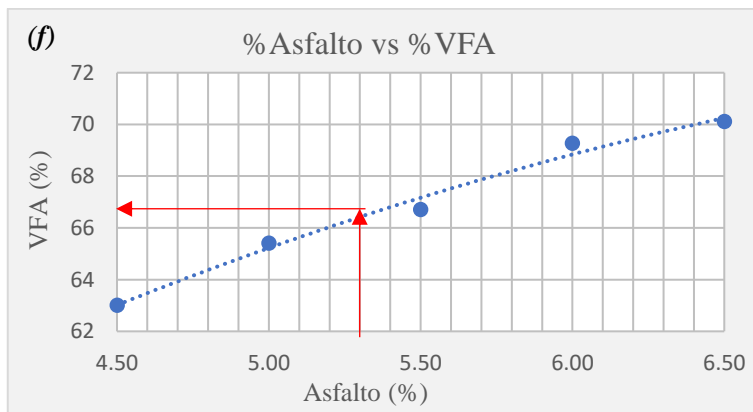
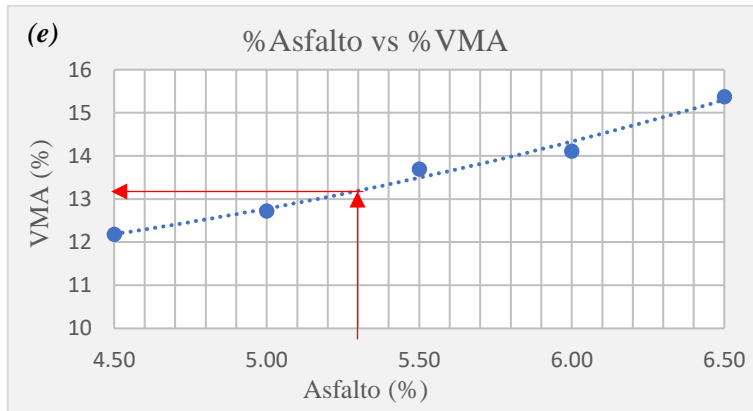
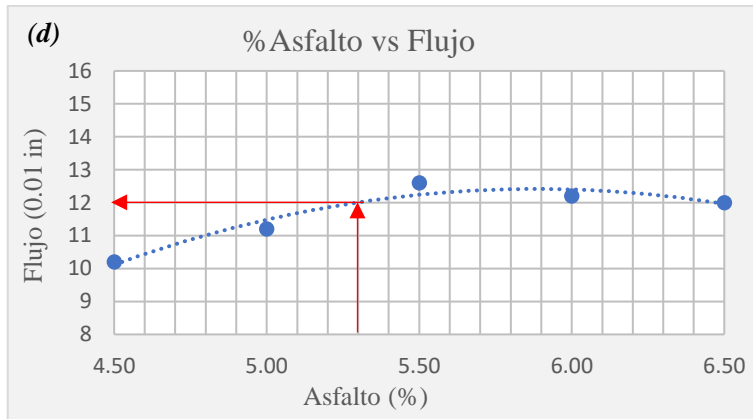
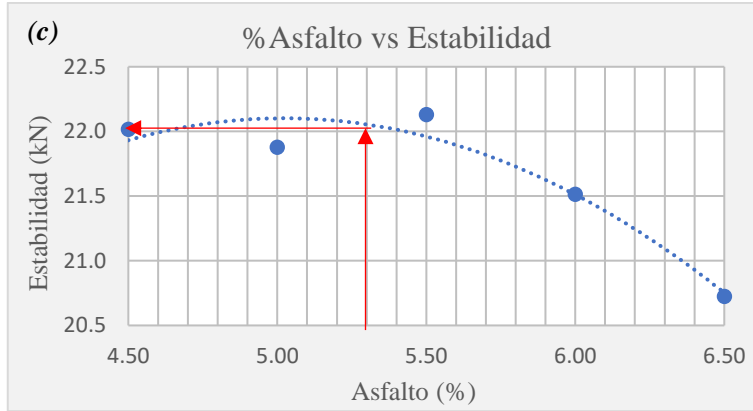


Figura 28. Propiedades físico-mecánicas para una sustitución con 25% de Escoria
 Fuente: Elaboración propia

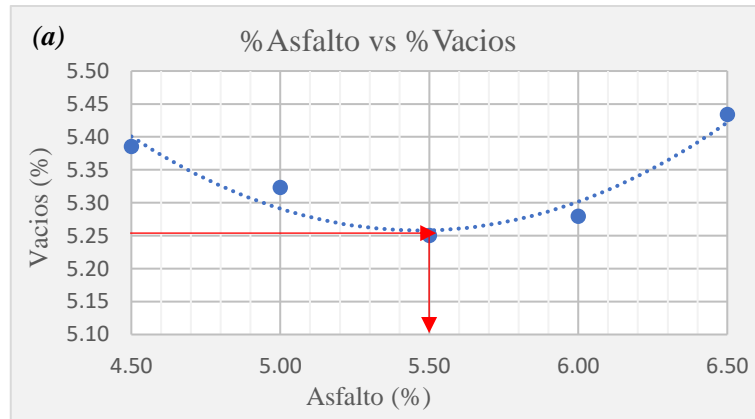
3.1.4.3 Resultados para una sustitución con 50% de Escoria de Acero

Tabla 30

Propiedades físico-mecánicas para una sustitución con 50% de Escoria

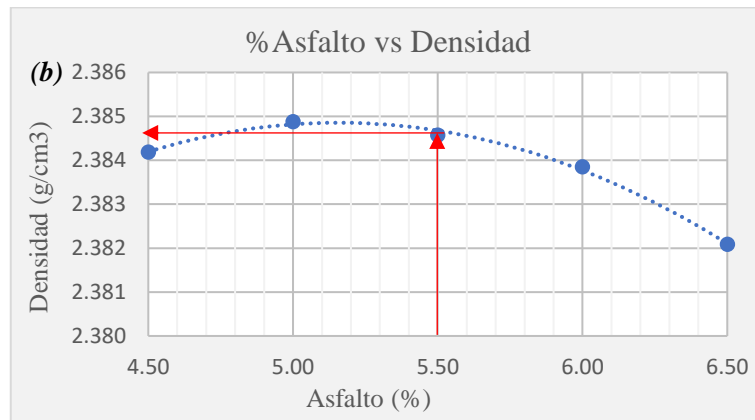
Descripción	Intentos					Especificación
% Cemento Asfáltico (Pb):	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	N/A
Densidad, g/cm ³ :	2.38	2.38	2.38	2.38	2.38	N/A
Estabilidad Corregida, kN (Sc):	19.58	20.47	21.45	21.17	20.68	> 5.44
Flujo en 1/100 in:	9.20	9.80	12.00	13.60	13.80	8 – 16
Porcentaje de Vacíos (Pa):	5.39	5.32	5.25	5.28	5.43	3 – 5
Vacíos en el Ag. Mineral (VMA):	12.62	13.05	13.52	14.00	14.52	12 – 14
Vacíos Llenos con Asfalto (VFA):	57.33	59.21	61.16	62.30	62.58	65 – 78

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

De la **Figura 29a** se puede observar el porcentaje de asfalto que corresponde a un porcentaje de vacíos mínimo, el cual será elegido como el porcentaje óptimo, es 5.50%, con el cual se determina las propiedades físico-mecánicas restantes. Cabe resaltar que no se determina con el porcentaje de vacíos ideal (4%) debido a que resultan porcentajes mayores.



Fuente: Elaboración propia

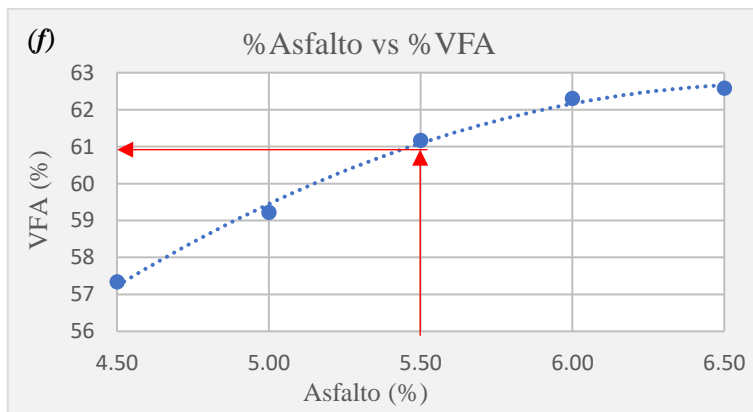
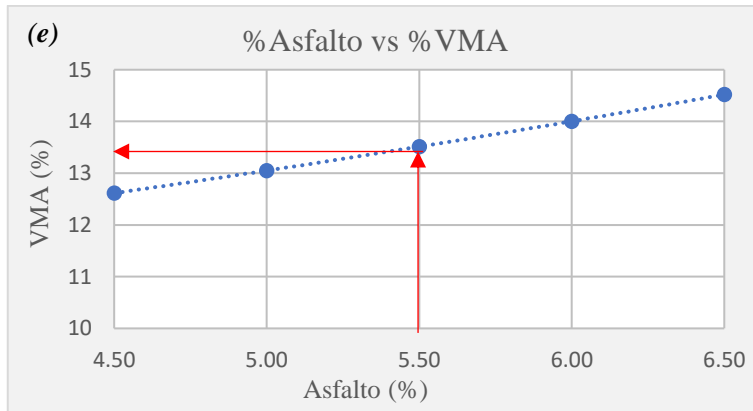
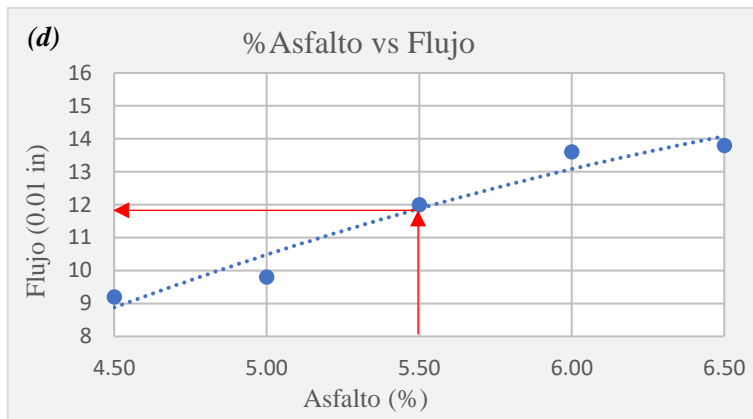
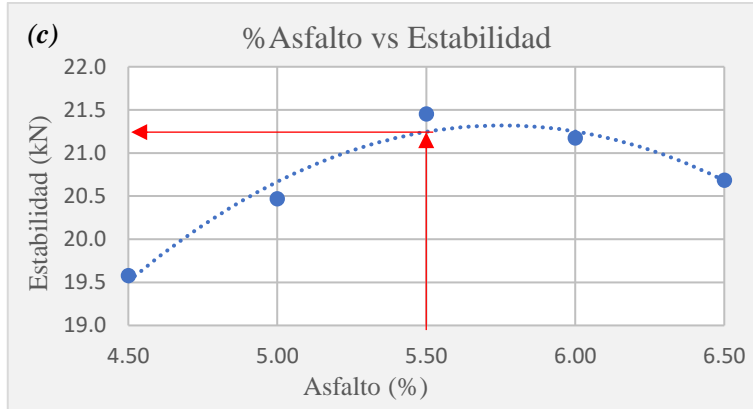


Figura 29. Propiedades físico-mecánicas para una sustitución con 50% de Escoria
 Fuente: Elaboración propia

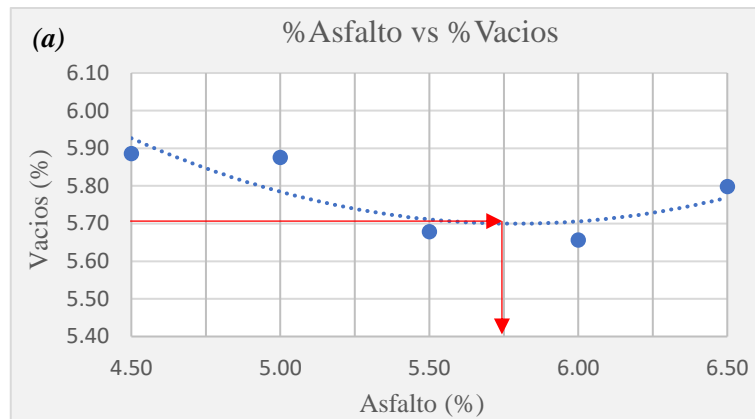
3.1.4.4 Resultados para una sustitución con 75% de Escoria de Acero

Tabla 31

Propiedades físico-mecánicas para una sustitución con 75% de Escoria

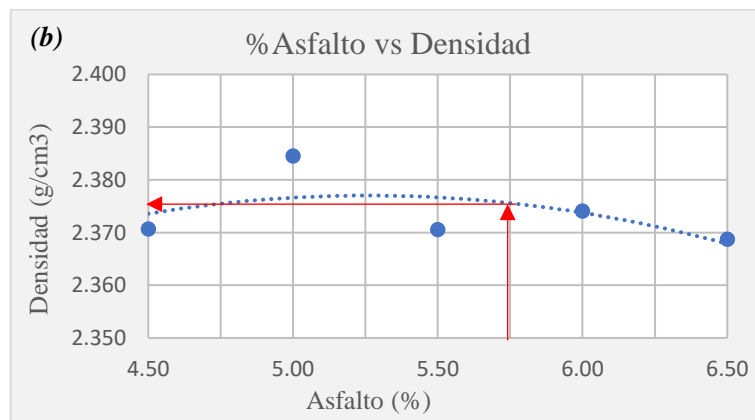
Descripción	Intentos					Especificación
% Cemento Asfáltico (Pb):	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	N/A
Densidad, g/cm ³ :	2.37	2.38	2.37	2.37	2.37	N/A
Estabilidad Corregida, kN (Sc):	18.28	19.27	20.05	19.91	20.01	> 5.44
Flujo en 1/100 in:	9.80	10.00	11.80	12.80	12.60	8 – 16
Porcentaje de Vacíos (Pa):	5.89	5.88	5.68	5.66	5.80	3 – 5
Vacíos en el Ag. Mineral (VMA):	12.78	12.73	13.70	14.03	14.68	12 – 14
Vacíos Llenos con Asfalto (VFA):	53.95	54.81	58.55	59.68	60.49	65 – 78

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

De la **Figura 30a** se puede observar el porcentaje de asfalto que corresponde a un porcentaje de vacíos mínimo, el cual será elegido como el porcentaje óptimo, es 5.75%, con el cual se determina las propiedades físico-mecánicas restantes. Cabe resaltar que no se determina con el porcentaje de vacíos ideal (4%) debido a que resultan mayores porcentajes.



Fuente: Elaboración propia

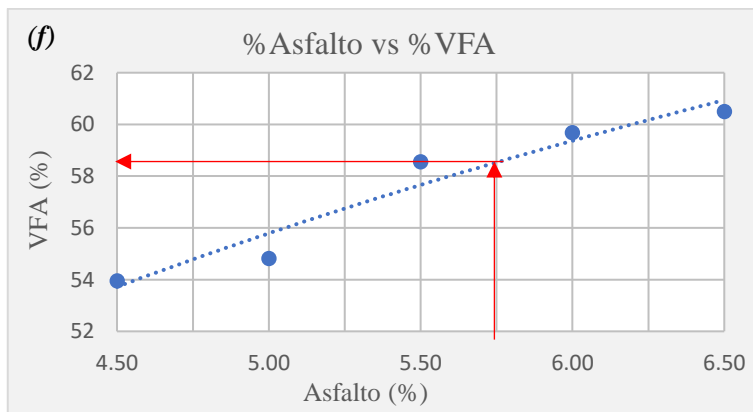
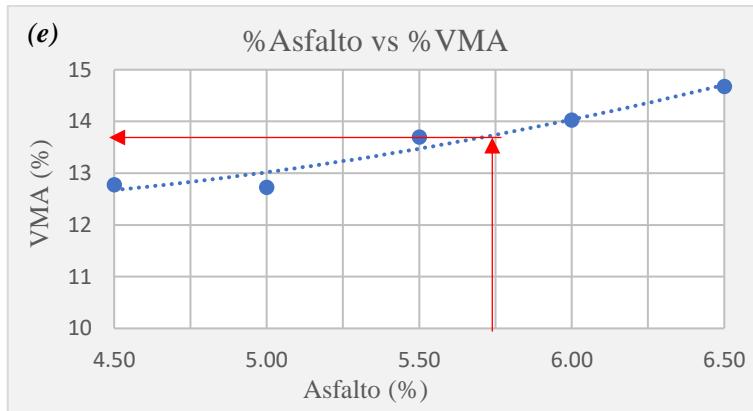
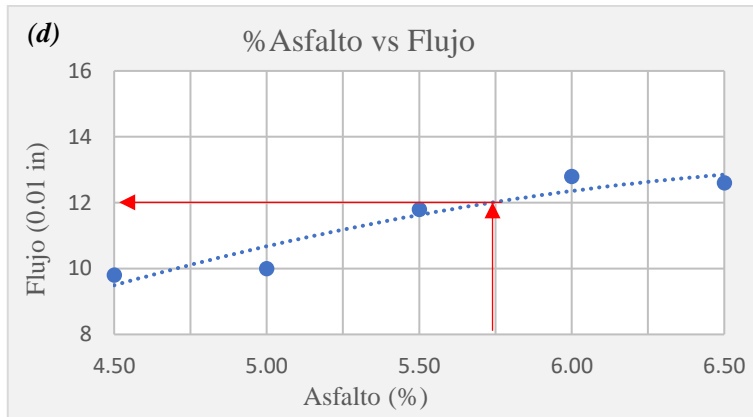
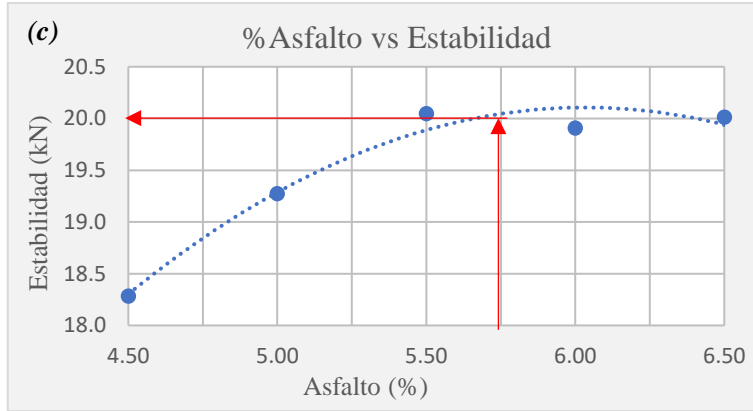


Figura 30. Propiedades físico-mecánicas para una sustitución con 75% de Escoria
 Fuente: Elaboración propia

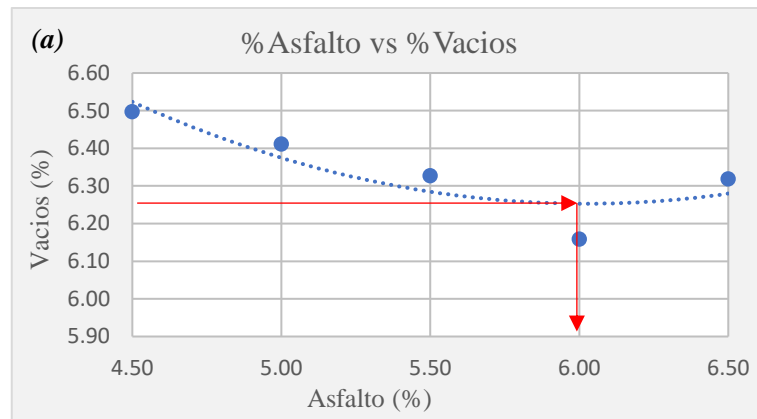
3.1.4.5 Resultados para una sustitución con 100% de Escoria de Acero

Tabla 32

Propiedades físico-mecánicas para una sustitución con 100% de Escoria

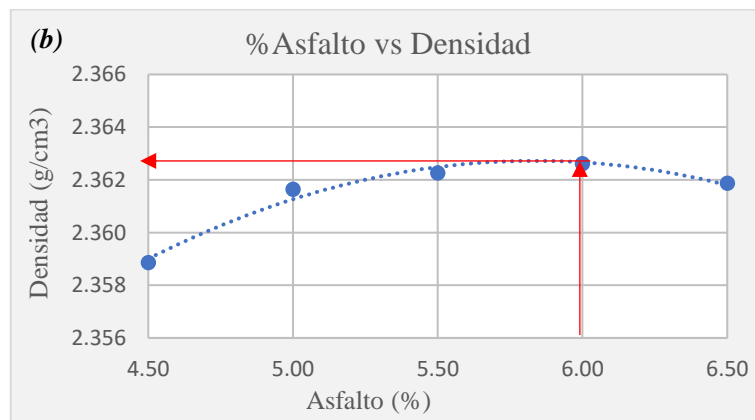
Descripción	Intentos					Especificación
% Cemento Asfáltico (Pb):	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	N/A
Densidad, g/cm ³ :	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	N/A
Estabilidad Corregida, kN (Sc):	17.57	17.17	18.70	18.77	18.21	> 5.44
Flujo en 1/100 in:	9.40	10.20	10.00	12.20	14.00	8 – 16
Porcentaje de Vacíos (Pa):	6.50	6.41	6.33	6.16	6.32	3 – 5
Vacíos en el Ag. Mineral (VMA):	12.88	13.24	13.67	14.12	14.60	12 – 14
Vacíos Llenos con Asfalto (VFA):	49.61	52.31	53.72	56.37	56.72	65 – 78

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

De la **Figura 31a** se puede observar el porcentaje de asfalto que corresponde a un porcentaje de vacíos mínimo, el cual será elegido como el porcentaje óptimo, es 6.00%, con el cual se determina las propiedades físico-mecánicas restantes. Cabe resaltar que no se determina con el porcentaje de vacíos ideal (4%) debido a que resultan porcentajes mayores.



Fuente: Elaboración propia

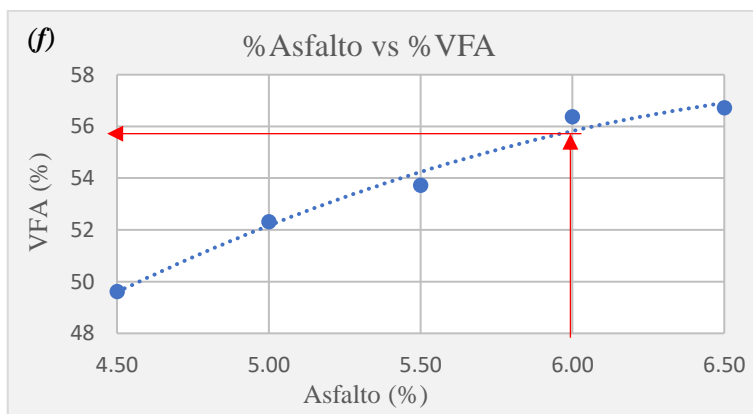
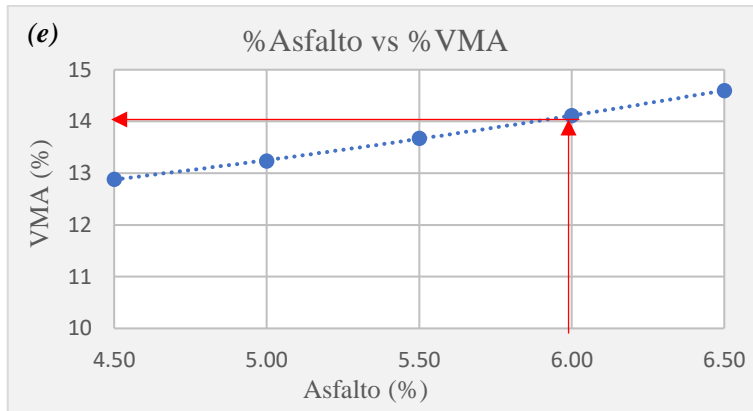
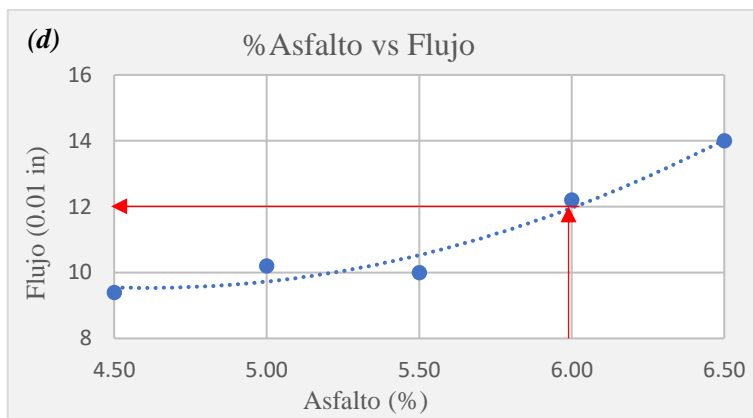
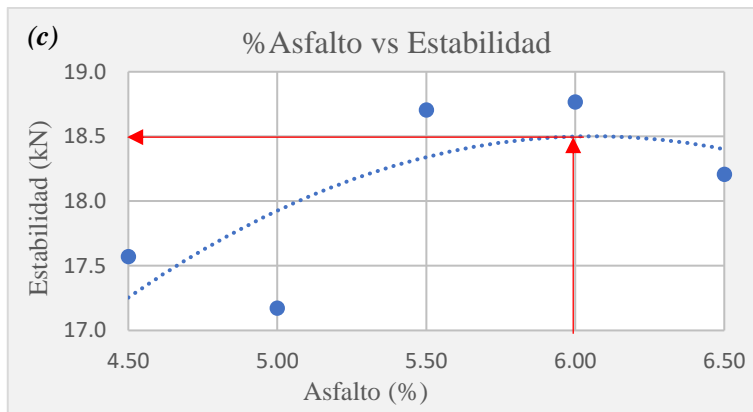


Figura 31. Propiedades físico-mecánicas para una sustitución con 100% de Escoria
Fuente: Elaboración propia

3.1.5 Porcentaje óptimo de asfalto

3.1.5.1 Porcentaje óptimo de asfalto

Tabla 33

Porcentaje óptimo de asfalto para cada porcentaje de agregado siderúrgico.

Descripción	Contenido Óptimo de Asfalto					Especificación
% Ag. Siderúrgico (Escoria):	0	25	50	75	100	N/A
% Cemento Asfáltico (Pb):	5.10	5.30	5.50	5.75	6.00	N/A

Fuente: Elaboración propia

3.1.5.2 Propiedades físico-mecánicas teóricas para el porcentaje óptimo de asfalto

Tabla 34

Propiedades físico-mecánicas teóricas para los cinco porcentajes de escoria sustituidos.

Descripción	Contenido Óptimo de Asfalto					Especificación
% Ag. Siderúrgico (Escoria):	0	25	50	75	100	N/A
% Cemento Asfáltico (Pb):	5.10	5.30	5.50	5.75	6.00	N/A
Densidad, g/cm ³ :	2.420	2.398	2.385	2.375	2.363	N/A
Estabilidad Corregida, kN (Sc):	20.75	22.10	21.25	20.00	18.50	> 5.44
Flujo en 1/100 in:	12.00	12.00	11.90	12.00	12.00	8 – 16
Porcentaje de Vacíos (Pa):	4.00	4.42	5.25	5.70	6.25	3 – 5
Vacíos en el Ag. Mineral (VMA):	12.85	13.15	13.50	13.80	14.00	12 – 14
Vacíos Llenos con Asfalto (VFA):	68.35	66.35	61.00	58.80	55.80	65 – 78

Fuente: Elaboración propia

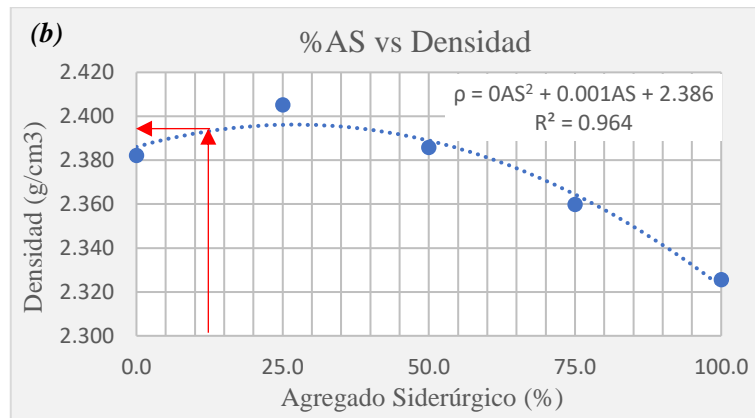
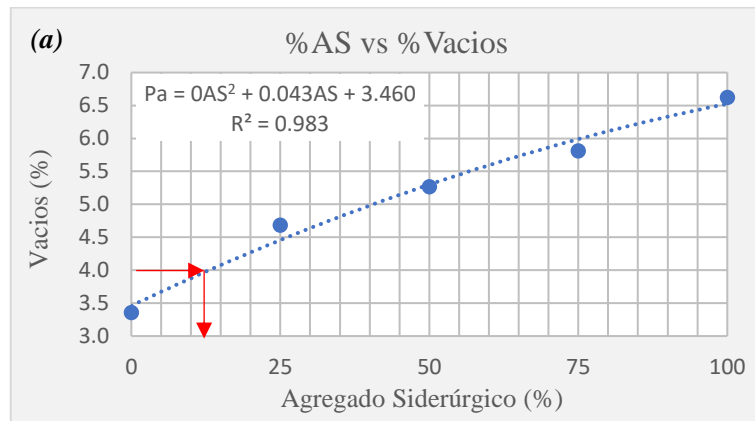
3.1.6 Propiedades físico-mecánicas optimizadas

Tabla 35

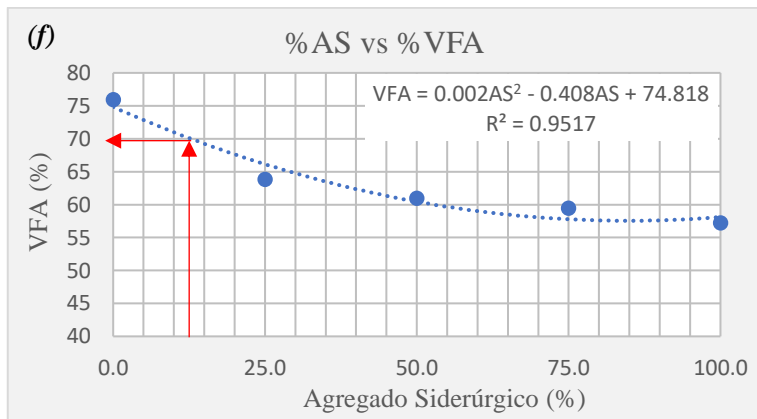
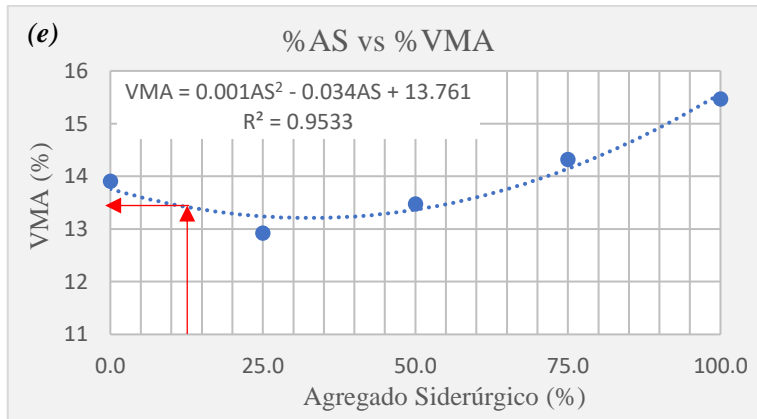
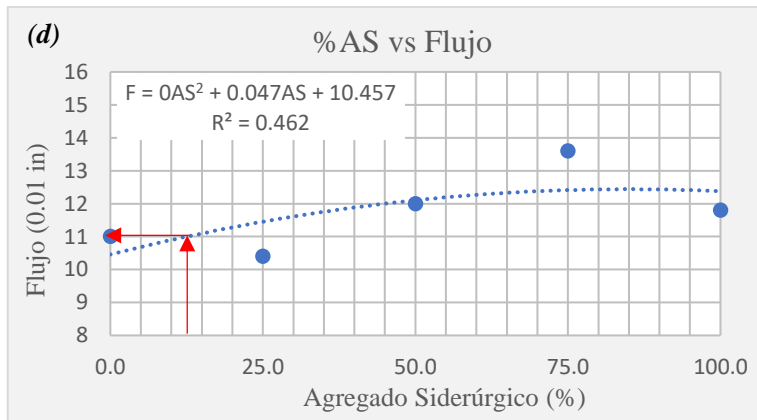
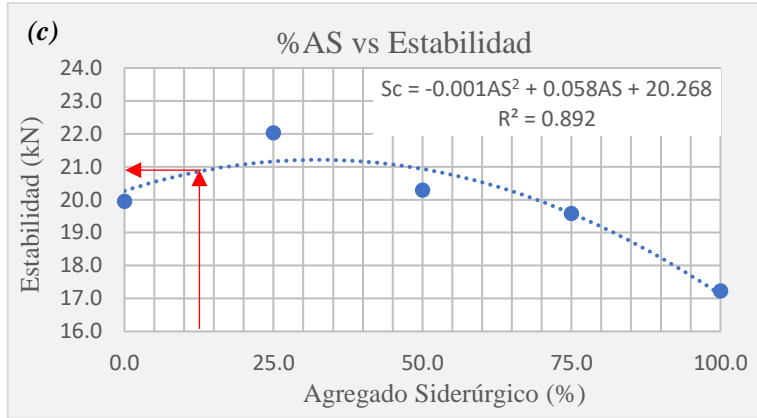
Propiedades físico-mecánicas reales para los cinco porcentajes de escoria sustituidos

Descripción	Contenido Óptimo de Asfalto					Especificación
% Ag. Siderúrgico (Escoria)	0	25	50	75	100	N/A
% Cemento Asfáltico (Pb):	5.1	5.3	5.5	5.8	6.0	N/A
Densidad, g/cm ³ :	2.382	2.405	2.386	2.360	2.325	N/A
Estabilidad Corregida, kN (Sc):	19.9	22.0	20.3	19.6	17.2	> 5.44
Flujo en 1/100 in:	11.0	10.4	12.0	13.6	11.8	8 – 16
Porcentaje de Vacíos (Pa):	3.4	4.7	5.3	5.8	6.6	3 – 5
Vacíos en el Ag. Mineral (VMA):	13.9	12.9	13.5	14.3	15.5	12 – 14
Vacíos Llenos con Asfalto (VFA):	75.9	63.8	61.0	59.4	57.2	65 – 78

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

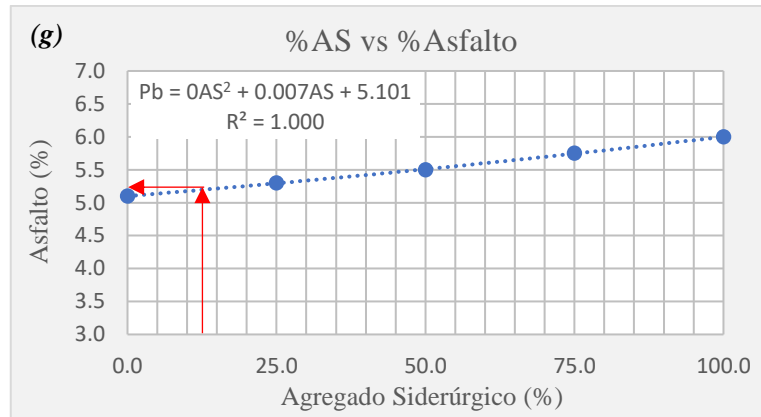


Figura 32. Propiedades físico-mecánicas para los cinco porcentajes de escoria sustituidos.
Fuente: Elaboración propia

3.1.7 Porcentaje óptimo de agregado siderúrgico

3.1.7.1 Porcentaje óptimo de agregado siderúrgico

Teniendo en cuenta que el óptimo contenido es aquel con el que se obtiene un 4 por ciento de vacíos de aire (Pa), entonces se reemplaza ese valor en la ecuación de mejor ajuste para el porcentaje de vacíos, como sigue:

$$Pa = 0AS^2 + 0.043AS + 3.460$$

$$4 = 0AS^2 + 0.043AS + 3.460$$

Despejando resulta AS = 12.56%

3.1.7.2 Porcentaje máximo de reemplazo

El porcentaje máximo de reemplazo se obtendría reemplazando en la misma ecuación, el límite máximo que se especificada para vacíos, el cual es 5.

$$5 = 0AS^2 + 0.043AS + 3.460$$

Despejando resulta AS = 35.81%

3.1.7.3 Propiedades físico-mecánicas con los porcentajes de escoria

Tabla 36

Propiedades físico-mecánicas con los porcentajes de escoria más factibles

Descripción	Cont. Óptimo	Max. Contenido	Especificación
% Agregado Siderúrgico (Escoria)	12.56	35.81	N/A
% Cemento Asfáltico (Pb):	5.19	5.35	N/A
Densidad, g/cm ³ :	2.40	2.42	N/A
Estabilidad Corregida, kN (Sc):	20.84	21.06	>5.44
Flujo en 1/100 in:	11.05	12.14	8 - 16
Porcentaje de Vacíos (Pa):	4.00	5.00	3 - 5
Vacíos en el Ag. Mineral (VMA):	13.49	13.83	12 - 14
Vacíos Llenos con Asfalto (VFA):	70.01	62.77	65 - 78

Fuente: Elaboración propia

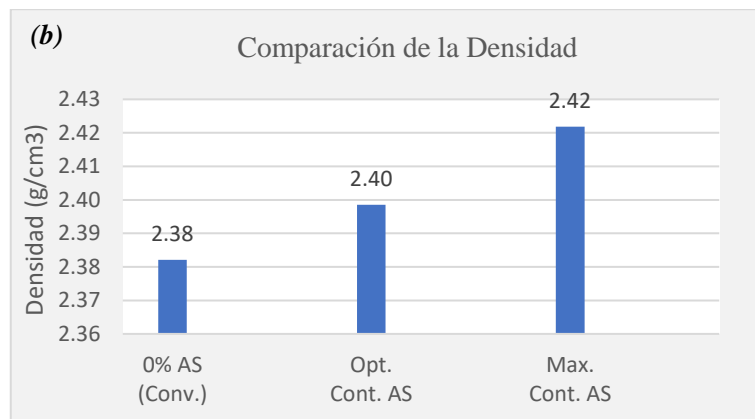
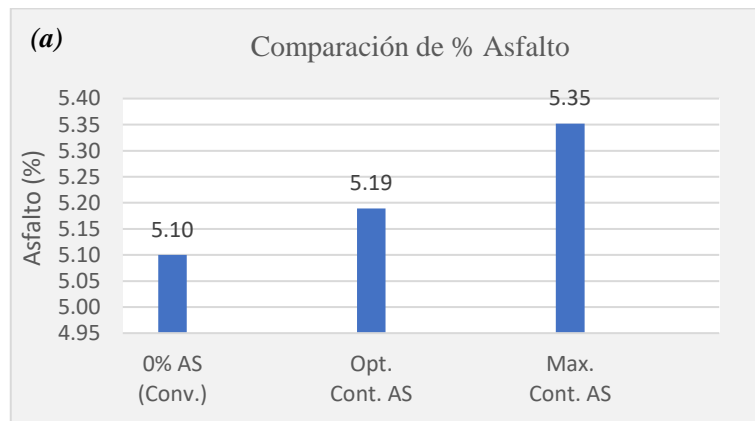
3.1.7.4 Comparación de propiedades físico-mecánicas

Tabla 37

Comparación de propiedades físico-mecánicas de las MAC convencionales con las modificadas

Descripción	0% AS (Conv.)	Opt. Cont. AS	Max. Cont. AS	Especificación
% Cemento Asfáltico (Pb):	5.10	5.19	5.35	N/A
Densidad, g/cm ³ :	2.38	2.40	2.42	N/A
Estabilidad Corregida, kN (Sc):	19.94	20.84	21.06	>5.44
Flujo en 1/100 in:	11.00	11.05	12.14	8 - 16
Porc. de Vacíos (Pa):	3.35	4.00	5.00	3 - 5
Vacios en el Ag. Mineral (VMA):	13.90	13.49	13.83	12 - 14
Vacios Llenos con Asfalto (VFA):	75.90	70.01	62.77	65 - 78

Fuente: Elaboración propia



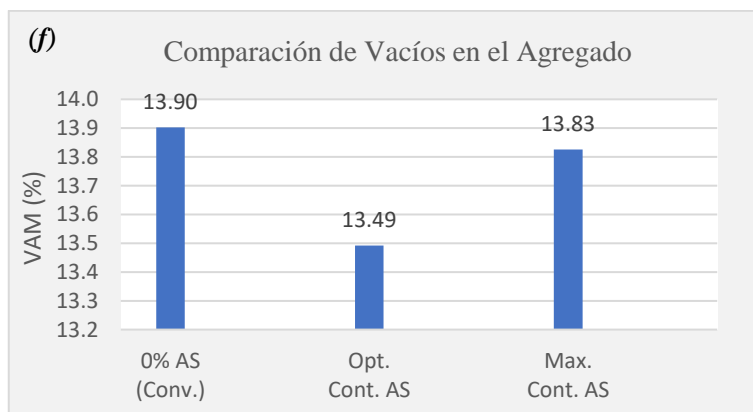
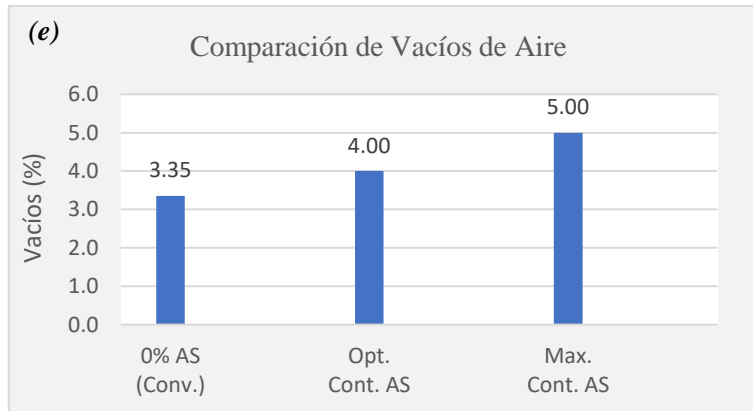
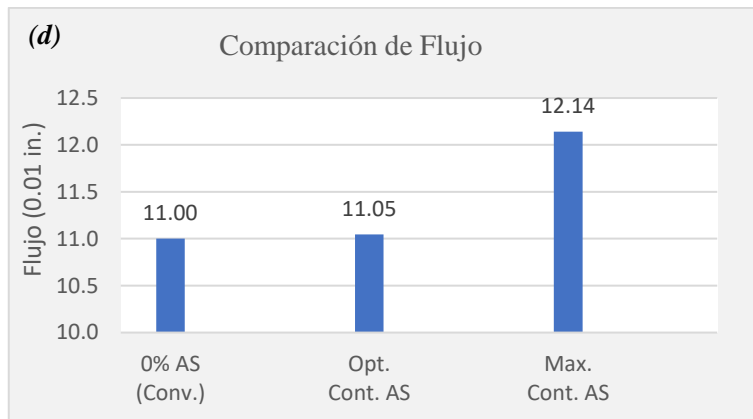
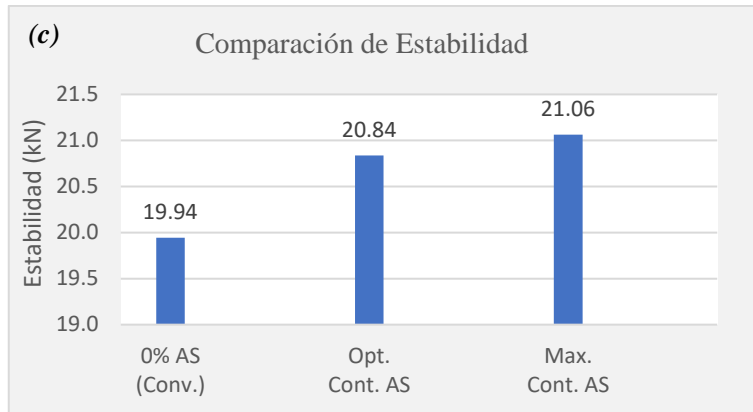


Figura 33. Comparación de propiedades físico-mecánicas de MAC convencional y modificada
Fuente: Elaboración propia

3.2 Resultados del Análisis Económico

Luego de determinar el óptimo porcentaje de sustitución, se procedió al análisis de costo unitario de la partida denominada Carpeta Asfáltica en Caliente de 2”, donde será empleada la MAC modificada. Dichos resultados se muestran a continuación:

Tabla 38

ACU de la partida donde se empleará la MAC convencional.

Partida		CARPETA ASFALTICA EN CALIENTE DE 2”				
Rendimiento	m2/d	1,500	EQ.	1,500	Costo unitario directo por: m2	33.95
Ítem	Descripción Recurso	Und.	Cuad.	Cant.	Precio	Parcial
Mano de Obra						
001	Oficial	hh	6	0.032	17.59	0.56
002	Peón	hh	10	0.053	15.86	0.85
003	Operario	hh	3	0.016	22.89	0.37
						1.77
Materiales						
004	MAC convencional puesta en obra	m3		0.055	520.00	28.60
						28.60
Equipos						
005	Herramientas manuales	% mo		3	1.77	0.05
006	Rodillo neumat.autop.81-100 hp	hm	1	0.005	123.6	0.66
007	Rodillo tandem vib.autop 130hp	hm	1	0.005	208.96	1.11
008	Cargador s/llantas 125-155 hp 3 yd3.	hm	1	0.005	186.69	1.00
009	Pavimentadora sobre orugas 105 hp 10-16’	hm	1	0.005	141.19	0.75
						3.58

Fuente: Elaboración propia

Tabla 39

ACU de la partida donde se empleará la MAC modificada

Partida		CARPETA ASFALTICA EN CALIENTE DE 2”				
Rendimiento	m2/d	1,500	EQ.	1,500	Costo unitario directo por: m2	38.19
Ítem	Descripción Recurso	Und.	Cuad.	Cant.	Precio	Parcial
Mano de Obra						
001	Oficial	hh	6	0.032	17.59	0.56
002	Peón	hh	10	0.053	15.86	0.85
003	Operario	hh	3	0.016	22.89	0.37
						1.77
Materiales						
004	MAC convencional puesta en obra	m3		0.055	653.44	32.84
						32.84
Equipos						
005	Herramientas manuales	% mo		3	1.77	0.05
006	Rodillo neumat.autop.81-100 hp	hm	1	0.005	123.6	0.66
007	Rodillo tandem vib.autop 130hp	hm	1	0.005	208.96	1.11
008	Cargador s/llantas 125-155 hp 3 yd3.	hm	1	0.005	186.69	1.00
009	Pavimentadora sobre orugas 105 hp 10-16’	hm	1	0.005	141.19	0.75
						3.58

Fuente: Elaboración propia

3.3 Discusión de Resultados

De acuerdo con todos los resultados obtenidos en este estudio, esta sección intenta revisar y discutir las hipótesis como predicciones previas a la investigación de la siguiente manera:

Pruebas de control de calidad - Agregado Fino

De los resultados obtenidos para agregado fino (**Tabla II**) se puede observar que:

- En cuanto a la prueba de equivalente de arena, el valor obtenido de 66.8% es cercano al obtenido por Chávez Q. y Herna A. (2014), cuyo valor promedio fue 60%, comparable dado que material fue recolectado de la misma cantera. Con dicho valor, el material pasa sin problemas el control, ya que el MVCS (2010) establece que el valor mínimo para que cumpla este requerimiento es de 45%.
- Para la prueba de adhesividad, se obtiene un valor de 4%, el cual está al límite, dado que el valor mínimo permitido por MVCS (2010) es también 4%. Este valor nos indica que no existe un grado de afinidad óptimo entre la arena y el ligante asfáltico usado, lo cual podría mejorarse mediante el uso de algún aditivo.
- Los valores de Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad resultaron ser 24.80%, 22.41% y 2.38% respectivamente, similares también a los determinados por Chávez Q. y Herna A. (2014) cuyos valores son 25.14%, 21.15% y 3.995 respectivamente. Con dicho resultado el material pasa sin problemas el control ya que el requerimiento máximo establecido por MVCS (2010) es de 4%.
- Para sales solubles totales se obtuvo un resultado de 0.08%, valor que discrepa con el obtenido por Chávez Q. y Herna A. (2014), debido a que estos obtuvieron un valor de 0.16%, que representa el doble del obtenido en el presente estudio. Sin embargo, ambos valores están dentro del límite máximo establecido por MVCS (2010), cuyo valor es 0.50%
- De los resultados de la prueba de absorción se obtuvo como resultado 0.49%, valor muy próximo al 0.45% obtenido por Chávez Q. y Herna A. (2014), los cuales están al casi al límite del establecido por MVCS (2010) de 0.50%.

Pruebas de control de calidad - Agregado Grueso

De los resultados obtenidos para los agregados gruesos (**Tabla 12** y **Tabla 13**) se puede observar que:

- Tanto la escoria de acero como la piedra chancada cumplen con el límite máximo establecido por MVCS (2010) de 12% para pérdida en sulfato de sodio.
- Para abrasión los resultados obtenidos para piedra y escoria son de 16.48 y 26.34% respectivamente. El valor de abrasión de la piedra, es muy similar al obtenido por Chávez Q. y Herna A. (2014), cuyo valor fue de 15.50%. Ambos materiales pasan sin problemas el control, dado que el MVCS (2010), establece como valor máximo 40%.
- En lo que respecta a partículas chatas y alargadas para piedra y escoria se obtuvo 2.82 y 0.21% respectivamente. El valor para la piedra, discrepa con el valor de 8.62% obtenido por Chávez Q. y Herna A. (2014), sin embargo ambos materiales pasan el control, dado que el máximo permisible por MVCS (2010) para esta prueba es de 15%
- Los resultados obtenidos de la prueba de partículas fracturadas para piedra y escoria es 26/68 y 0/0, cuya notación significa que, por ejemplo para la piedra, un 26% tiene una cara fracturada y el 68% posee dos caras fracturadas, estos valores son similares a los obtenidos por Chávez Q. y Herna A. (2014), cuyos valores son 23/71. La escoria pasa sin problemas dicho requerimiento, pero la piedra solo pasa para una cara fracturada y para dos supera el valor dado por MVCS (2010).
- Para sales solubles se obtiene 0.06 y 0.07, para la piedra y escoria respectivamente, los mismos que pasan el control dado que el máximo permisible para esta prueba, dada por MVCS (2010), es 0.5%.
- El porcentaje de absorción obtenido es 0.99% y 2.7 %, para piedra y escoria respectivamente. Chávez Q. y Herna A. (2014) obtienen una absorción para la piedra de 0.97% valor que concuerda con el obtenido aquí, y además que está dentro del límite máximo dado por MVCS (2010). El valor que no cumple con el requerimiento es el de la escoria, razonablemente por su carácter poroso es más absorbente.
- Para adherencia, tanto la piedra como la escoria cumplen con el requerimiento establecido por MVCS (2010), al obtener un valor superior a 95%.

Pruebas de fundamentales - Agregados gruesos y Fino

Para discutir sobre los valores obtenidos, se tendrá presente las **Tabla 14**, **Tabla 16** y **Tabla 18**

- El peso suelto seco, en g/cm^3 , de la escoria, piedra y arena es 1.292, 1.463 y 1.577 respectivamente, los dos últimos son algo parecidos a 1.438 y 1.451, obtenidos por Chávez Q. y Herna A. (2014). Estos resultados muestran que la piedra es más pesada que la escoria, esto es razonable dada la porosidad de esta última y además porque la mayoría de sus componentes son no metálicos.
- En cuanto al contenido de humedad natural se obtuvo 0.110, 0.525 y 0.816% para la escoria, piedra y arena respectivamente. Chávez Q. y Herna A. (2014) obtuvieron 0.486 y 0.364, el primer valor es cercano al obtenido, sin embargo, el segundo difiere en gran medida, lo que quiere decir que para ellos la piedra tuvo mayor contenido de humedad que la arena, en contraste a lo aquí obtenido.
- De la prueba de peso específico (g/cm^3) se obtuvo 2.561, 2.649 y 2.621 para la escoria, piedra y arena respectivamente. Estudios anteriores como el de Chávez Q. y Herna A. (2014) determinaron que para la piedra dicho valor es 2.672 y para arena 2.642, los cuales, a pesar de ser similares, indican que la piedra tiene un mayor peso específico que la arena y en el presente estudio se obtuvo lo contrario.

Observando las **Tabla 15**, **Tabla 17** y **Tabla 19**, que corresponden a los resultados del análisis granulométrico de agregados gruesos y finos, se puede deducir que, al efectuar la combinación de los mismos, la gradación resultante se ajustará al huso granulométrico MAC-2 establecido en la norma CE.010 Pavimentos Urbanos.

Una vez efectuada la combinación de agregados, cuyos resultados se muestran en la **Tabla 21**, se puede notar que la combinación óptima de agregados, con la cual se logra una distribución de tamaños de partículas que esté dentro de los límites especificados el huso granulométrico MAC-2 establecido por MVCS (2010), se logra combinando un 45% de piedra con y un 55% de arena. Dichos porcentajes de combinación están con respecto al peso total de agregados combinados.

De las mediciones efectuadas a los especímenes se pudo observar que sus dimensiones en promedio, estuvieron acorde a las dimensiones estandarizadas de 101.6 mm de diámetro por 63.5 mm de altura.

De acuerdo a la **Tabla 33**, los contenidos de asfalto óptimos resultantes son 5.10, 5.30, 5.50, 5.75 y 6.0% para porcentajes sustituyentes de escoria de 0, 25, 50, 75 y 100% respectivamente. Como se puede observar, existe una tendencia al incremento, es decir, a mayor cantidad de escoria, mayor contenido de cemento asfáltico usado para la MAC, esto es razonable debido a la naturaleza porosa de la escoria. Dicho resultado ya se infería debido al resultado obtenido de la prueba de absorción de agua.

De la **Tabla 36** y **Figura 32** se observa que el porcentaje de sustitución óptima de piedra por escoria de acero es 12.56%, correspondiéndole a dicho valor un porcentaje de vacíos de 4%. Para elegir este valor como óptimo se siguió la recomendación del Asphalt Institute (2015), el cual menciona que los valores óptimos se deben de basarse en un porcentaje de vacíos de 4%.

Por otro lado, dado que el límite superior especificado, de porcentaje de vacíos es 5%, y evaluando las propiedades físico-mecánicas a ese porcentaje, cabe la posibilidad de sustituir la piedra por escoria, hasta en un 35.81%.

Análisis Económico (ACU)

Del ACU de la partida Carpeta Asfáltica en Caliente de 2" (**Tabla 38** y **Tabla 39**), la MAC modificada, resulta más costosa que la convencional, debido al costo de transporte de agregado siderúrgico o escoria de acero, ya que al aplicarlo a nuestra región, se tendría que transportar desde la ciudad de Chimbote (proveedor Siderperú) hasta la planta de asfalto ubicada en el sector La Pluma, distrito de Batán Grande, Ferreñafe.

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- a) Observando que los resultados de la caracterización de agregados cumplen con los requerimientos establecidos por la normativa, se concluye que estos son adecuados para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.
- b) Los porcentajes de combinación óptima de agregados se obtiene al mezclar un 45% de piedra chancada con un 55% de arena.
- c) Evaluando las dimensiones obtenidas de los especímenes de prueba elaborados, se concluye que 1200 g de mezcla es suficiente para obtener especímenes de dimensiones estandarizadas (101.6 mm de diámetro por 63.5 mm de altura).
- d) Observando los resultados de las pruebas Marshall, se concluye que, a mayor porcentaje de sustitución, mayor porcentaje de asfalto y vacíos.
- e) Los porcentajes óptimos de asfalto, usando los materiales empleados en este estudio, se encuentran en el rango de 5% a 6%.
- f) Realizando una evaluación integral de los resultados Marshall, se concluye que los efectos de sustituir agregado grueso convencional por siderúrgico en las propiedades físico-mecánicas de mezclas asfálticas en caliente son:
 - Se incrementa el porcentaje de vacíos desde un 3.4 hasta un 6.6%
 - La densidad aumenta hasta aproximadamente 25% de sustitución, para luego reducirse incluso más que usando agregado convencional cuando este último es reemplazado al 100%.
 - La estabilidad sigue la misma tendencia que la densidad, incrementándose hasta un 25% y luego reduciéndose
 - El flujo tiende al incremento según se incrementa el porcentaje de escoria
 - El porcentaje de vacíos tiende a disminuir hasta un porcentaje de sustitución de aproximadamente 25% para luego empezar a incrementarse
- g) Evaluando los resultados de las pruebas Marshall para especímenes con contenidos óptimos de asfalto, se concluye que el porcentaje óptimo de sustitución de agregado convencional (piedra chancada) por siderúrgico (escoria de acero) es 12.56%
- h) Luego del análisis económico (ACU), se concluye que la MAC modificada con escoria de acero es más costosa que la MAC convencional en S/. 4.24 por m², esto debido, principalmente, al costo del transporte de la escoria de acero.

4.2 Recomendaciones

Realizar investigaciones con porcentajes de escoria más cercanos al óptimo hallado en el presente estudio.

Continuar con investigaciones de esta naturaleza, pero usando escorias de otro proveedor, como Aceros Arequipa, para determinar con cual se obtienen mejores resultados.

Construir un tramo de prueba para evaluar el desempeño de la mezcla estudiada en condiciones reales.

Continuar con investigaciones sobre el uso de la escoria en mezclas asfálticas, pero empleando agregados de canteras distintas.

Investigar el desempeño de la mezcla estudiada para niveles de tráfico liviano y pesado.

Establecer especificaciones técnicas que regulen el uso de la escoria de acero, dado que su viabilidad técnica para ser usada en mezclas asfálticas de pavimentación, ha quedado demostrada.

La MAC modificada debe ser empleada para la construcción de pavimentos sólo en la zona de Chimbote y lugares aledaños, donde el costo debido al transporte de la escoria sea equivalente al transporte de los agregados convencionales, estos últimos deben tener características similares a los empleados en este estudio.

REFERENCIAS

- Ahmedzade, P., & Sengoz, B. (2009). Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1), 300-305.
doi:10.1016/j.jhazmat.2008.09.105
- American Geological Institute. (2004). *Aggregate and the environment*. (pp. 68).
Recuperado de <https://www.americangeosciences.org>
- Asi, I. M. (2007). Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes. *Journal of Building and Environment*, 42(1), 325-329.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.08.020>
- Asi, I. M., Qasrawi, H. Y., & Shalabi, F. I. (2007). Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(8), 902-911.
doi:10.1139/107-025
- Asociación Latinoamericana del AceroAlacero. (2018). Positivo cierre del mercado siderúrgico latinoamericano durante el 2017 [Comunicado de Prensa]. Recuperado de <https://www.alacero.org/es/page/prensa/noticias>
- Asphalt Institute. (2015). *MS-2 Asphalt Mix Design Methods*. (pp. 188). Recuperado de <https://bookstore.asphaltinstitute.org/catalog/book/ms-2-asphalt-mix-design-methods>
- Behnood, A., & Ameri, M. (2012). Experimental investigation of stone matrix asphalt mixtures containing steel slag. *Scientia Iranica*, 19(5), 1214-1219.
doi:10.1016/j.scient.2012.07.007
- Canadian Institute for Environmental Law and Policy. (2011). *Aggregate extraction in Ontario: A strategy for the future*. (pp. 95). Recuperado de <http://cielap.org/pdf/AggregatesStrategyOntario.pdf>
- CEDEX. (2013). *Escorias de acería de horno de arco eléctrico*. Recuperado de <http://www.cedexmateriales.es/>
- Cervera B., C. (2016). *Influencia en las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica incorporando caucho reciclado de neumáticos, Cajamarca, 2016*. (Tesis de licenciatura), Universidad Privada del Norte, Cajamarca. Recuperado de <http://repositorio.upn.edu.pe/>
- Chávez Q., J., & Herna A., E. (2014). *Elaboración de mezclas asfálticas con partículas de caucho reciclado en el departamento de Lambayeque*. (Tesis de Licenciatura), Universidad Señor de Sipán, Pimentel - Chiclayo.

- Choque, R. (2012). *Viabilidad para el uso de la escoria de acería eléctrica como agregado en mezcla asfáltica en la ciudad de Chimbote*. (Tesis de licenciatura), Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica. Recuperado de <http://repositorio.unh.edu.pe>
- Diario Correo. (2014). Denuncian peligroso avance de cantera en Pilcomayo. *Diario Correo*. Recuperado de <https://diariocorreo.pe>
- Diario Correo. (2017). En José Leonardo Ortiz falta pavimentar el 90 %. *Diario Correo*. Recuperado de <https://diariocorreo.pe>
- Federal Highway Administration. (2016, 03/08/2016). User guidelines for waste and byproduct materials in pavement construction Recuperado de <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/97148/060.cfm>
- Galvez Ch., C., & Valladolid S., E. (2015). *Estudio comparativo de las mezclas asfálticas en frío, con escoria siderúrgica y otra convencional*. (Tesis de Licenciatura), Universidad Señor de Sipán, Pimentel - Chiclayo.
- Geiseler, J. (1996). Use of steelworks slag in Europe. *Waste Management*, 16(1), 59-63. doi:10.1016/S0956-053X(96)00070-0
- Gerdau. (2018). Medio ambiente y sociedad: Coproductos y residuos. Recuperado de www.sider.com.pe
- Groenniger, J., Cannone, A., Isailović, I., Wang, D., & Wistuba, M. P. (2017). Experimental investigation of asphalt mixture containing Linz-Donawitz steel slag. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 4(4), 372-379. doi:10.1016/j.jtte.2017.05.009
- H. Sampieri, R. (2013). *Metodología de la investigación*. (pp. 600). Recuperado de <https://www.gettextbooks.com/isbn/9781456223960/>
- Hainin, M. R., Aziz, M. M. A., Shokri, M., Jaya, P. R., Hassan, N. A., & Ahsan, A. (2014). Performance of steel slag in highway surface course. *Jurnal Teknologi*, 71(3), 99-102. doi:10.11113/jt.v71.3767
- Hainin, M. R., Yusoff, N. I. M., Sabri, M. F. M., Aziz, M. A. A., Hameed, M. A. S., & Reshi, W. F. (2012). Steel Slag as an Aggregate Replacement in Malaysian Hot Mix Asphalt. *ISRN Civil Engineering*, 1-5. doi:10.5402/2012/459016

- Hassan, H. F., & Al-Jabri, K. (2011). Laboraroty evaluation of hot-mix asphalt concrete containing copper slag aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(6), 879-885. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000246
- Hunt, L., & Boyle, G. (2000). *Steel slag in hot mix asphalt concrete*
- Kavussi, A., & Qazizadeh, M. J. (2014). Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging. *Journal of Construction and Building Materials*, 72, 158-166. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.08.052
- Kehagia, F. (2009). Skid resistance performance of asphalt wearing courses with electric arc furnace slag aggregates. 27(3), 288-294. doi:10.1177/0734242x08092025
- Khodary, F. (2015). Comparative study of using steel slag aggregate and crushed limestone in asphalt concrete mixtures. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 6(3), 73-82.
- Kök, B. V., & Kuloğlu, N. (2008). Effects of Steel Slag Usage as Aggregate on Indirect Tensile and Creep Modulus of Hot Mix Asphalt. *Gazi University Journal of Science*, 21(3), 97-103.
- Krayushkina, K., Prentkovskis, O., Bieliatynskiy, A., & Junevičius, R. (2012). Use of steel slags in automobile road construction. *Transport (16484142)*, 27(2), 129-137. doi:10.3846/16484142.2012.690093
- Li, C. H., Xiang, X. D., Zhou, X. Y., & Tu, X. Q. (2014). Utilization of steel slag as aggregates for porous asphalt mixture. *Key Engineering Materials*, 599, 261-264. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.599.261
- Li, W., Sun, P. X., & Zhang, C. X. (2012). Laboratory test study on asphalt concrete with steel slag aggregates. *Applied Mechanics and Materials*, 152-154, 117-120. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.152-154.117
- López, D. (2017). *Mejoramiento de la carpeta asfáltica a base de escoria siderúrgica para pavimentos flexibles (mezcla asfáltica)*. (Tesis de licenciatura), Universidad Politécnica Salesiana, Quito. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec>
- Maharaj, C., White, D., Maharaj, R., & Morin, C. (2017). Re-use of steel slag as an aggregate to asphaltic road pavement surface. *Cogent Engineering*, 4(1). doi:10.1080/23311916.2017.1416889
- Maryland DOT. (2015). *Geotechnical and environmental impacts of steel slag use in highway contruction*. Recuperado de <http://www.roads.maryland.gov>

- Mroueh, U.-M., Eskola, P., & Laine-Ylijoki, J. (2001). Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction. *Journal of Waste Management, 21*(3), 271-277. doi:10.1016/S0956-053X(00)00100-8
- MTC. (2013). Manual de carreteras - Especificaciones generales para construcción (EG-2013).
- MTC. (2016). *Manual de ensayo de materiales*. Lima: M.T.C Recuperado de <http://www.mtc.gob.pe>
- MVCS. (2010). *Norma Técnica CE.010 Pavimentos Urbanos*. Lima Recuperado de <https://www.sencico.gob.pe/descargar.php?idFile=182>
- Nikolaides, A. (2014). *Highway Engineering*. (pp. 924). Recuperado de <https://www.taylorfrancis.com/books/9781466579972>
- Nippon Slag Association [NSA]. (2018). Types of iron and steel slag. Recuperado de <http://www.slg.jp/e/slag/kind.html>
- Oluwasola, E. A., Hainin, M. R., & Aziz, M. M. A. (2016). Comparative evaluation of dense-graded and gap-graded asphalt mix incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings. *Journal of Cleaner Production, 122*, 315-325. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.051>
- Pasetto, M., & Baldo, N. (2012). Performance comparative analysis of stone mastic asphalts with electric arc furnace steel slag: a laboratory evaluation. *Materials and Structures, 45*(3), 411-424. doi:10.1617/s11527-011-9773-2
- Patiño S., D. (2017). *Evaluación de la resistencia bajo carga monotónica de una mezcla asfáltica, fabricada con escoria de acero*. (Tesis de Licenciatura), Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogota, Colombia.
- Pérez, E. (2008). *Evaluación de la escoria de horno como agregado en mezclas asfálticas*. (Tesis de licenciatura), Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Perú 21. (2014). Pistas recién pavimentadas se siguen rajando. *Perú 21*. Recuperado de <https://peru21.pe>
- Perú.com. (2016). Hay 8 baches por cada kilómetro recorrido en Lima, revela estudio. *Perú.com*. Recuperado de <https://peru.com>
- Retema. (2017). Áridos siderúrgicos, aliado contra la sobreexplotación de canteras y el vertido de residuos. Recuperado de <https://www.retema.es/>
- RPP Noticias website. (2013). Aun falta pavimentar el 70 % de la ciudad de Chiclayo. *Actualidad*. Recuperado de <https://rpp.pe>

- Santos, D. (s.f.). *Utilização do agregado siderúrgico (escória de aciária) em pavimentação asfáltica*. Recuperado de <http://cbrcrbrasvias.com.br>
- Segura, A. (2016). *Estudio del comportamiento físico y mecánico de mezclas asfálticas; con materiales reutilizables en la construcción como escoria de acero*. (Tesis de licenciatura), Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C. Recuperado de <http://repository.ucatolica.edu.co>
- Shen, D.-H., Wu, C.-M., & Du, J.-C. (2009). Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 23(1), 453-461. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.11.001
- Skaf, M., Manso, J. M., Aragón, Á., Fuente-Alonso, J. A., & Ortega-López, V. (2017). EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. *Resources, Conservation and Recycling*, 120, 176-185. doi:10.1016/j.resconrec.2016.12.009
- Sofilié, T., Mladenovič, A., & Sofilié, U. (2011). Defining of EAF steel slag application possibilities in asphalt mixture production. *Journal of Environmental Engineering & Landscape Management*, 19(2), 148-157. doi:10.3846/16486897.2011.580910
- Tribunamochica. (2013). Nivelan calles de diversos pueblos jóvenes de Chiclayo ante cercanía de Juegos Bolivarianos. Recuperado de <https://tribunamochica.wordpress.com>
- Valera Nuñez, F. L. (2018). *Evaluación del efecto de la cal hidratada y el polvo de ladrillo utilizado como relleno mineral en las propiedades de una mezcla asfáltica*. (Tesis de licenciatura), Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo. Recuperado de <http://tesis.usat.edu.pe>
- Wang, G. (1992). *Properties and utilization of steel slag in engineering applications*. (Tesis de Doctorado), University of Wollongong, Wollongong, Australia. Recuperado de <https://ro.uow.edu.au/theses/1258>
- Wang, G., Thompson, R. G., & Wang, Y. (2011). Hot-mix asphalt that contains nickel slag aggregate: Laboratory evaluation of use in highway construction. *Journal of Transportation Research Record*, 2208(1), 1-8. doi:10.3141/2208-01
- Wen, H., Wu, S., & Bhusal, S. (2016). Performance evaluation of asphalt mixes containing steel slag aggregate as a measure to resist studded tire wear. *Journal of Materials in Civil*, 28(5), 1-7. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001475
- World Steel Association. (2014). Statistical Archive. Recuperado de <http://www.worldsteel.org/statistics/statistics->

archive.html.

- World Steel Association. (2017). *Steel Statistical Yearbook 2017*. Recuperado de <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/>
- World Steel Association. (2018a). Monthly production 2018-2017. Recuperado de <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/>
- World Steel Association. (2018b). Steel's contribution to a low carbon future. Recuperado de <https://www.worldsteel.org/publications/position-papers>
- Wu, S., Xue, Y., Ye, Q., & Chen, Y. (2006). Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Building and Environment*, 42(7), 2580-2585. doi:10.1016/j.buildenv.2006.06.008
- Yildirim, I. Z., & Prezzi, M. (2011). Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag *Journal of Advances in Civil Engineering*, 2011, 13. doi:10.1155/2011/463638
- Zelada M., R. (2016). *Valoración económica de la escoria de horno eléctrico de Siderperú como producto alternativo a la piedra cantera en el sector construcción*. (Tesis de licenciatura), Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo. Recuperado de <http://dspace.unitru.edu.pe>
- Ziari, H., & Khabiri, M. M. (2007). Preventive maintenance of flexible pavement and mechanical properties of steel slag asphalt. *Journal of Environmental Engineering & Landscape Management*, 15(3), 188b-192b.
- 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 & Engineering*, 2015, 1-5. doi:10.1155/2015/623245
- Zumrawi, M., & Khalill, F. (2017). Experimental study of steel slag used as aggregate in asphalt mixture. *American Journal of Construction and Building Materials*, 2(1), 26-32. doi:10.11648/j.ajcbm.20170201.14