

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA ESCORIA DE HORNO COMO AGREGADO
EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

EDGAR GUSTAVO PÉREZ SIERRA

ASESORADO POR EL ING. SERGIO VINICIO CASTAÑEDA LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, FEBRERO DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

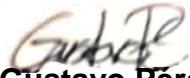
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga Dilma Yanet Mejicanos Jol
EXAMINADOR	Ing. Alejandro Castañón López
EXAMINADOR	Ing. Marco Antonio García Díaz
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la Ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE LA ESCORIA DE HORNO COMO AGREGADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS,

tema que se me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil , el día 10 de noviembre de 2006.


Edgar Gustavo Pérez Sierra

*Ingeniero Sergio V. Castañeda L.
Colegiado 5319*

Guatemala 26 de octubre de 2007

Ingeniero

Francisco Javier Quiñonez de la Cruz

Coordinador Área de Materiales

Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos

Ing. Quiñonez de la Cruz

Por este medio me permito informarle que he revisado el trabajo de Graduación titulado "Evaluación de la escoria de horno como agregado en mezclas asfálticas", desarrollado por el estudiante universitario Edgar Gustavo Pérez Sierra quien contó con mi asesoría.

Considero que el trabajo elaborado por el estudiante Pérez Sierra, satisface los requisitos exigidos en la Facultad, por lo que recomiendo su aprobación,

Agradezco a usted la atención a la presente, atentamente

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Sergio Vinicio Castañeda Lemus

Asesor Trabajo de Graduación

Sergio Vinicio Castañeda Lemus
INGENIERO CIVIL
COLEGIADO No. 5319



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 15 de noviembre de 2007

Ingeniero
Fernando Amílcar Boiton Velásquez
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería

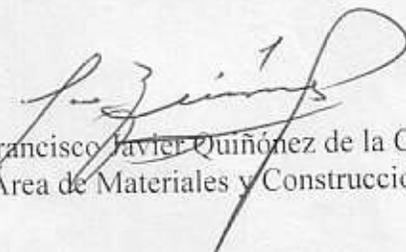
Señor Director:

Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado **“EVALUACIÓN DE LA ESCORIA DE HORNO COMO AGREGADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS”**, realizado por el estudiante universitario **Edgar Gustavo Pérez Sierra**, quien contó con la asesoría del Ing. Sergio Vinicio Castañeda Lemus.

El trabajo realizado por el estudiante **Pérez Sierra** cumple con los objetivos para los cuales fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. Francisco Javier Quinónez de la Cruz
Coordinador Área de Materiales y Construcciones Civiles



Cc archivo



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Sergio Vinicio Castañeda Lemus y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, al trabajo de graduación del estudiante Edgar Gustavo Pérez Sierra, titulado **EVALUACIÓN DE LA ESCORIA DE HORNO COMO AGREGADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.



Ing. Fernando Amilcar Boiton Velásquez

Guatemala, febrero de 2008.

/bbdeb.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación P titulado: **EVALUACIÓN DE LA ESCORIA DE HORNO COMO AGREGADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS.**, presentado por el estudiante universitario **Edgar Gustavo Pérez Sierra**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, febrero de 2008

/cc

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por darme la vida y la oportunidad de estar aquí.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por enseñarme a buscar el conocimiento de la verdad.
Facultad de Ingeniería	Con aprecio y respeto
Asfalgua	A todo su personal, especialmente al Ing. José Agüero, Ing. Cesar Quiroz, Edwin Rodríguez, William Flores, Sergio Samayoa.
Ricardo Lara	Con aprecio, por la ayuda brindada en esta investigación.
Ing. Sergio Vinicio Castañeda Lemus	Por su tiempo y ayuda para realizar este trabajo de graduación.

ACTO QUE DEDICO A:

**Mis padres,
Alberto y Elida**

Por el apoyo y el esfuerzo realizado, sin ustedes no hubiese sido posible llegar hasta aquí, muchas gracias, los quiero mucho.

Mi hermana

Mechi, por animarme a seguir adelante, gracias por los muchos abrazos al regresar a casa.

Mis hermanos

Fernando y Daniel, por los buenos momentos que hemos pasado juntos, por acompañarme siempre.

Mi abuela Mercedes

Mi segunda mamá, gracias por todo.

A mis amigos

Dina, Cristian y Alejandro Barrios, Jorge Mario, Pablo, Amílcar, Sergio de la Roca, Karla, Jenny, Christian, Luis Pacheco, Henry, Luis España, Sergio López, Max Sigui.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XVII
INTRODUCCIÓN	XVII
1 ESCORIA DE HORNO	
1.1 Antecedente	1
1.2 Definición	1
1.3 Tipos	2
1.3.1 De Altos Hornos	2
1.3.2 De Acería	2
1.3.2.1 Características físicas de la escoria de acería	3
1.3.2.2 Composición química	4
1.4 Usos de la Escoria de Acería	5
1.4.1 Internacional	5
1.4.2 Nacional	6
1.5 Ventajas y desventajas del uso de la escoria en proyectos viales	8
1.5.1 Desventajas	8
1.5.2 Ventajas	8
1.5.2.1 En Mezclas asfálticas	8
1.5.2.2 En tratamientos superficiales	9
1.5.2.3 En bases granulares	10
2. MEZCLAS ASFÁLTICAS	11
2.1 Generalidades	11
2.2 Tipos	11
2.2.1 Mezclas asfálticas en frío	11
2.2.2 Mezclas asfálticas en caliente	12

2.2.2.1	Composición	12
2.2.2.1.1	Cemento asfáltico	12
2.2.2.1.2	Agregado mineral	13
2.2.2.2	Características	13
2.2.2.2.1	Densidad	13
2.2.2.2.2	Vacíos en el agregado mineral	14
2.2.2.2.3	Contenido de asfalto	14
3.	DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE	17
3.2	Método Hveem.(AASHTO T246)	17
3.1.1	Antecedentes	17
3.1.2	Propósito	17
3.2	Método Marshall (ASSHTO T245)	18
3.2.1	Antecedentes	18
3.2.2	Propósito	18
3.2.3	Descripción	19
3.3	Propiedades consideradas en el diseño	21
3.3.1	Estabilidad	21
3.3.2	Durabilidad	23
3.3.3	Impermeabilidad	24
3.3.4	Trabajabilidad	24
3.3.5	Flexibilidad	25
3.3.6	Resistencia a la fatiga	26
3.3.7	Resistencia al deslizamiento	26
4.	AGREGADOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS	29
4.1	Definición	29
4.2	Tipos	29
4.2.1	Según su tamaño	29
4.2.1.1	Finos	29
4.2.1.2	Gruesos	29
4.2.2	Según su origen	29
4.2.2.1	Naturales	29

4.2.2.2	Procesados	30
4.2.2.3	Estabilizados	30
4.2.2.4	Artificiales	30
4.3	Características deseables	30
4.3.1	Granulometría y tamaño	31
4.3.2	Resistencia y durabilidad	32
4.3.3	Forma de las partículas	33
4.3.4	Textura superficial	34
4.3.5	Porosidad	34
4.3.6	Adherencia	35
4.3.7	Limpieza	35
4.4	Caracterización de agregados	35
4.4.1	Agregado grueso	35
4.4.2	Agregado fino	37
5.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	39
5.1	Muestreo	39
5.2	Caracterización de materiales	39
5.2.1	Cemento asfáltico	39
5.2.2	Agregados	39
5.2.2.1	Agregados tradicionales	40
5.2.2.2	Escoria de acería	40
5.3	Diseño de mezclas asfálticas	40
5.3.1	Combinaciones	41
5.3.1.1	Justificación	41
5.4	Resultados	42
5.4.1	Materiales	42
5.4.1.1	Cemento asfáltico	42
5.4.1.2	Agregados	43
5.4.1.3	Mezclas asfálticas	44
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
6.1	Caracterización de materiales	49
6.1.1	Cemento asfáltico	49

6.1.2	Agregados	49
6.1.2.1	Prueba de abrasión de Los Ángeles	49
6.1.2.2	Desintegración al sulfato de sodio	49
6.1.2.3	Partículas planas y alargadas	49
6.1.2.4	Gravedad específica	50
6.1.2.5	Equivalente de arena	50
6.1.2.6	Índice plástico	52
6.1.2.7	Porcentaje de absorción	50
6.2	Mezclas	50
6.2.1	Porcentaje optimo de asfalto	50
6.2.2	Estabilidad Marshall	50
6.2.3	Fluencia Marshall	51
6.2.4	Relación estabilidad fluencia	51
6.2.5	Gravedad específica	51
	CONCLUSIONES	53
	RECOMENDACIONES	55
	BIBLIOGRAFÍA	57

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Escoria de acería	2
2.	Espécimen de ensayo, método Mashall. AASHTO T-245	18
3.	Aparato de compactación, método Marshall. AASHTO T-245	18
4.	Máquina de estabilidad, método Marshall. AASHTO T-245	21
5.	Resultados, porcentaje óptimo de asfalto	43
6.	Resultados, estabilidad Marshall	43
7.	Resultados, fluencia Marshall	44
8.	Resultados, relación estabilidad / fluencia	44
9.	Resultados gravedad específica	45

TABLAS

I.	Propiedades físicas típicas de la escoria de acería.	4
II.	Propiedades mecánicas típicas de la escoria de acería	4
III.	Composición química de la escoria de acería	5
IV.	Escoria de acería comercializada por Multiserv	7
V.	Requisitos para la mezcla de concreto asfáltico en caliente	19
VI.	Vacíos en el agregado mineral (VAM)	19
VII.	Graduación de agregados para pavimentos de concreto asfáltico	30
VIII.	Tipos de abrasión	34
IX.	Combinaciones de agregado en mezclas asfálticas	39
X.	Resultados de caracterización del cemento asfáltico	40
XI.	Resultados caracterización de agregados	41

LISTA DE SÍMBOLOS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials.</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials.</i>
dmm	Décimas de milímetro.
Dp	Relación polvo asfalto.
Gmb	Gravedad específica bruta de la mezcla.
Gmm	Gravedad específica teórica máxima de la mezcla.
Pb	Porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla.
Pba	Porcentaje de asfalto absorbido.
Pbe	Porcentaje efectivo de asfalto.
TMN	Tamaño máximo nominal.
Va	Vacíos de aire.
Vfa	Vacíos rellenos de asfalto.
VMA	Vacíos en el agregado mineral.
%	Porcentaje.

GLOSARIO

- Agregado** Material granular duro, de composición mineralógica como la arena, la grava, la escoria o la roca triturada, usado para ser mezclado en diferentes tamaños.
- Agregado fino** Agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (# 4).
- Agregado grueso** Agregado retenido en el tamiz de 4.75 mm (# 4).
- Ahuellamiento** Surcos que se desarrollan en el pavimento, en los carriles de las ruedas. Pueden ser resultado de una consolidación por movimiento lateral de una o más capas del pavimento bajo efectos del tráfico o, pueden ser generados por un desplazamiento de la superficie misma del pavimento. Ocurren como resultado del movimiento plástico de una mezcla que tiene muy poca estabilidad para resistir el tráfico.
- Cemento asfáltico** Material cementante, de color entre carmelito oscuro y negro, en el cual los constituyentes predominantes son bitúmenes que aparecen en la naturaleza o se obtienen en el procesamiento del petróleo. El asfalto es un constituyente, en proporciones variables, de la mayoría de petróleos crudos.

Bitumen	Sustancia cementante de color negro (sólida, semi-sólida o viscosa), natural o fabricada, compuesta principalmente de hidrocarburos de alto peso molecular, siendo típicos los asfaltos, las breas o alquitranes, los betunes y las asfaltitas.
Compactación	Acto de comprimir un volumen dado de material en un volumen más pequeño. Generalmente la compactación se logra usando los rodillos o compactadores neumáticos.
Deformación	Cualquier cambio que presente un pavimento respecto a su forma original.
Densidad	Grado de solidez que puede alcanzarse en una mezcla dada. Está limitada por la eliminación total de los vacíos que se encuentran entre las partículas de la mezcla.
Desintegración	Separación progresiva de las partículas del agregado en el pavimento desde la superficie hacia abajo, o desde los bordes hacia el interior. Puede ser causada por falta de compactación, construcción de una capa de rodadura muy delgada en períodos fríos, agregado sucio o desintegrable, muy poco asfalto en la mezcla o sobrecalentamiento de la mezcla asfáltica.
Estabilidad	Capacidad de una mezcla asfáltica de resistir deformación bajo las cargas impuestas. La estabilidad está en función de la cohesión y la fricción interna del material.

Flexibilidad	Capacidad del pavimento asfáltico de ajustarse a los asentamientos en la fundación.
Grietas	Fracturas en la superficie del pavimento asfáltico.
Impermeabilidad	Capacidad de un pavimento asfáltico de resistir el paso de aire y agua dentro o a través del mismo.
Ondulaciones	Deformación en el pavimento, dando origen a un movimiento plástico caracterizado por ondas en la superficie del pavimento.
Resistencia a la fatiga	Capacidad de un pavimento asfáltico para resistir flexión repetida causada por cargas móviles. Entre más alto contenido de asfalto, mayor será la resistencia a la fatiga.
Resistencia al deslizamiento	Propiedad de la superficie asfáltica de resistir el deslizamiento, particularmente cuando está mojado.
Trabajabilidad	Facilidad con que las mezclas de pavimentación pueden ser colocadas y compactadas.
Vacíos	Espacios de aire en una mezcla compactada rodeados de partículas cubiertas de asfalto.

RESUMEN

En el presente estudio se evaluó la escoria producida en la planta de Siderúrgica de Guatemala, (SIDEGUA) como agregado en mezclas asfálticas, de acuerdo a las especificaciones descritas en el libro “ESPECIFICACIONES GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y PUENTES” año 2001 de la Dirección General de Caminos, estas están basadas en normas ASTM y AASHTO.

La escoria de horno es un subproducto derivado de la fabricación del arrabio (materia prima para la elaboración del acero), la cual se genera en hornos de siderurgias. Es utilizada como material en la construcción de carreteras y en otras aplicaciones como concreto hidráulico. En Guatemala la empresa Siderúrgica de Guatemala S.A. (SIDEGUA) genera dicho material. El cual es procesado por la empresa Multiserv S.A., quienes conjuntamente con Asfaltos de Guatemala S. A. (ASFALGUA) y el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, apoyaron este estudio.

Se caracterizó la escoria y el agregado tradicional y se evaluaron tres mezclas asfálticas con diferentes combinaciones de escoria-agregado tradicional (100%,0%), (70%,30%), (0%,100%). La mezcla con 100% agregado tradicional se utilizó como parámetro de comparación para conocer las diferencias entre las mezclas con escoria y las que utilizan agregados tradicionales.

Para el diseño de mezclas se utilizó el método Marshall (AASHTO T-245), la mezcla que presentó mejor comportamiento fue la que combina agregados tradicionales con escoria.

OBJETIVOS

GENERAL

Evaluar el uso de escoria de horno como agregado en mezclas asfálticas, de acuerdo a procedimientos y especificaciones normalizadas.

ESPECÍFICOS

1. Caracterizar la escoria como agregado para mezclas asfálticas.
2. Caracterizar tres mezclas asfálticas con diferentes combinaciones escoria-agregado tradicional.
3. Evaluar el comportamiento de las combinaciones de agregados en las mezclas.
4. Aplicar el método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de graduación fue realizado con el fin de evaluar las características de la escoria de horno y su uso en mezclas asfálticas, de acuerdo a especificaciones aplicables.

En Guatemala la empresa Siderúrgica de Guatemala S.A. (SIDEGUA) genera dicho material. El cual es procesado por la empresa Multiserv S.A., quienes conjuntamente con Asfaltos de Guatemala S. A. (ASFALGUA) y el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala apoyaron este estudio.

En el primer capítulo se presenta información acerca de la escoria, sus características físicas, composición química, tipos y usos. El segundo capítulo describe las mezclas asfálticas, tipos y características de estas.

El tercer capítulo contiene el diseño de mezclas asfálticas, los métodos que se usan y la normativa aplicable. En el cuarto capítulo se describen los agregados para mezclas asfálticas, tipos y sus propiedades.

El desarrollo experimental se expone en el capítulo 5. En el capítulo 6 se presenta el análisis de resultados y por último se presentan las conclusiones y recomendaciones.

El resultado más importante del estudio fue la caracterización de la escoria, pues esta información es de utilidad para continuar investigando acerca de este material.

1. ESCORIA DE HORNO

1.1 Antecedentes

La escoria de horno es un subproducto derivado de la fabricación del arrabio (materia prima para la elaboración del acero), la cual se genera en hornos de siderurgias. Es usada como material en la construcción de carreteras como agregado en mezclas asfálticas y en otras aplicaciones como concreto hidráulico, en Estados Unidos, México, Venezuela y otros países. Se estima que entre 7.0 y 7.5 millones de toneladas métricas están siendo utilizadas cada año en los Estados Unidos.¹ En Guatemala no se cuenta aún con información acerca del desempeño del material en mezclas asfálticas, así que es de gran utilidad determinar las características que presenta.

En el año 2005, la empresa Siderúrgica de Guatemala en conjunto con el Colegio de Ingenieros de Guatemala realizaron un seminario sobre el uso de la escoria en proyectos de construcción, en el cual se presentó información general acerca de este material y la experiencia en su utilización en otros países, así como las ventajas que presenta, y los usos que podría tener en nuestro país.

Este material ha sido utilizado ya en Guatemala, en estabilizaciones de caminos de empresas agroindustriales (ingenios).

1.2 Definición

Material granular, no metálico, subproducto del proceso siderúrgico en que el arrabio y/o la chatarra se refinan para producir acero.²

¹ <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3334/14/34065-14.pdf>

² Raúl Torres Ledesma. Las escorias de acería y su empleo en carreteras y vías férreas (Venezuela,1998)p.215

1.3 Tipos

1.3.1 De altos hornos

Se produce cuando se reducen los óxidos de hierro para convertirlos en arrabio líquido, esta escoria es comúnmente utilizada en la fabricación del cemento, no tiene aplicación en obras viales.

1.3.2 De acería

Es un subproducto del proceso siderúrgico en que la chatarra se refina para producir acero. Este material, cuando está en estado sólido es un excelente agregado para la construcción de carreteras y vías férreas.³

La escoria de acero es un subproducto de la siderurgia, se produce durante la separación del acero fundido de impurezas en hornos siderúrgicos. Es una solución compleja de silicatos y de óxidos que solidifica al enfriarse⁴.

Figura 1. Escoria de acería



Fuente: Laboratorio de ASFALGUA.

³<http://www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/ssa1.htm>

⁴ Raúl Torres Ledesma. Las escorias de acería y su empleo en carreteras y vías férreas (Venezuela, 1998) p.215

1.3.2.1 Características físicas de la escoria de acería

La escoria de acería tiene superficialmente una textura rugosa, forma cúbica y angular. Internamente cada partícula es de naturaleza vesicular, con muchas celdas no intercomunicadas. La estructura celular se forma por los gases atrapados en la escoria caliente en el momento del enfriado y solidificación.

Como las celdas no forman pasajes interconectados, el término “vesicular o celular” es más aplicable que el término “poroso”. Cuando la escoria líquida es sometida al proceso de trituración por agua, se forman fragmentos cúbicos con muy pocas partículas alargadas.

Esta angularidad, combinada con su textura rugosa y peso hacen de ella un material ideal para balasto de vías férreas, bases granulares de carreteras, pavimentos asfálticos, tratamientos superficiales y sellos. Una de las observaciones frecuentes que hacen los que por primera vez conocen la escoria, es que se puede “oxidar”, quizás por considerar que este material proviene del proceso de producción del acero. Vale la pena destacar, que de acuerdo a la definición de este material: “mezcla de óxidos y silicatos fundidos” ya la oxidación se completó totalmente y en consecuencia no puede progresar más.

Por su textura rugosa y angular producen superficies de rodamiento antiderrapantes, que mantienen esta característica con el tiempo, por lo cual son ampliamente utilizadas en sellos y tratamientos superficiales.

Se ha observado que la escoria tiene la capacidad de retener el calor en períodos de tiempo considerablemente más largos que los agregados naturales tradicionales, esta característica resulta ventajosa en las mezclas asfálticas, conservando la temperatura por mayor tiempo.

Tabla I. Propiedades físicas típicas de la escoria de acería.

Propiedad	Valor
Gravedad específica	3.2 – 3.6
Peso unitario kg/m ³ , (lb/ft ³)	1600 - 1920 (100 - 120)
Absorción	Arriba de 3%

Fuente: <http://www.tfhr.gov/hnr20/recycle/waste/ssa1.htm>

Tabla II. Propiedades mecánicas típicas de la escoria de acería.

Propiedad	Valor
Abrasión Los Angeles (ASTM C131), %	20 - 25
Desintegración al sulfato de sodio (ASTM C88), %	<12
Ángulo de fricción interna.	40° - 50°
Dureza (medida en la escala de Mohs)	6 - 7
California Bearing Ratio (CBR), % tamaño máximo 19 mm (3/4 de pulgada)	Arriba de 300

Fuente: <http://www.tfhr.gov/hnr20/recycle/waste/ssa1.htm>

1.3.2.2 Composición química

La composición química de las escorias usualmente se expresa en términos referentes a óxidos simples, la forma mineralógica de las escorias y las proporciones relativas de estos compuestos son muy dependientes del proceso de fabricación del acero y la manera en que son enfriadas, los compuestos predominantes son silicatos de calcio, el óxido de calcio, calcio, magnesio, óxido férrico, cal libre y magnesio libre.

Tabla III. Composición química de la escoria de acería

Fórmula	Escoria de Siderúrgica de Guatemala %	Escoria producida en Estados Unidos %
SiO ₂	22.02	10-19
Al ₂ O ₃	6.16	1-3
Fe ₂ O ₃	9.11	30-40
CaO	41.91	40-52
MnO	----	5-8
MgO	15.4	5-10
K ₂ O	0.38	----
Na ₂ O	0.01	----
P ₂ O ₅	----	0.5-1

Fuente: <http://www.tfrc.gov/hnr20/recycle/waste/ssa1.htm>

1.4 Usos de la escoria de acería

1.4.1 Internacional

El uso de la escoria en obras civiles es una práctica antigua, está incluida en las especificaciones de construcción vial de varios países, y en su manejo son aplicables los equipos de construcción que se utilizan para cualquier agregado.

En el Reino Unido se ha utilizado en capas bases y pavimentos asfálticos, las calles del norte de Londres y áreas alrededor de Coventry y Birmingham han sido pavimentadas con escoria durante más de 50 años.

En Estados Unidos la experiencia supera los cuarenta años, cabe citar que debido a los buenos resultados con el uso del agregado, las autoridades aeronáuticas, hace varios años autorizaron la utilización de 750,000 toneladas de escoria de acería para la base de la pista de aterrizaje del aeropuerto internacional de Pittsburg, el que ha cumplido su función desde entonces.

Son también utilizadas frecuentemente en Australia, Japón, India, México, Brasil, Chile y algunos países europeos. En Brasil la pavimentación de la nueva ciudad de Mogi das Cruces, Sao Paulo, se hizo enteramente con escoria de acería, con excelentes resultados. La Br381, una de las carreteras más transitadas del país, fue asfaltada en gran parte con escoria.

En el sur de Chile, carreteras que tienen que soportar el gran peso por eje de camiones que sirven a la industria maderera, están usando escoria en las bases. Además del uso en mezclas asfálticas, la escoria se aplica extensamente como riego de sello en obras de tratamiento superficial.

1.4.2 Nacional

Siderúrgica de Guatemala S.A. (SIDEGUA), empresa que se dedica al refinamiento de chatarra para producir acero, su planta se encuentra ubicada en el municipio de Masagua, departamento de Escuintla, en donde se producen 300 toneladas de escoria por mes. En conjunto con Multiserv empresa que procesa la misma han impulsado su uso como agregado para proyectos de construcción. Se han trabajado diferentes proyectos entre estos:

- Estabilización de calles de la planta de Sidegua. 2003
- Estabilización de calle principal del Ingenio Pantaleón, 2003.
- Estabilización de calle en Ingenio la Unión, 2004
- Estabilización de camino en Finca Venecia, Mazatenango, 2004.
- Construcción de la base del camino de ingreso a la Comunidad El Astillero, Masagua Escuintla, 2004.

Además en el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos, se han hecho trabajos de investigación, con la escoria como sujeto de estudio, entre los cuales se pueden mencionar:

- Caracterización de la escoria de hornos de la planta de Sidegua como puzolana artificial. Edgar Francisco Solórzano Jiménez.

- Evaluación de morteros para albañilería y revestimientos elaborados a base de cementos mezclados con escoria de horno. Kenneth Molina Escobar.
- Evaluación de bloques huecos de mampostería fabricados con cementos mezclados con escoria de hornos. David Estuardo Álvarez.
- Evaluación de concretos mezclados con cemento Pórtland y escoria. Mauro Ortega.
- Desarrollo y aplicaciones de los cementos mezclados hidráulicos. Oscar Rodrigo Godoy.
- Evaluación técnica y económica del uso de cementos mezclados con escoria en la elaboración de ornamentales. Enrique de León.

Tabla IV Escoria de acería comercializada por Multiserv

GRANULOMETRÍA	TAMAÑO	Precio por tonelada
A	1" ½ a 3"	Q 23.00
B	¾" a 1 ½"	Q 23.00
C	¾" a finos.	Q 23.00
Tamaño superior	Mayor a 3"	Q 23.00

Fuente: Oficinas de Multiserv S. A., 2007

1.5 Ventajas y desventajas del uso de escoria en proyectos viales

1.5.1 Desventajas

Su alto valor de peso unitario en estado suelto (mayor a 1900 kg/m³) y al ser compactada como mezcla asfáltica (cerca de los 3000 kg/m³) pueden incidir en el costo adicional en el transporte y en el valor de mezcla asfáltica por m².

Algunos contratistas han esgrimido que por provenir del acero, ocasiona un desgaste más rápido de los elementos de trabajo, esto no ha sido tomado en cuenta ya que no se ha registrado esta diferencia.

1.5.2 Ventajas

1.5.2.1 En mezclas asfálticas

El uso de escoria en mezclas asfálticas, brinda a los pavimentos características que mejoran su desempeño con respecto a los elaborados con agregados tradicionales. Algunas de estas son:

- Alta resistencia al deslizamiento a lo largo de su vida de servicio. Valores típicos de resistencia al deslizamiento (Skid Number SN) de 56 después de 235,000 ciclos y de 51 después de 1,500,000 ciclos.
- Permanencia en el color de la mezcla a través del tiempo, lo cual garantiza mejor visibilidad de la señalización horizontal.
- La característica de mayor retención de la temperatura de la mezcla (menor tasa de enfriamiento) significa que pueden lograrse mezclas con menor temperatura inicial en el caso de grandes distancias de acarreo. Esta propiedad también ayuda en la trabajabilidad de la mezcla durante su colocación, ya que se alargan los períodos de compactación.

- Estabilidad Marshall elevada, presentando menores posibilidades de fallas por ahuellamiento.
- Excelentes propiedades de afinidad con el cemento asfáltico, lo cual significa muy poca “denudación de la mezcla” ante los efectos del clima y tráfico.
- El bajo costo de la escoria la hace competitiva ante las mezclas convencionales, aún cuando su mayor peso unitario actúa en su contra.

1.5.2.2 En tratamientos superficiales

La escoria presenta excelentes propiedades en su empleo como tratamiento superficial, entre estas:

- Su alto y permanente valor de coeficiente de roce, proporciona mayor agarre entre el pavimento y los neumáticos de los vehículos, es decir menor posibilidad de patinaje.
- La permanencia del color oscuro, significa mayor visibilidad de la demarcación horizontal.
- Excelente afinidad hacia el asfalto, es decir su excelente adherencia, no se desprende de la superficie del tratamiento ante el efecto del tráfico.
- Compatibilidad con cualquier tipo de asfalto, desde los cementos asfálticos hasta las emulsiones.
- Alta resistencia al pulimento, lo que garantiza también que se mantiene la forma irregular y la textura áspera de las partículas, con su beneficio adicional sobre la buena adherencia.

1.5.2.3 En bases granulares

La escoria de acería conforma el mejor agregado que pueda ser utilizado en la construcción de bases granulares, ya sea en mezclas 100% escoria o en mezclas con polvillo de cantera o arena, debido a:

- Bajo costo comparado con cualquier otro material pétreo de la zona.
- Excelente valor de CBR (150%-300% en la escoria contra 85%-100% en los agregados pétreos tradicionales) proporcionando mayor durabilidad ante la misma intensidad de cargas y espesor de construcción o la posibilidad de reducir el espesor de la capa de base.
- Permanencia de la estabilidad de la base granular, debido a la mayor resistencia mecánica de la escoria.
- Mejor comportamiento ante el efecto del agua, debido a la inexistencia de fracción fina plástica en las escorias.
- Reducción de los espesores de pavimentos asfálticos requeridos sobre una capa base de escoria.

2. MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1 Generalidades

Las mezclas asfálticas están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonado. Se producen en centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y compactan.

Se usan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los pavimentos para tráfico pesado intenso.

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

2.1 Tipos

2.1.1 Mezclas asfálticas en frío

Son las fabricadas con emulsiones asfálticas y su principal campo de aplicación es la construcción y la conservación de carreteras secundarias. Se caracterizan por mantener su trabajabilidad durante semanas tras ser producidas, lo cual se debe a que el ligante permanece un largo período de tiempo con una viscosidad baja, debido a que se emplean emulsiones con asfalto fluidificado.

El aumento de la viscosidad es muy lento en los acopios, haciendo viable el almacenamiento, pero después de la puesta en obra en una capa de

espesor reducido, el endurecimiento es relativamente rápido en las capas ya extendidas debido a la evaporación del fluidificante.

2.2.2 Mezclas asfálticas en caliente (MAC)

Combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo polvo mineral y eventualmente aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los agregados (excepto ocasionalmente el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura de 132° C.

El agregado mineral ligado por el material asfáltico, actúa como un esqueleto pétreo que aporta resistencia y rigidez al sistema. Al incluir la mezcla asfáltica tanto ligante asfáltico como agregado mineral, su comportamiento es afectado por las propiedades individuales de cada componente y por la interrelación de aquellos dentro del sistema.

2.2.2.1 Composición

2.2.2.1.1 Cemento asfáltico

Material cementante, entre carmelito oscuro y negro, en el cual los constituyentes predominantes son bitúmenes que aparecen en la naturaleza o se obtienen en el procesamiento del petróleo.

2.2.2.1.2 Agregado mineral

También conocido como roca, material granular, es cualquier material mineral duro e inerte, usado en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente.

2.2.2.2 Características

El análisis de una muestra de mezcla en el laboratorio para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento, está enfocado hacia tres características y la influencia que puedan tener en su comportamiento.

- Densidad de la mezcla.
- Vacíos en el agregado mineral.
- Contenido de asfalto.

2.2.2.2.1 Densidad

Está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de mezcla). Es una característica muy importante para el supervisor, debido a que es esencial para la durabilidad del pavimento, se expresa generalmente en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3).

Es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000kg/m^3). El valor obtenido en el laboratorio se convierte en la densidad patrón y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es adecuada.

Las especificaciones usualmente requieren que sea un porcentaje de la densidad de laboratorio. Esto se debe a que muy rara vez, la compactación in-situ logra las densidades que se obtienen usando métodos normalizados de compactación de laboratorio.

2.2.2.2.2 Vacíos en el agregado mineral (VMA)

Son los espacios de aire que existen entre las partículas del agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VMA representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde por absorción en el agregado) y el volumen de vacíos necesarios en la mezcla.

Cuanto mayor sea el VMA, más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durable será la mezcla. Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VMA por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto y en mezclas de baja durabilidad y apariencia seca.

Por lo tanto es contraproducente y perjudicial para la calidad del pavimento, disminuir el VMA para economizar el contenido de asfalto.

2.2.2.2.3 Contenido de asfalto

La porción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio y luego controlada con precisión en la obra. El contenido de asfalto de una mezcla particular se establece usando los criterios dictados por el método de diseño seleccionado.

Depende, en gran parte de las siguientes características del agregado:

- La granulometría del agregado está directamente relacionada con el mismo. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor

será el área superficial total, y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente todas las partículas.

- La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto, es más pronunciada cuando hay relleno mineral (fracciones muy finas de agregado que pasan el tamiz No. 200). Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral pueden absorber literalmente, gran parte del contenido de asfalto, resultando en una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen efecto contrario: poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda).
- La capacidad de absorción del agregado usado en la mezcla, es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que añadir suficiente asfalto a la mezcla para permitir absorción, y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto.

Los técnicos hablan de dos tipos de asfaltos:

- Contenido total de asfalto:
Es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la misma.
- Contenido efectivo de asfalto:
Es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre la superficie de los agregados. Se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

3. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

3.1 Método Hveem (AASHTO T246)

3.1.1 Antecedentes

Los conceptos del método Hveem de diseño de mezclas de pavimentación fueron desarrollados en 1940 por Francis N. Hveem, Ingeniero de materiales e investigación con la división de carreteras de California.

Abarca la determinación de un contenido aproximado de asfalto por medio del ensayo Equivalente Centrífugo de Kerosene, y luego el sometimiento de probetas con este contenido de asfalto, a un ensayo de estabilidad. También se efectúa un ensayo de expansión sobre una probeta que ha sido expuesta al agua, los ensayos están regidos por la norma AASHTO T246.

Este procedimiento continúa siendo el principal método de diseño usado en California y en algunos otros estados de los Estados Unidos.

3.1.2 Propósito

Determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. También provee información sobre las propiedades de la mezcla asfáltica. Solo se aplica a mezclas asfálticas en caliente que usan cemento asfáltico clasificado por viscosidad o penetración y que contienen agregados con tamaño máximo de 25.0 mm. (1")

3.2 Método Marshal (AASHTO T245)

3.2.1 Antecedentes

El concepto del método Marshall de diseño de mezclas de pavimentación fue desarrollado por Bruce Marshall, ex-ingeniero de la sección de bitúmenes del Departamento de carreteras del estado de Mississippi.

Surgió de una investigación iniciada por el cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en 1943. Varios métodos fueron comparados y evaluados para desarrollar uno simple.

A través de una extensa investigación de pruebas de tráfico y estudios de correlación en el laboratorio, el Cuerpo de Ingenieros mejoró y agregó ciertos detalles al procedimiento y posteriormente desarrolló los criterios de diseño de mezclas.

El Cuerpo de Ingenieros decidió adoptar el método Marshall, para diseño y control de pavimentos asfálticos en el campo, debido en parte a que este utiliza equipo portátil.

3.2.2 Propósito

Determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. También provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, establece densidades y contenidos óptimos de vacíos que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento.

3.2.3 Descripción.

Usa especímenes normalizados de 64 mm. de espesor por 102 mm. de diámetro. Cada uno con la misma combinación de agregados pero con diferente contenido de asfalto, son preparados usando procedimientos específicos para calentar, mezclar y compactar mezclas asfálticas.(ver tabla V)

Figura 2. Especimen de ensayo, método Marshall. AASHTO T-245.



Fuente: Laboratorio de ASFALGUA.

Figura 3. Aparato de compactación método Marshall. AASHTO T-245



Fuente: Laboratorio de ASFALGUA.

Los resultados más importantes del método son:

- Análisis de la relación vacíos-densidad.
- Una prueba de estabilidad-flujo de la muestra compactada.

Tabla V. Requisitos para la mezcla de concreto asfáltico en caliente. AASHTO T245

Parámetro	Valores Límites	
	Mínimo	Máximo
Número de golpes de compactación en cada extremo del espécimen.	75	75
Estabilidad	5338 N (1200 libras)	NA
Fluencia en 0.25mm (0.1 pulg.)	8	16
Relación estabilidad/fluencia	120	275
Porcentaje de vacíos de la mezcla compactada	3	5
Porcentaje de vacíos en agregado mineral	(ver tabla VI)	
Porcentaje de vacíos rellenos con asfalto	65	78
Relación finos/bitumen	0.6	1.6
Sensibilidad a la humedad (Resistencia retenida)	80%	NA

Fuente: Adaptado de Especificaciones Generales Para Construcción de Carreteras y Puentes, Dirección General de Caminos, Septiembre ,2001.

Tabla VI. Vacíos en el Agregado Mineral (VAM).

% de vacíos con aire	3%	4%	5%
Tamaño nominal máximo del agregado en mm	Porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM)		
9.50	14	15	16
12.50	13	14	15
19.00	12	13	14
25.00	11	12	13
37.50	10	11	12
50.00	9.5	10.5	11.5

Fuente: Adaptado de Especificaciones Generales Para Construcción de Carreteras y Puentes, Dirección General de Caminos, Septiembre ,2001

3.3 Propiedades consideradas en el diseño

Las buenas mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logran obtener las propiedades deseadas. Estas incluyen estabilidad, durabilidad, impermeabilidad, trabajabilidad, flexibilidad, resistencia a la fatiga y resistencia al deslizamiento. El objetivo primordial del procedimiento de diseño de mezclas es garantizar que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades.

3.3.1 Estabilidad

Es la capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma bajo cargas repetidas; un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señales que indican cambios en la mezcla.

Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tráfico, debido a que las especificaciones dependen de este. Valores altos de estabilidad producen pavimentos demasiado rígidos y por lo tanto, menos durables que lo deseado.

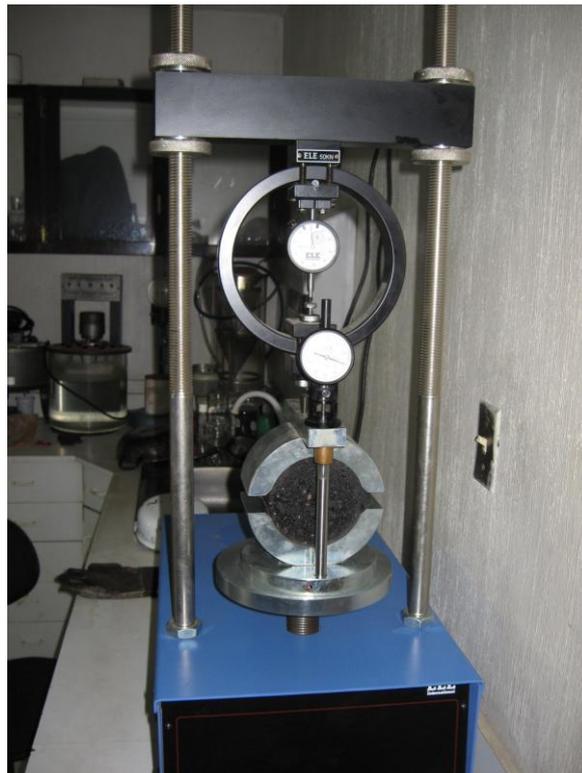
La estabilidad en una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna. La cohesión interna, en las partículas del agregado está relacionada con sus características tales como: forma y textura superficial, resulta de la capacidad ligante del asfalto. Un grado propio de fricción interna y cohesión interna en la mezcla, previenen que las partículas del agregado se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico.

En términos generales, entre más angular sea la forma de las partículas del agregado y más áspera sea su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla.

La fuerza ligante de la cohesión interna aumenta conforme aumenta la frecuencia de la carga (tráfico). La cohesión también aumenta a medida que la viscosidad del asfalto aumenta, o a medida que la temperatura del pavimento disminuye.

Adicionalmente y hasta cierto nivel, la cohesión aumenta conforme aumenta el contenido de asfalto. Cuando se sobrepasa este nivel, el aumento en el contenido de asfalto produce una película demasiado gruesa sobre las partículas del agregado, lo cual resulta en pérdida de fricción entre ellas.

Figura 4. Máquina de estabilidad, método Marshall. AASHTO T-245.



Fuente: Laboratorio de ASFALGUA

3.3.2 Durabilidad

Es la habilidad para resistir factores como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto y separación de la película de asfalto. Estos pueden ser el resultado de la acción del clima, el tráfico o una combinación de ambos.

Generalmente la durabilidad de una mezcla puede ser mejorada de tres formas:

- Usando la mayor cantidad posible de asfalto:
 - Aumenta la durabilidad porque las películas gruesas de asfalto no se envejecen o endurecen tan rápido como lo hacen las películas delgadas. En consecuencia, el asfalto retiene, por más tiempo sus características originales, además sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración de aire y agua. Por supuesto, se debe dejar un cierto porcentaje de vacíos en el pavimento para permitir la expansión del asfalto en los tiempos cálidos.
- Utilizando una graduación densa de agregados resistente a la separación :
 - Contribuye de tres maneras a la durabilidad del pavimento:
 - Proporciona un contacto más cercano entre las partículas del agregado, lo cual mejora la impermeabilidad de la mezcla.
 - Un agregado firme y duro resiste la desintegración bajo las cargas del tráfico.
 - Un agregado resistente a la separación resiste la acción del agua y el tráfico, las cuales tienden a separar la película de asfalto de las partículas del agregado, conduciendo a la desintegración del pavimento. La resistencia a la separación de una mezcla puede ser mejorada bajo ciertas condiciones, mediante el uso de compuestos adhesivos o rellenos minerales como la cal hidratada.

- Compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad:
La intrusión de aire y agua en el pavimento puede minimizarse si se diseña y compacta la mezcla para darle la máxima impermeabilidad posible.

3.3.3 Impermeabilidad

Es la resistencia al paso del aire y agua hacia su interior o a través de la mezcla. Esta característica se relaciona con el contenido de vacíos de la mezcla compactada. Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos es más importante que su cantidad. El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.

Es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. Esto es aceptable, siempre y cuando esté dentro de los límites especificados.

3.3.4 Trabajabilidad

Es la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar.

Las mezclas gruesas tienen una tendencia a segregarse durante su manejo y también pueden ser difíciles de compactar. Un contenido demasiado alto de relleno mineral también puede afectar la trabajabilidad y ocasionar que la mezcla se vuelva muy viscosa, haciendo difícil su compactación.

La trabajabilidad es especialmente importante en sitios donde se requiere colocar y rastrillar a mano cantidades considerables de mezcla, como por ejemplo alrededor de tapas de alcantarillado, curvas pronunciadas y otros obstáculos similares.

Las mezclas que son fácilmente trabajables o deformables se conocen como mezclas tiernas, son demasiado inestables para ser colocadas y compactadas apropiadamente. Usualmente son el resultado de la falta de relleno mineral, demasiada arena de tamaño mediano, partículas lisas y redondas de agregados y demasiada humedad en la mezcla.

Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad del asfalto, una temperatura demasiado baja hará que sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta podrá hacer que la mezcla se vuelva tierna, lo que dificulta su compactación debido a que será muy fluida. El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla.

3.3.5 Flexibilidad

Es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico, debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan o se expanden, producto de cambios volumétricos del suelo.

Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto, es generalmente más flexible que una densamente graduada con bajo contenido de asfalto. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos.

3.3.6 Resistencia a la fatiga

Es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas del tráfico. Se ha demostrado por medio de la investigación, que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos aumenta ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento disminuye. Así mismo, un pavimento que contiene asfalto envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga.

Las características de resistencia y espesor del pavimento, así como la capacidad de soporte de la subrasante, tienen mucho que ver con la vida y con la prevención del agrietamiento asociado con cargas de tránsito. Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto bajo las cargas, como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre subrasantes débiles.

3.3.7 Resistencia al deslizamiento.

Es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de los neumáticos de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener el contacto con las partículas del agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento. Se mide en campo con una rueda normalizada bajo condiciones controladas de humedad en la superficie del pavimento y a una velocidad de 65 km/hr.

Una superficie de pavimento áspera y rugosa tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una lisa. Además de tener una superficie áspera, los agregados deben resistir el pulimento (alisamiento) bajo el tránsito. Los

agregados calcáreos son más susceptibles al pulimento que los agregados silíceos. Las mezclas inestables que tienden a deformarse o a exudar presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento.

4. AGREGADOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS

4.1 Definición

Es cualquier material mineral duro e inerte, usado en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente.⁵

4.2 Tipos

4.2.1 Según su tamaño

4.2.1.1 Finos

Fracción del agregado que pasa el tamiz No.4

4.2.2.2 Gruesos

Fracción del agregado que es retenida en el tamiz No.4

4.2.2 Según su origen

4.2.2.1 Naturales

Son gravas y arenas encontradas en depósitos de ríos o minas, y son empleadas sin ningún procesamiento adicional, salvo el tamizado o lavado, en caso de que ello sea necesario.

⁵ Principles of Construcción of Hot-Mix Asphalt Pavements. Asphalt Institute Manual Series No.22. 1997.

4.2.2.2 Procesados.

Son gravas o rocas que se someten a procesos de trituración y cernido para lograr incrementar su resistencia, mejorar su granulometría, reducir el tamaño máximo de las partículas, cambiar su forma y mejorar su textura superficial.

4.2.2.3 Estabilizados.

Son materiales locales que por no lograr alcanzar propiedades físicas que les permitan ser empleados en las capas del pavimento, son mejorados mediante la incorporación de agentes externos tales como cemento, cal, asfaltos emulsionados o aceites sulfonados.

4.2.2.4 Artificiales (o sintéticos)

Son aquellos que provienen de la modificación físico-química de materiales naturales o son subproducto de algún proceso industrial tal es el caso de la escoria de acería.

4.3 Características deseables.

Independientemente del tipo de mezcla asfáltica, las siguientes propiedades son deseables en los agregados que la constituyen:

- Granulometría y tamaño adecuado.
- Resistencia y durabilidad.
- Forma cúbica.
- Baja porosidad.
- Textura superficial adecuada.
- Buena adherencia.
- Limpieza.

4.3.1 Granulometría y tamaño.

Una de las características más importantes de los agregados que afecta la estabilidad y la trabajabilidad de las mezclas es la granulometría.

De acuerdo con esta los materiales pueden clasificarse en:

- Densamente gradados:

Son agregados que contienen cantidades adecuadas de todos los tamaños, de grueso a fino, proporcionados de tal forma de obtener una mezcla densa con pocos vacíos. Las mezclas densamente gradadas tienen un gran número de puntos de contacto entre partículas, que pueden dar una alta resistencia friccional y reducir la posibilidad de trituración de las partículas en los puntos de contacto. Como el contenido de vacíos es bajo son poco permeables.

- Granulometrías abiertas.

Son materiales con una gradación incompleta, que contienen menos finos que las densas. El número de puntos de contacto es menor que en éstas y por ello los esfuerzos entre las partículas son superiores.

- Granulometrías Discontinuas.

Son agregados que presentan discontinuidades o saltos en su gradación.

- Granulometrías Uniformes:

Estos materiales están constituidos por agregados de prácticamente un tamaño; y son generalmente utilizados en sellos y tratamientos superficiales.

**Tabla VII Graduación de agregados para pavimentos de Concreto
Asfáltico ASTM C-136, (AASHTO T-27 y T-11)**

Tamaño del Tamiz	Porcentaje en masa que pasa el tamiz designado (AASHTO T-27 y T-11)					
	A(50.8mm)	B(38.1mm)	C(25.4mm)	D(19mm)	E(12.5mm)	F(9.5mm)
	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"
63	100					
50	90-100					
38.1	-	100	100			
25	60-80	90-100	90-100	100		
19	-	-	-	90-100	100	
12.5	35-65	56-80	56-80	-	90-100	100
9.5	-	-	-	56-80	-	90-100
4.75	17-47	-	29-59	35-65	44-74	55-85
2.36	10-36	15-41	19-49	23-49	28-58	32-67
0.3	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23
0.075	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10

Fuente: Adaptado de Especificaciones Generales Para Construcción de Carreteras y Puentes, Dirección General de Caminos, Septiembre ,2001

4.3.2 Resistencia y durabilidad.

Los agregados deben ser lo suficientemente estables ante los efectos de manipuleo y compactación en las etapas de construcción y ante los esfuerzos impuestos por las cargas en el período de acción bajo el tráfico. Estos tienden a triturar y a degradar las partículas. La habilidad de un material para mantener su granulometría original ante ellos, se define como resistencia.

El ensayo que se utiliza para medir la resistencia de los agregados a estos efectos y esfuerzos es el de Resistencia del agregado a la degradación por abrasión e impacto por medio de la maquina de los Ángeles.

Deben ser resistentes a la disgregabilidad, es decir a la acción química que produce la rotura y degradación de las partículas, lo cual normalmente sucede y acelera en la presencia de agua.

El efecto de la disgregación es menos severo en mezclas asfálticas que en los agregados no tratados, ya que la película de ligante protege al agregado y minimiza el proceso. La durabilidad de los materiales se evalúa, por el ensayo de Desintegración de agregados utilizando sulfato de sodio o de magnesio, AASHTO T-104.

4.3.3 Forma de las partículas.

La estabilidad de las mezclas depende en un grado muy alto, de la trabazón de los agregados.

Las mayores estabilidades se alcanzan cuando las partículas tienen forma cúbica u octaédrica, es decir “angular”, debido a que oponen mayor resistencia a su desplazamiento ante el efecto de una carga. En las mezclas con granulometría continua la angularidad de las partículas finas es más importante que para la de las gruesas, debido al mayor número de puntos de contacto que logran la trabazón.

Las partículas alargadas o planas son indeseables, ya que aún cuando resisten el manipuleo, tienden a romperse y degradarse bajo los efectos de la compactación y del tráfico; por esta razón las normas limitan su contenido a porcentajes bajos.

Los agregados con partículas de forma redondeada son de más fácil compactación, con lo que se logran, aparentemente mayores zonas de contacto entre las mismas. Obteniéndose mayor estabilidad, pero debido a su forma, son muy susceptibles a “rodar” o desplazarse al ser sometidas al tráfico, es decir a largo plazo tienden a deformarse.

4.3.4 Textura superficial

Se considera que la textura superficial (rugosidad) de los agregados es el principal contribuyente en la resistencia de las mezclas asfálticas a su deformación (llamada estabilidad), debido a la fricción que se desarrolla entre las diversas partículas como consecuencia del grado de textura que presentan los granos.

La textura es más importante que la angularidad del agregado en la estabilidad de una mezcla, lo cual se atribuye a que entre las partículas, más que “puntos de contacto” existen “zonas de contacto” y por ello, mientras más rugosa es su superficie más difícil es el desplazamiento de una sobre otra. Adicionalmente, una superficie pulida presenta poca habilidad para mantener la película de asfalto adherida al agregado.

Cuando una grava se tritura, alcanza una mayor estabilidad, no sólo por la angularidad que se logra en las partículas, sino por la microrugosidad que tienen las caras fracturadas.

4.3.5 Porosidad.

Se define como la propiedad de absorción de asfalto que tienen los agregados. Es conveniente que estos sean algo porosos, para que el asfalto “penetre” dentro de ellos y se adhiera mecánicamente a las partículas, lo cual ayuda a evitar el desplazamiento de las mismas ante el efecto de las cargas, y a la pérdida de ella ante la presencia y efecto del agua.

Los agregado muy porosos, sin embargo, al absorber mucho asfalto, requieren contenidos muy elevados de ligante para mantener su contenido efectivo, lo cual puede resultar antieconómico.

4.3.6 Adherencia.

Es la propiedad de un agregado para mantener sobre él la película de asfalto añadida. Depende no sólo del agregado, su textura y composición química, también en parte importante del asfalto en si. Para que una mezcla sea durable, debe existir una buena adherencia entre el agregado y el asfalto, para que se evite la separación de la película de asfalto en presencia de agua.

Los materiales hidrófobos, aquellos que repelen la humedad, son los que mejor adherencia tienen con el asfalto y son de naturaleza básica, como las calizas.

4.3.7 Limpieza

Los agregados gruesos deben estar limpios, sin partículas de polvo o arcillas que los recubran, ya que esto afecta negativamente la efectiva adherencia del asfalto.

El agregado fino no debe contener cantidades perjudiciales de arcillas, o de tamaños excesivamente pequeños. Este requisito se controla mediante el ensayo de equivalente de Arena (AASHTO T-176), cuya ejecución es un requisito indispensable si se quiere obtener una mezcla asfáltica adecuada.

4.4 Caracterización de agregados

4.4.1 Agregado grueso

- **Granulometría ASTM C-136 (Método estándar para el análisis de agregados por tamizado):** Esta norma cubre la determinación de la distribución del agregado fino y grueso por tamizado.
- **Gravedad específica ASTM C-127, C-128 (Método estándar para determinar la gravedad específica y el porcentaje de absorción**

de agregado fino y grueso): Esta norma cubre la determinación de la gravedad específica y absorción de agregados. La gravedad específica puede ser expresada como gravedad específica bulk (gsb), gravedad específica aparente (gsa). La gsb y el porcentaje de absorción son realizados a agregados que han sido sumergidos en agua durante un período de 24 horas.

- **Prueba de Abrasión ASTM C-131, C-535 (AASHTO T-96) (Resistencia del agregado a la degradación por abrasión e impacto por medio de la máquina de los Ángeles):** Esta norma cubre el procedimiento para evaluar el desgaste para agregados finos y gruesos. El desgaste máximo permisible es de 35%, de acuerdo a la graduación del material existen 4 tipos de abrasión. (ver tabla VIII).

Tabla VIII. Tipos de Abrasión

Tipo	Retenido	Peso (gr.)	No. De Esferas	Revoluciones	Tiempo (min.)
A	1", ¾", ½", y 3/8"	1250±10	12	500	17
B	½" y 3/8"	2500±10	11	500	17
C	¼" y No. 4	2500±10	8	500	17
D	No. 8	2500±10	6	500	17

Fuente. Adaptación de Stándar Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. AASHTO 1998. Vol 2.

- **Partículas planas y Alargadas ASTM D-4791 (Partículas planas y alargadas en agregados):** Esta norma cubre el procedimiento para evaluar el porcentaje de partículas planas y alargadas en una muestra de agregado. El porcentaje máximo permisible de partículas planas y alargadas es de 8%.

4.4.2 Agregado Fino

- **Equivalente de Arena AASHTO T-176 (Método de prueba estándar para el valor de equivalente de arena en suelos y agregados fino):** Esta norma cubre el procedimiento para conocer la relación de material arcilloso o fino en una fracción del agregado. Esta prueba se realiza únicamente a agregados que pasan el tamiz No. 4. El término equivalente de arena se refiere a que la mayoría de suelos granulares así como agregados finos, son una mezcla de partículas de arena y generalmente partículas indeseables de arcilla, finos y polvo. Para su utilización en pavimentos asfálticos, el agregado debe tener como mínimo un 35% de equivalente de arena.
- **Índice Plástico AASHTO T-90 (Método de prueba estándar para determinar el valor de índice plástico en suelos granulares y agregados finos):** Este ensayo se utiliza para determinar el contenido de agua en suelos o agregados, de acuerdo al cual el suelo o agregado pasa de un estado plástico a un estado líquido. Para su uso en carreteras, es permisible hasta un máximo de 4% como límite plástico.
- **Desintegración al sulfato de Sodio AASHTO T-104 (Desintegración de agregados utilizando sulfato de sodio o de magnesio):** Esta norma cubre el procedimiento para evaluar la desintegración del agregado cuando es sometido a efectos climáticos. Se realiza mediante inmersiones del agregado en una solución de sulfato de sodio o de magnesio y posteriormente el material es secado en un horno. Las fuerzas internas derivadas de la constante rehidratación del material simulan la expansión del agua en casos de lluvia o estados de congelamiento. El porcentaje máximo permisible es de 12%.

5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.1 Muestreo

Se realizó en las instalaciones de la planta de SIDEGUA en los apilamientos de Multiserv S.A., el material muestreado fue escoria de acería tamaño $\frac{3}{4}$ " a 0" (presentación comercial).

Además se utilizaron agregados de AGREGUA (Agregados de Guatemala) de su planta Palín Oeste. El muestreo de los mismos se realizó en los apilamientos de ASFALGUA (Asfaltos de Guatemala).

5.2 Caracterización de materiales

5.2.1 Cemento asfáltico

Es de tipo AC-20 clasificado según su viscosidad, extraído de la refinería La libertad ubicada en el municipio de La Libertad en el departamento de Petén y comercializado por la empresa ProIn Asfaltos.

5.2.2 Agregados

Las pruebas realizadas están dentro de las ESPECIFICACIONES GENERALES PARA CONSTRUCCION DE CARRETERAS Y PUENTES, 2001 sección 401 "pavimentos de concreto asfáltico en caliente", reguladas por la Dirección General de Caminos, están normadas por AASHTO y ASTM. Se realizaron en el Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos y en el Laboratorio de Asfaltos de Guatemala.

5.2.2.1 Agregados tradicionales

Son de tipo basáltico, triturados en la planta Palín Oeste de AGREGUA. Estos agregados son utilizados por ASFALGUA para hacer mezclas asfálticas. Se caracterizaron las presentaciones de 3/8" a 0", 1" a No. 56 y 3/8 lavado.

Para su caracterización se mezclaron en proporción 60%, 30%,10%, luego esta combinación se utilizó en una mezcla asfáltica.

5.2.2.2 Escoria de acería.

Proveniente de la planta de SIDEGUA, es de textura porosa, color café oscuro, con peso mayor al de los agregados tradicionales, no tiene plasticidad, y tiene forma cúbica.

5.3 Diseño de mezclas asfálticas.

Se diseñaron 3 mezclas asfálticas con diferentes proporciones escoria agregado tradicional. Las mezclas se diseñaron de acuerdo al método Marshall, ya que este es el indicado por la Dirección General de Caminos. Los tres diseños son de TMN (tamaño máximo nominal) 19 mm, ya que este es el que mejor se ajusta a la granulometría de la escoria, pues la misma se encuentra en el rango de es esa graduación.

5.3.1 Combinaciones.

Se diseñaron 3 mezclas con las siguientes proporciones:

Tabla IX. Combinaciones de agregado en mezclas asfálticas.

COMBINACION DE AGREGADOS EN LA MEZCLA		
Tipo de mezcla	% ESC.*	%AT. **
A	100	0
B	70	30
C	0	100

*Escoria. **Agregados tradicionales.

5.3.1.1 Justificación.

- Mezcla Tipo A.

Se decidió hacer una mezcla con 100% escoria, con el fin de evaluarla como agregado en la mezcla. La granulometría de la escoria se ajustó a las especificaciones debido a que la misma no era adecuada, esto se debe al bajo porcentaje de finos que posee.

- Mezcla Tipo B.

Para esta mezcla la escoria se combinó con agregado tradicional tipo 3/8" a 0" en proporción 70%, 30%.

Se decidió usar esta proporción para evaluar una mezcla que combine agregados tradicionales con escoria. La granulometría de la escoria combinada con la del agregado tradicional, se ajusta a las especificaciones.

- Mezcla tipo C.

Se utilizó como mezcla control para comparar las características de mezclas con escoria con una mezcla con agregados tradicionales. Se utilizaron agregados tradicionales de 3/8" a 0", 1" a No. 56 y 3/8 lavado, en proporción 60%,30% 10% respectivamente.

5.4 Resultados. (Ver anexos 1 y 2)

5.4.1 Materiales

5.4.1.1 Cemento asfáltico

Tabla X. Resultados de caracterización del cemento asfáltico AC-20.

PRUEBA	RESULTADO
Penetración, 100 gr., 5 seg. , 25°C AASHTO T-49	77 dmm
Penetración, 200 gr, 60 seg., 4 °C AASHTO T-49	5 dmm
Gravedad específica AASHTO T-228	1.063
Punto de flama ASTM D-92	330 °C
Pérdida de masa por calentamiento. AASHTO T-240	0.89 %
Viscosidad cinemática ASTM D-240	441.8 Cst
Viscosidad por viscosímetro capilar de vacíos ASTM D-241	2162.2 P
Recuperación elástica por torsión	3 %
Recuperación elástica por ductilómetro. ASTM D-6084	10 %
Punto de ablandamiento. ASTM T-53	47 °C
Masa/Unidad de volumen AASHTO T-228	8.73 lb./gal

Fuente: Laboratorio de Asfaltos De Guatemala

5.4.1.1.2 Agregados.

Tabla XI. Resultados caracterización de agregados. (Ver anexo 2)

Prueba	Resultado		Especificación
	Escoria	Agregado tradicional	
Abrasión de los Ángeles % ASTM C-131	24.10	21.04	35% Máx.
Desintegración al sulfato de sodio % ASTM C-88	0.36	4.69	12% Máx.
Partículas planas y alargadas % ASTM D-4791	3.00	2.36	8 % Máx.
Gravedad específica ASTM C-128 y C-127	3.16	2.63	****
Equivalente de arena % AASHTO T-176	76.0	77.5	35% Mín.
Índice plástico AASHTO T- 90	NA.	NA	4% Máx.
Granulometría ASTM C-136	No cumple especificación (ver anexo 2)	Cumple especificación (ver anexo 2)	****
Absorción ASTM C-128 y C-127	2.97	0.9	****

5.4.1.2 Mezclas asfálticas.

Tabla XII. Resultados de mezclas asfálticas

Pruebas efectuadas	Símbolo	Resultado			*Especificación
		MEZCLA A	MEZCLA B	MEZCLA C	
Número de golpes por cara en compactación	****	75	75	75	75
% Optimo de asfalto	Pb	7.60	6.25	5.32	****
% Asfalto absorbido	Pba	1.5	1.1	0.46	*****
% Asfalto efectivo	Pbe	6.1	5.2	4.86	*****
% Vacíos de aire	Va	4	4	4	3 --- 5
% Vacíos rellenos de asfalto	Vfa	79.8	76.48	72.7	65 --- 75
% Vacíos agregado mineral	VMA	19.9	17.07	14.87	> 13.0
Estabilidad Marshall	*****	3844.2	3479.0	2650.0	> 1,200
Fluencia Marshall 0.01 plg.	****	18.5	16.0	11.5	8 --- 14
Relación estabilidad/fluencia lb./ 0.01 plg.	REF	207.8	217.4	229.0	120 --- 275
% Resistencia retenida	****	95.71	97.15	91.02	> 80
Relación polvo/asfalto	Dp	0.57	1.12	1.19	0.6 --- 1.6
Grave específica bruta de la mezcla	Gmb	2.74	2.65	2.36	*****
Gravedad específica teórica máxima	Gmm	2.85	2.77	2.46	*****

*Especificaciones Generales Para Construcción de Carreteras y Puentes 2001.

Figura 5. Resultados, porcentaje óptimo de asfalto.

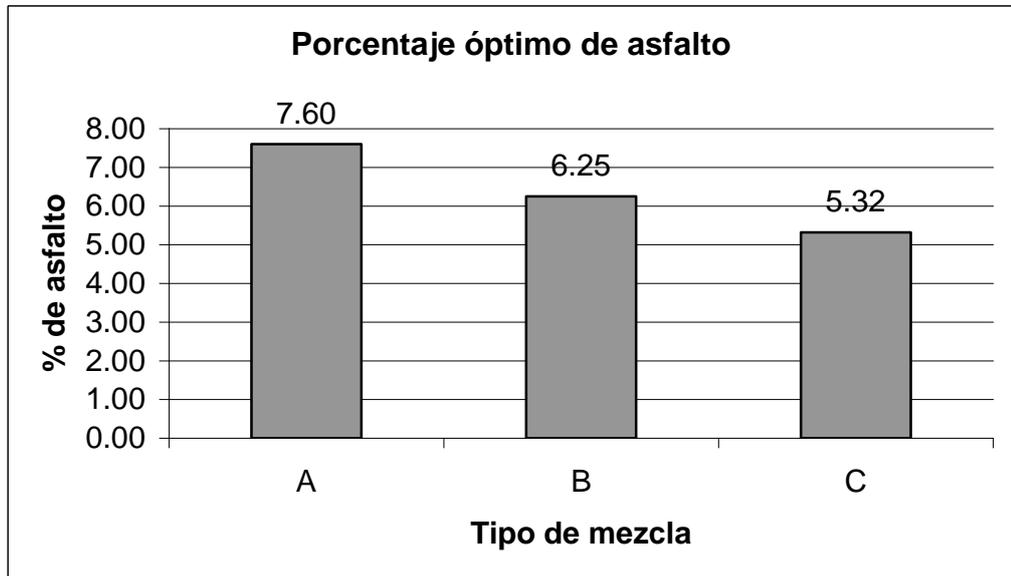


Figura 6. Resultados estabilidad Marshall.

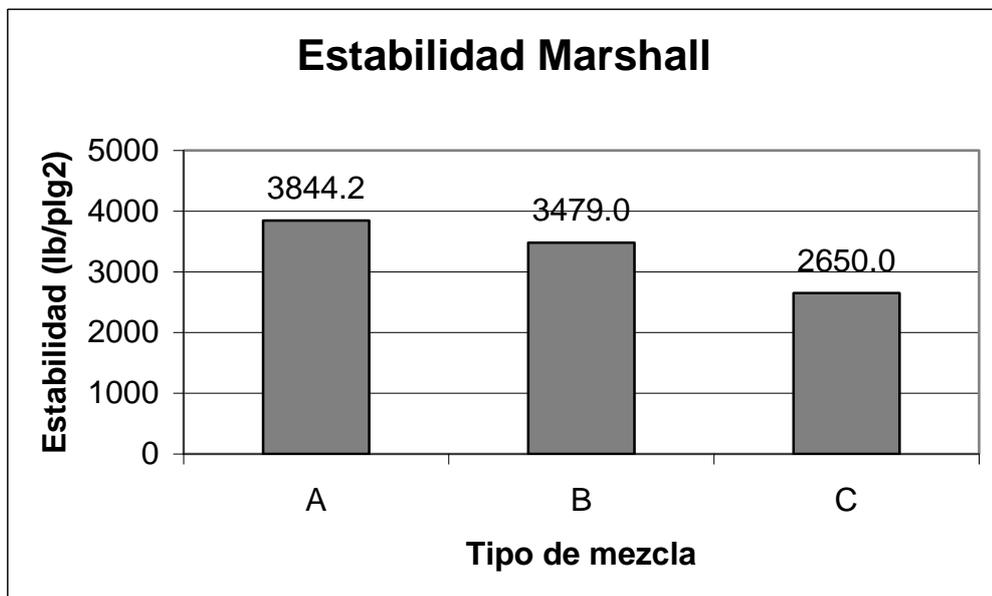


Figura 7. Resultados fluencia Marshall.

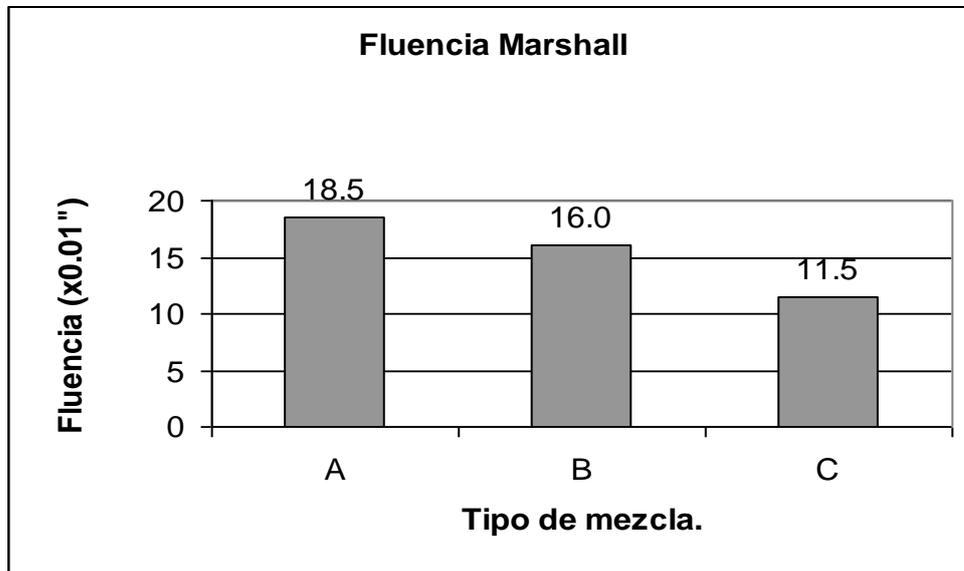


Figura 3. Resultados relación estabilidad/fluencia.

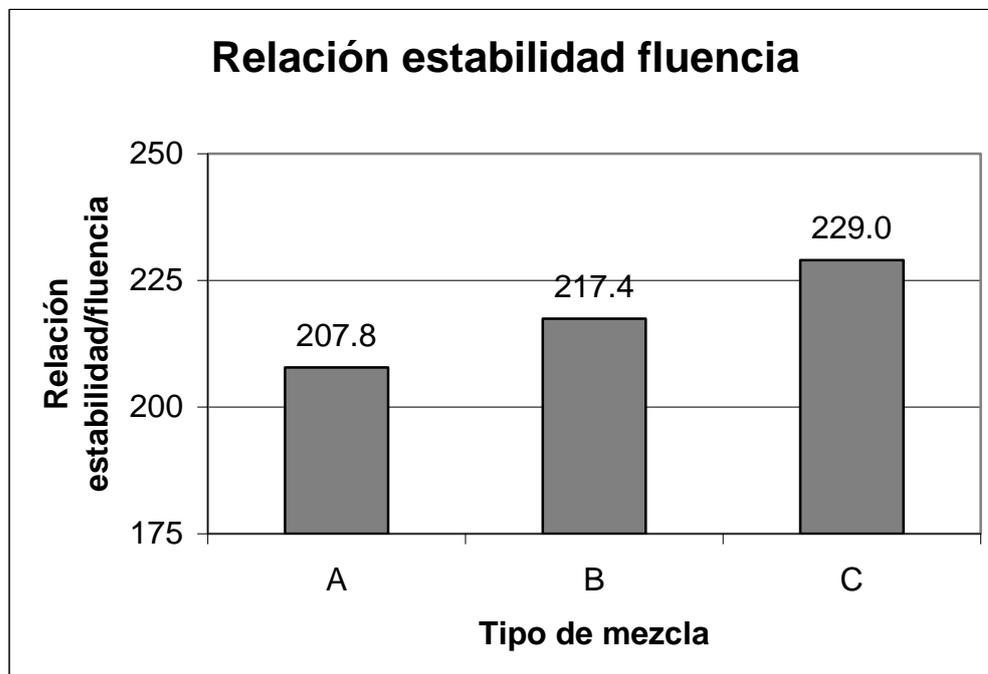
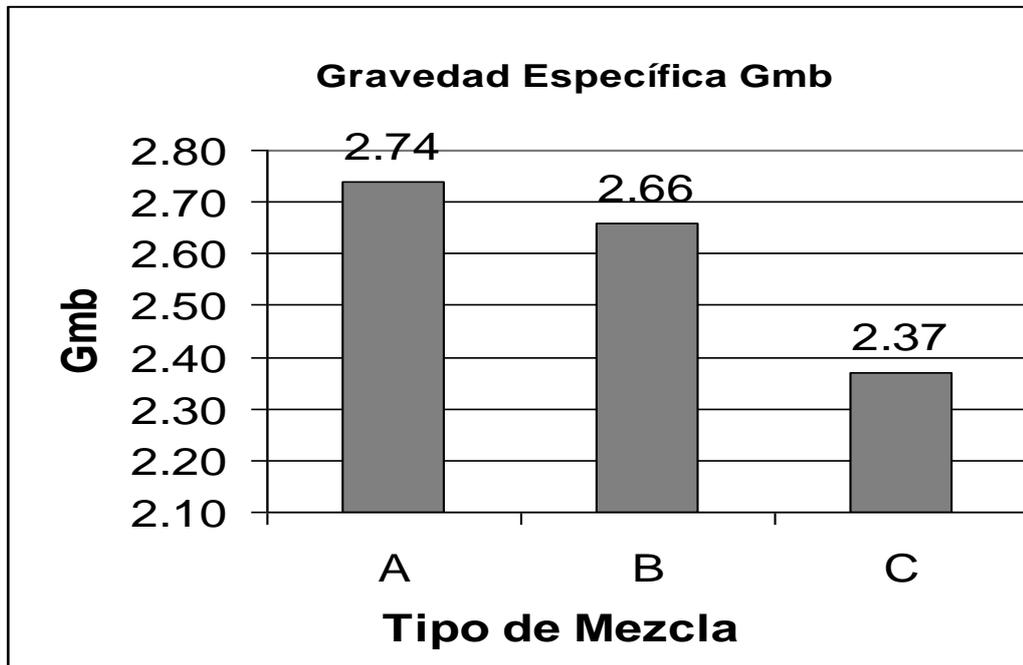


Figura 4. Resultados, gravedad específica.



6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Caracterización de Materiales

6.1.1 Cemento asfáltico

Los resultados del cemento asfáltico cumplen con las especificaciones establecidas por la Dirección General de Caminos en el Libro “Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes” año 2001 (ver tabla X).

6.1.2 Agregados (ver tabla XI)

6.1.2.1 Prueba de abrasión de Los Ángeles

Los resultados son de 21.04% para el agregado tradicional y 24.1 en la escoria, la diferencia entre ellos es de 3.06%. Los dos cumplen con la especificación. Estos valores contribuyen a la durabilidad de la mezcla.

6.1.2.2 Desintegración al sulfato de sodio

Los resultados son de 4.69 % en los agregados tradicionales y 0.36% en la escoria, la diferencia es de 4.33%. Los dos cumplen con la especificación. Estos valores contribuyen a la resistencia a los efectos del clima.

6.1.2.3 Partículas planas y alargadas

EL resultado es de 3.00% en la escoria y 2.36% en los agregados tradicionales. Habiendo una diferencia de 0.64% entre ambos. Los dos cumplen con la especificación.

El resultado tiene incidencia en la durabilidad de la mezcla.

6.1.2.4 Gravedad específica

El resultado de la escoria es de 3.16 y 2.63 de los agregados la diferencia es de 0.53. Los dos cumplen con la especificación. Este valor influye en el costo de transporte de los agregados, pues se transporta mayor peso en relación al mismo volumen de agregado tradicional.

6.1.2.5 Equivalente de arena

El resultado de esta prueba es de 76.0% para la escoria y 77.5% para los agregados tradicionales. Los dos cumplen la especificación.

6.1.2.6 Índice plástico

La prueba no se realizó.

6.1.2.7 Porcentaje de absorción

Para esta prueba el resultado es de 2.97 en la escoria mientras que en los agregados tradicionales es de 0.9. La diferencia es de 2.07 %.

6.2 Mezclas

Se analizan las características más significativas de la mezcla. Las mezclas fueron diseñadas con el método Marshall AASHTO T-245.

6.2.1 Porcentaje óptimo de asfalto

Los resultados de esta prueba son:

M_A , 7.60%, M_B 6.25%, M_C 5.32% todos cumplen con la especificación

6.2.2 Estabilidad Marshall

En esta prueba se obtuvieron estos resultados:

M_A 3844.2 lb. /plg², M_B 3479.0 lb. /plg², M_C 2650.0 lb. / plg². Cumplen con la especificación.

6.2.3 Fluencia Marshall

Los resultados se muestran a continuación:

M_A 0.185 plg., y M_B 0.16 plg. No cumplen la especificación.

M_C con 0.11 plg. Si cumple.

6.2.4 Relación estabilidad fluencia

Se obtuvieron los siguientes resultados:

M_C 229.0 lb./ 0.01 plg, M_B 217.4 lb. / 0.01 plg. M_A 207.8 lb. / 0.01 plg.

Todos cumplen con la especificación.

6.2.5 Gravedad específica

Los resultados se muestran a continuación.

M_A 2.74, M_B 2.66, M_C 2.37.

CONCLUSIONES

1. El porcentaje de absorción en la escoria es mayor al de los agregados tradicionales, esto se traduce en mayor contenido de asfalto.
2. Al combinar la escoria con agregados tradicionales se consigue compensar el bajo porcentaje de finos en la misma y disminuir el porcentaje de asfalto en la mezcla.
3. Cuando la escoria se combina con agregados tradicionales, el contenido de asfalto disminuye conforme aumenta el porcentaje de escoria en la mezcla.
4. Las mezclas con escoria presentan valores más altos de estabilidad que las mezclas con agregados tradicionales.
5. Debido a que las mezclas con escoria presentan valores más altos de estabilidad, las mismas son más resistentes a la deformación causada por el tráfico.
6. La fluencia Marshall aumenta conforme crece la fracción de escoria en la mezcla, esto debido al aumento en el porcentaje de asfalto.
7. Aún cuando los valores de fluencia en M_A y M_B están fuera de especificación, la relación estabilidad fluencia si lo está, debido a los valores altos de estabilidad.
8. Una de las características más importantes es la estabilidad que presentaron las mezclas con escoria, ya que fue más alta que en

las mezclas con agregado tradicional, esto contribuye a la durabilidad del pavimento.

9. El método de diseño Marshall es adecuado para diseñar mezclas con escoria, no presentó ningún problema en su aplicación a dicho material.

RECOMENDACIONES

1. Ajustar la granulometría de la escoria a las especificaciones.
2. Combinar la escoria con agregados tradicionales para compensar la falta de finos que posee la misma.
3. Dar seguimiento a esta investigación, haciendo un tramo de prueba, para evaluar el comportamiento de la escoria en pavimento soportando cargas de tráfico y los efectos del clima.
4. Hacer más estudios acerca del uso del material en otras aplicaciones.
5. Se recomienda su utilización en el área cercana a las instalaciones de la planta de SIDEGUA.
6. Informar a los interesados acerca del uso de este material.

BIBLIOGRAFÍA

1. <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3334/14/34065-14>
2. <http://www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/ssa1.htm>
3. Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes. Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. Guatemala 2001.
4. Las escorias de acería y su empleo en carreteras y vías férreas. Raúl Torres Ledesma, Luis Salame Ruiz, Gustavo Corredor Muller. Heckett Multiserv Intermetal, Inc. Venezuela 2002.
5. Annual Book of ASTM standards, Section 4, construction, Volume 04.03. Road and Paving materials, vehicle – Pavements, Systems, ASTM International. 2005
6. Principles of Construction of Hot-Mix Asphalt Pavements. Asphalt Institute Series No. 22. 1997.

ANEXO 1. REPORTE DE ANÁLISIS DE
AGREGADOS EN CENTRO DE
INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA
(CII)



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



INFORME No. S.C. 603 O.T. No. 20887

INTERESADO: Edgar Gustavo Pérez Sierra
ASUNTO: ENSAYO DE DESGASTE POR ABRASION EN MAQUINA DE LOS ANGELES PARA AGREGADO GRUESO.
PROYECTO: Trabajo de Graduacion
DIRECCION: 30 calle 16-39, zona 12
FECHA: 27 de noviembre de 2006

REFERENCIAS	MUESTRAS			
	1	2	3	4
1. Norma de Ensayo	ASTM C-131	*****	*****	*****
2. Graduación	"C"	*****	*****	*****
3. % Desgaste	21.04	*****	*****	*****

OBSERVACIONES: a) Muestra proporcionada por el interesado.
b) Muestra identificada como: (3/8" a 0")

ATENTAMENTE,



Ing. Francisco Javier Ecuté Bantes
Jefe Sección de Concretos

Vo.Bo.

Ing. Cesar Alonso García Guerra
DIRECTOR CII/USAC





CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



INFORME No. S.C. 684 O.T. No. 22319

INTERESADO: Edgar Gustavo Perez Sierra
ASUNTO: ENSAYO DE DESGASTE POR ABRASION EN MAQUINA DE LOS ANGELES PARA AGREGADO GRUESO.
PROYECTO: Trabajo de Graduacion "Evaluacion de la Escoria de Horno como Agregado en Mezclas Asfalticas"
PROCEDENCIA: Escoria de Aceria tamaño 3/4 a 0
FECHA: 25 de Octubre de 2 007

REFERENCIAS	MUESTRAS			
	1	2	3	4
1. Norma de Ensayo	ASTM C-131	*****	*****	*****
2. Graduación	"B"	*****	*****	*****
3. % Desgaste	24.1	*****	*****	*****

OBSERVACIONES: a) Muestra proporcionada por el interesado.
b) Muestra de Escoria de Horno.

ATENTAMENTE,

Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Concretos

SECCION
CONCRETOS

GUATEMALA, C.A.

Vo.Bo.

Ing. Oswaldo Romes Escobar Alvarez
Director CII/USAC

DIRECCION

FACULTAD DE INGENIERIA -USAC

Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12

Teléfono directo 2476-3992. Planta 2443-9500 Ext. 1502. FAX: 2476-3993

Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

**ANEXO 2. REPORTE DE ANÁLISIS
REALIZADOS EN EL LABORATORIO
DE ASFALTOS DE GUATEMALA**



Resultados de pruebas a cemento asfáltico AC-20

Fecha 28 de septiembre de 2007
Proyecto Evaluación de la escoria de horno como agregados en mezclas asfálticas

Pruebas Efectuadas	Resultado
Penetración, 100 gr., 5 seg, 25 °C AASHTO T49	77 dmm
Penetración, 200 gr., 60 seg, 4 °C AASHTO T49	5 dmm
Gravedad Específica AASHTO T228	1.03
Punto de flama ASTM D-92	330 °C
Pérdida de masa por calentamiento. AASHTO T240	4.0
Viscosidad cinemática ASTM D240	75.00
Viscosidad por viscosímetro capilar de vacíos ASTM D241	2162.2 P
Recuperación elástica por torsión	3%
Recuperación elástica por ductilómetro ASTM D6084	10%
Punto de ablandamiento ASTM T53	47 °C
Masa/Unidad de volumen AASHTO T228	8.73 Lb/gal

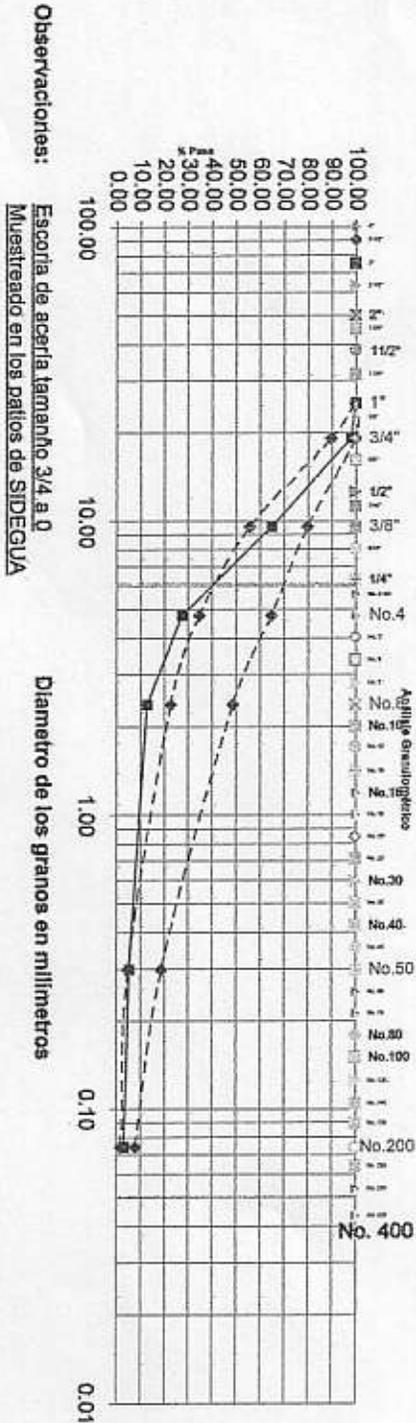


Análisis Granulométrico

Fecha: 03 de septiembre de 2007
 Tipo: Escoria de acería tamaño 3/4" a 0"
 Proyecto: Control de Calidad

Peso Bruto	2658.2
Tara	441.8
Peso Neto	2517.4

Tamiz	Díametro (mm)	Peso Bruto Retenido	Peso Neto Retenido	% Retenido	% Pasa	Especificaciones
1	25.00	441.8	0.0	0.00	100.00	100
3/4"	19.00	492.2	50.4	2.00	98.00	100
3/8"	9.50	1328.2	887.4	35.25	64.75	80
No. 4	4.75	2265.7	1823.9	72.45	27.55	35
No. 8	2.38	2638	2194.2	87.16	12.84	23
No. 50	0.29718	2824	2382.2	94.63	5.37	5
No. 200	0.07366	2879.8	2438.0	96.85	3.15	2



Observaciones:

Escoria de acería tamaño 3/4 a 0
 Muestreado en los patios de SIDEGUA

Díametro de los granos en milímetros



GRAVEDADES ESPECIFICAS Y PORCENTAJE DE ABSORCION

Escoria de acería tamaño 3/4" a 0"
Fracción retenida en Tamiz No.4

Temp. Agua (°C) 25

Factor Corrección 1

A 974.8

Peso seco al aire

B 992.25

Seco Saturado al aire

C 698.1

Seco Saturado en agua

Gravedad Especifica Bruta Gsb

A 3.3140
B-C

Gravedad Especifica Bruta Superficie Seco Saturado Gsb (s.s.s)

B 3.3733
B-C

Gravedad Especifica Aparente Gsa

A 3.5229
A-C

Porcentaje de Absorción

B-Ax100 1.79
A

Fecha 11 de septiembre de 2007



GRAVEDADES ESPECIFICAS Y PORCENTAJE DE ABSORCION

Escoria de Acería tamaño 3/4 a 0
Fracción pasante Tamiz No.4

Temp. Agua (°C) 25

Factor Corrección 1

A 410.7
B 429.5
C 290.4

Peso seco al aire
Seco Saturado al aire
Seco Saturado en agua

Gravedad Especifica Bruta Gsb

$$\frac{A}{B-C} = \frac{410.7}{429.5 - 290.4} = 2.9526$$

Gravedad Especifica Bruta Superficie Seco Saturado Gsb (s.s.s)

$$\frac{B}{B-C} = \frac{429.5}{429.5 - 290.4} = 3.0877$$

Gravedad Especifica Aparente Gsa

$$\frac{A}{A-C} = \frac{410.7}{410.7 - 290.4} = 3.4140$$

Porcentaje de Absorción

$$\frac{B-A \times 100}{A} = \frac{429.5 - 410.7}{410.7} \times 100 = 4.58$$

Fecha 11 de septiembre de 2007



Gravedades Específicas y % de Absorción Integradas

Escoria de acería tamaño 3/4 a 0

Gravedad específica bruta Gsb				
Fracción retenido tamiz No.4	3.3140	57.50	1.90552439	3.1604
Fracción pasante tamiz No.4	2.9526	42.50	1.25483465	Gsb

Gravedad específica bruta superficie seco saturado Gsb (s.s.s)				
Fracción retenido tamiz No.4	3.3733	57.50	1.93963539	3.2519
Fracción pasante tamiz No.4	3.0877	42.50	1.31227534	Gsb s.s.s.

Gravedad específica aparente Gsa				
Fracción retenido tamiz No.4	3.5229	57.50	2.0256957	3.4766
Fracción pasante tamiz No.4	3.4140	42.50	1.45093516	Gsa

% de Absorción Integrada				
Fracción retenido tamiz No.4	1.7901	57.50	1.02931371	2.9748
Fracción pasante tamiz No.4	4.5776	42.50	1.94545897	% Abs.

Fecha 11 de septiembre de 2007



EQUIVALENTE DE ARENA

Fecha 23 de agosto de 2007
Proyecto Evaluación de la escoria de horno como agregado
en mezclas asfálticas

1		2	
13:10	13:23	13:15	13:28
Min. 00:1	Min. 00:20	Min. 00:10	Min. 00:20
13:20	13:43	13:25	13:48

1. Lectura de Arena: 3.9 72.22 %
Lectura de Arcilla 5.4

2. Lectura de Arena: 4 80.00 %
Lectura de Arcilla 5

PROMEDIO EQUIVALENTE DE ARENA 76.11 %

Observaciones:

Escoria de acería , tamaño 3/4 a 0



Partículas Planas y Alargadas, Caras Fracturadas y % de Vestimiento

Partículas Planas y Alargadas		
Agregado Total		
Peso Bruto Muestra	Tara	Peso Neto Muestra
285.5	85.5	200

Porcentaje Partículas Planas y Alargadas
3.00

Partículas Planas y Alargadas		
Peso Bruto Muestra	Tara	Peso Neto Muestra
91.2	85.5	6

Caras Fracturadas		
Agregado Total		
Peso Bruto Muestra	Tara	Peso Neto Muestra
543.5	143.5	400

Porcentaje Caras Fracturadas
97.50

Caras Fracturadas		
Peso Bruto Muestra	Tara	Peso Neto Muestra
543.5	143.5	390

Porcentaje de Vestimiento		
Agregado Total 100 gms. (7.6% asfalto)		
Peso Bruto Muestra	Tara	Peso Neto Muestra
245.5	145.5	100

Porcentaje de Vestimiento
98.00

Peso Unitario Suelto

1715.824

Fecha: 30 de agosto de 2007

Observaciones	Escoria de acería , tamaño 3/4 a 0



Resultados del diseño de concreto asfáltico

Fecha 24 de septiembre de 2007
 Proyecto Evaluación de la escoria de hornos como agregado en mezclas asfálticas

Diseño de Concreto Asfáltico Tipo TMN.19mm
100% Escoria de acería tamaño 3/4 a 0

Pruebas Efectuadas	Símbolo	Resultado	Especificaciones
Número de Golpes por cara	****	75	75
% Optimo de Asfalto	Pb	7.60	
% Asfalto Absorbido	Pba	1.5	*****
% Asfalto Efectivo	Pbe	6.13	*****
% Vacíos de Aire	Va	4.0	3 --- 5
% Vacíos Rellenos de Asfalto	Vfa	79.80	65 --- 75
% Vacíos Agregado Mineral	VMA	19.87	> 13.0
Estabilidad Marshall	Lbs./Pulg ²	3844.27	> 1,200
Fluencia Marshall	****	18.50	8 --- 14
Relación Estabilidad/Fluencia	REF	207.80	120 --- 275
% Resistencia Retenida	****	95.71	> 80
Relación Polvo/Asfalto	Dp	0.57	0.6 --- 1.6
Grav.Específica Bruta de la Mezcla	Gmb	2.7405	*****
Grav.Específica Teórica Máxima de la Mezcla AASHTO T 209	Gmm	2.8551	*****
Grav.Específica Bruta del Agregado	Gsb	3.1604	*****
Grav.Específica Efectiva del Agregado	Gse	3.3185	*****
Gravedad Específica del Asfalto	Gb	1.0584	*****
% Absorción de Agua	Pwa	2.97	*****
% de Vestimiento del Agregado	****	98.00	> 95.0
% Equivalente de Arena	****	76.1	> 35.0
% Límite Líquido	L.L.	N.L.	< 20.0
% de Abrasión en Máquina L.A.	****	24.1	< 35.0
% Desintegración al Sulfato de Sodio	****	0.36	< 12
Peso Unitario Suelto	PUS	1715.82	> 1,360 Kgs./Metro ³
% Caras Fracturadas	****	97.5	> 90.0
% Partículas Planas y Alargadas	PPA	3	< 8.0



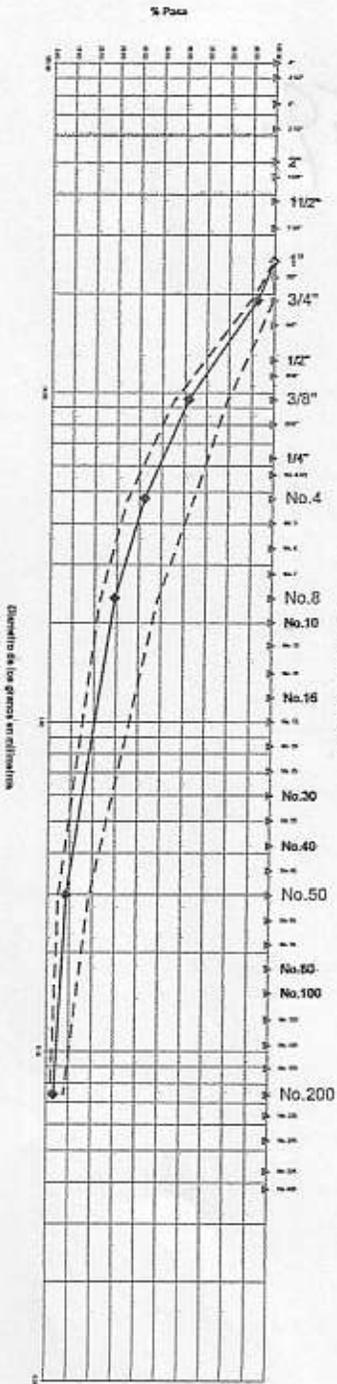
Analisis Granulométrico

Fecha: 03 de septiembre de 2007
 Tipo: escoria de acería tamaño 3/4 a 0

Peso Bruto	0.0
Tara	0.0
Peso Neto	1.0

Tamiz	Díámetro (mm)	Peso Bruto Retenido	Peso Neto Retenido	% Retenido	% Pasa	Especificaciones
1	25.00			0.00	100.00	100
3/4"	19.00			0.00	92.50	90
3/8"	9.50			0.00	62.00	56
No. 4	4.75			0.00	42.50	35
No. 8	2.36			0.00	29.50	23
No. 50	0.29718			0.00	8.50	5
No. 200	0.07366			0.00	3.50	2

Analisis Granulométrico:



Observaciones: Ajuste granulometría de Escoria de acería tamaño 3/4 a 0 muestrada en patios de SIDEGUA



Resultados del diseño DE concreto asfáltico

Fecha 24 de septiembre de 2007
 Proyecto Evaluación de la escoria de hornos comoa agregado en mezclas asfálticas

Diseño de Concreto Asfaltico Tipo TMN.19mm
70% escoria de acería tamaño 3/4 a 0
30% agregado 3/8 a 0 AGREGUA PPO

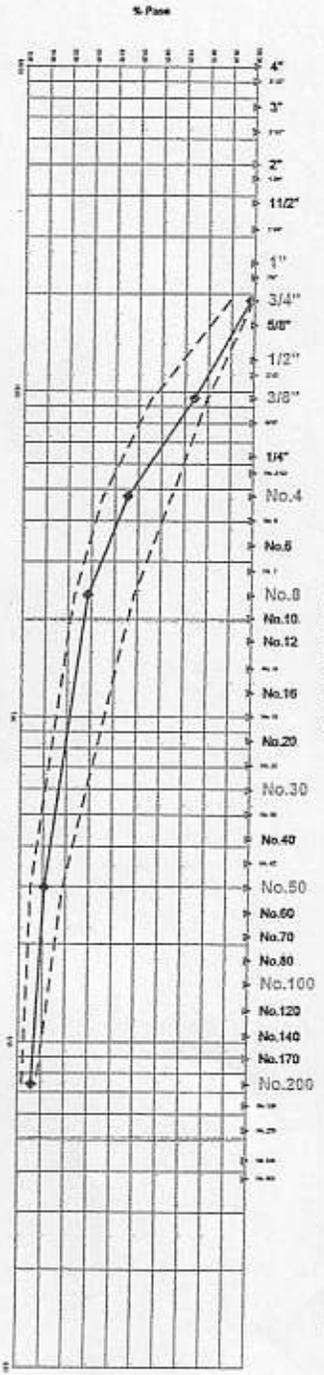
Pruebas Efectuadas	Símbolo	Resultado	Especificaciones
Número de Golpes por cara	****	75	75
% Optimo de Asfalto	Pb	6.25	
% Asfalto Absorbido	Pba	1.1	*****
% Asfalto Efectivo	Pbe	5.20	*****
% Vacios de Aire	Va	4.0	3 --- 5
% Vacios Rellenos de Asfalto	Vfa	76.48	65 --- 75
% Vacios Agregado Mineral	VMA	17.07	> 13.0
Estabilidad Marshall	Lbs./Pulg ²	3479.01	> 1,200
Fluencia Marshall	****	16.00	8 --- 14
Relación Estabilidad/Fluencia	REF	217.44	120 --- 275
% Resistencia Retenida	****	97.15	> 80
Relación Polvo/Asfalto	Dp	1.12	0.6 --- 1.6
Grav.Específica Bruta de la Mezcla	Gmb	2.6592	*****
Grav.Específica Teórica Máxima			*****
de la Mezcla AASHTO T 209	Gmm	2.7705	*****
Grav.Específica Bruta del Agregado	Gsb	3.0061	*****
Grav.Específica Efectiva del Agregado	Gse	3.1053	*****
Gravedad Específica del Asfalto	Gb	1.0584	*****
% Absorción de Agua	Pwa	2.16	*****
% de Vestimiento del Agregado	****	97.00	> 95.0
% Equivalente de Arena	****	-	> 35.0
% Límite Líquido	L.L.	N.L	< 20.0
% de Abrasión en Máquina L.A.	3/4 a 0"	-	< 35.0
% Desintegración al Sulfato de Sodio	3/4 a 0"	-	< 12
% de Abrasión en Máquina L.A.	1" a No.56	-	< 35.0
% Desintegración al Sulfato de Sodio	1" a No.56	-	< 12
Peso Unitario Suelto	PUS	1772	> 1,360 Kgs./Metro ³
% Caras Fracturadas	****	100	> 90.0
% Partículas Planas y Alargadas	PPA	-	< 8.0

Antillas Granulométrico

Fecha: 03 de septiembre de 2007
 Tipo: T.M.N. 15mm
 Proyecto: Evaluación de escoria de hornos como agregado en mezclas asfálticas

Peso Bruto	
Tara	
Peso Neto	0.0

Tamiz	Díametro (mm)	Peso Bruto Retenido	Peso Neto Retenido	% Retenido	% Pasa	Especificaciones	
1	25.00			0.00	100.00	100	
3/4"	19.00			1.40	98.60	90	
3/8"	9.50			25.64	74.36	56	
No. 4	4.75			64.26	45.74	35	
No. 8	2.36			71.33	28.67	23	
No. 50	0.29718			89.10	10.90	5	
No. 200	0.07366			94.19	5.81	2	
Extracción del Porcentaje de Asfalto							
Peso Bruto Muestra	Tara	Peso Neto Muestra	Peso Filtro Y Tara	Total (Filtro Y Tara)	Peso Bruto Extracción	Peso Neto Extracción	Diferencia



Observaciones:
 Combinación granulométrica para Diseño
 70% escoria de acería . 3/4" a 0"
 30% Agreg. 3/8" a 0" Cantera "PPO"



Gravedades Específicas y Porcentaje de Absorción Integradas para Diseño

70% escoria de acería 3/4" a 0"
30% agregado 3/8" a 0" AGREGUA PPO

Gravedad específica Bruta de los agregados Gsb.	
	3.0061
Gravedad específica Bruta superficie seco saturado Gsb (sss)	
	3.0896
Gravedad específica Efectiva de los agregados Gse	
$\frac{0.5}{\text{Factor K.}}$	3.1053
Gravedad específica Aparente de los agregados Gsa	
	3.2541
% de Absorción de agua de los agregados Pwa.	
	2.16
Fecha	<u>11 de septiembre de 2007</u>



Análisis Granulométrico

Fecha:

Tipo: 1 MN 19 mm.

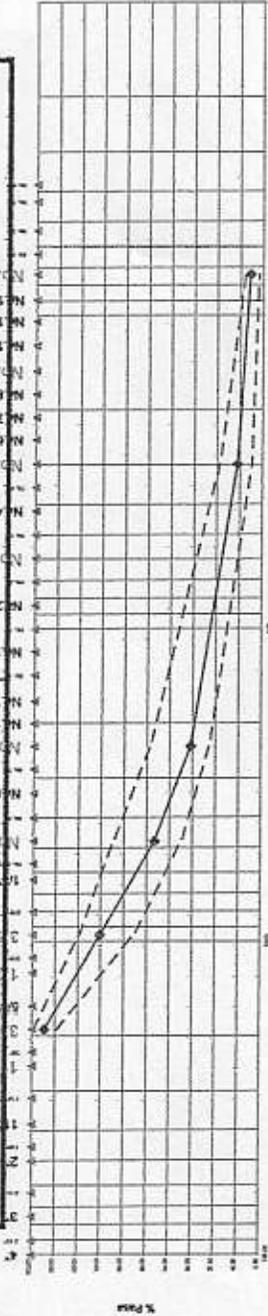
Proyecto: Evaluación de la escoria de horno como agregado en mezclas asfálticas

Peso Bruto	
Tara	
Peso Neto	0.0

Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Bruto Retenido	Peso Neto Retenido	% Retenido	% Pasa	Especificaciones
1	25.00				100.00	100
3/4"	19.00				94.86	90
3/8"	9.50				70.61	56
No. 4	4.75				46.86	35
No. 8	2.36				31.05	23
No. 50	0.29718				11.34	5
No. 200	0.07366				5.83	2

Extracción del Porcentaje de Asfalto

Peso Bruto Muestra	Tara	Peso Neto Muestra	Peso Filtro y Tara	Total (Filtro y Tara)	Peso Bruto Extracción	Peso Neto Extracción	Diferencia



Observaciones:

Combinación Granulométrica
 60% Agregado 3/8" a 0" Cantera AGREGUA PPO
 30% Agregado 1" a No.56 Cantera AGREGUA PPO
 10% Agregado 3/8" lavado Cantera AGREGUA PPO



Análisis Granulométrico

Fecha: 24 de septiembre de 2007

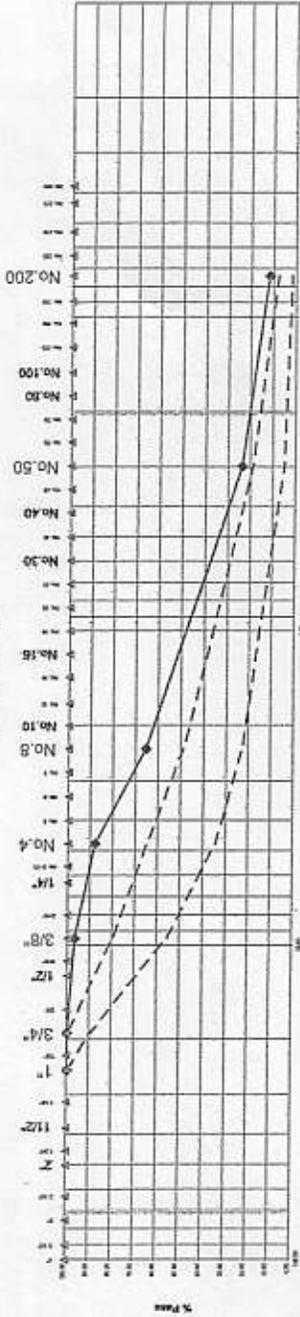
Tipo: 3/8" a 0" PPO

Proyecto: Evaluación de la escoria de horno como agregado en mezclas asfálticas

Peso Bruto	1368.3
Tara	320.5
Peso Neto	1048.3

Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Bruto Retenido	Peso Neto Retenido	% Retenido	% Pasa	Especificaciones
1	25.00	320.5	0.0	0.00	100.00	100
3/4"	19.00	320.5	0.0	0.00	100.00	100
3/8"	9.50	364.0	33.5	3.20	96.80	80
No. 4	4.75	444.2	123.7	11.80	88.20	35
No. 8	2.36	681.1	360.6	34.40	65.60	23
No. 50	0.29718	1119.3	798.8	76.20	23.80	5
No. 200	0.07366	1243.0	922.5	88.00	12.00	2

Análisis Granulométrico



Diámetro de las gradas especificadas

Observaciones: Agregado 3/8" a 0. Cursa "Palin Oeste"
Muestra tomada en Apilamiento Asfalagua



Resultados del diseño de concreto asfáltico

Fecha 24 de septiembre de 2007

Proyecto Evaluación de la escoria de horno como agregado en mezclas asfálticas

Diseño de Concreto Asfaltico Tipo TMN.19mm. Con AC-20 DE PERENCO
60 % Agregado 3/8" a 0" Cantera AGREGUA PPO
30% Agregado 1" a No.56 Cantera AGREGUA PPO
10% Agregado 3/8" a lavado Cantera AGREGUA PPO

Pruebas Efectuadas	Símbolo	Resultado	Especificaciones
Número de Golpes por cara	****	75	75
Temperatura de Mezclado °F	****	320	300 --- 325
% Optimo de Asfalto	Pb	5.32	4 --- 10
% Asfalto Absorbido	Pba	0.46	*****
% Asfalto Efectivo	Pbe	4.86	*****
% Vacios de Aire	Va	4.0	3 --- 5
% Vacios Rellenos de Asfalto	Vfa	72.70	65 --- 75
% Vacios Agregado Mineral	VMA	14.87	> 13.0
Estabilidad Marshall	Lbs./Pulg2	2650.00	> 1,200
Fluencia Marshall	****	11.50	8 --- 14
Relación Estabilidad/Fluencia	REF	229.00	120 --- 275
Relación Polvo/Asfalto	Dp	1.19	0.6 --- 1.6
Grav.Específica Bruta de la Mezcla	Gmb	2.3690	*****
Grav.Específica Teórica Máxima de la Mezcla AASHTO T 209	Gmm	2.4686	*****
Grav.Específica Bruta del Agregado	Gsb	2.6348	*****
Grav.Específica Efectiva del Agregado	Gse	2.6667	*****
Gravedad Específica del Asfalto	Gb	1.062	*****
% Absorción de Agua	Pwa	0.90	*****
% de Vestimiento del Agregado	****	100.00	> 95.0
% Equivalente de Arena	****	77.5	> 35.0
% Límite Líquido	L.L.	N.L	< 20.0
Peso Unitario Suelto	PUS	1782	> 1,360 Kgs./Metro3
% Caras Fracturadas	****	100	> 90.0
% Partículas Planas y Alargadas	PPA	2.35	< 8.0



Gravedades Específicas y Porcentaje de Absorción Integradas para Diseño

60% Agreg. 3/8" a 0" Cantera AGREGUA PPO
10% Agreg. 3/8" a lavado Cantera AGREGUA PPO
30% Agreg. 1" a No.56 Cantera AGREGUA PPO

Gravedad específica Bruta de los agregados Gsb.	
	<input type="text" value="2.6348"/>
Gravedad específica Bruta superficie seco saturado Gsb (sss)	
	<input type="text" value="2.6585"/>
Gravedad específica Efectiva de los agregados Gse	
0.5 Factor K.	<input type="text" value="2.6667"/>
Gravedad específica Aparente de los agregados Gsa	
	<input type="text" value="2.6986"/>
% de Absorción de agua de los agregados Pwa.	
	<input type="text" value="0.90"/>



EQUIVALENTE DE ARENA

Fecha 24 de agosto de 2007
Proyecto Evaluación de la escoria de horno como agregado en mezclas asfálticas

1		2	
09:10	09:23	09:15	09:28
Min. 00:10	Min. 00:20	Min. 00:10	Min. 00:20
09:20	09:43	09:25	09:48

1. Lectura de Arena: 2.8 77.78 %
Lectura de Arcilla: 3.6

2. Lectura de Arena: 2.7 77.14 %
Lectura de Arcilla: 3.5

PROMEDIO EQUIVALENTE DE ARENA 77.46 %

Observaciones: Combinación de agregados
60% Agregado 3/8" a 0" Cantera AGREGUA PPO
30% Agregado 1" a No.56 Cantera AGREGUA PPO
10% Agregado 3/8" lavado Cantera AGREGUA PPO



Partículas Planas y Alargadas, Caras Fracturadas y % de Vestimiento

Partículas Planas y Alargadas		
Agregado Total		
Peso Bruto Muestra	Tara	Peso Neto Muestra
284.5	84.5	200

Porcentaje Partículas Planas y Alargadas
2.35

Partículas Planas y Alargadas		
Peso Bruto Muestra	Tara	Peso Neto Muestra
89.2	84.5	4.7

Caras Fracturadas		
Agregado Total		
Peso Bruto Muestra	Tara	Peso Neto Muestra
		0

Porcentaje Caras Fracturadas
100.00

Caras Fracturadas		
Peso Bruto Muestra	Tara	Peso Neto Muestra
	0	0

Porcentaje de Vestimiento		
Agregado Total 100 gms. (5.5% asfalto)		
Peso Bruto Muestra	Tara	Peso Neto Muestra
243.5	143.5	100

Porcentaje de Vestimiento
98.00

Peso Unitario Suelto

Kgs./Metro³
1,782

Fecha: 30 de agosto de 2007

Observaciones
60% Agregado 3/8" a 0" Cantera AGREGUA PPO
10% Agregado 3/8" lavado Cantera AGREGUA PPO
30% Agregado 1" a No.56 Cantera AGREGUA PPO

2011



GRAVEDADES ESPECIFICAS Y PORCENTAJE DE ABSORCION

60% Agreg. 3/8" a 0" Cantera AGREGUA PPO
10% Agreg. 3/8" a lavado Cantera AGREGUA PPO
30% Agreg. 1" a No.56 Cantera AGREGUA PPO
Fracción retenida en tamiz No.4

Temp. Agua 25°C

Fact. Corr. 1

A _____
B _____
C _____

Peso seco al aire
Seco Saturado al aire
Seco Saturado en agua

Gravedad Específica Bruta Gsb

$$\frac{A}{B-C} = 2.6602$$

Gravedad Específica Bruta Superficie Seco Saturado Gsb (s.s.s)

$$\frac{B}{B-C} = 2.6749$$

Gravedad Específica Aparente Gsa

$$\frac{A}{A-C} = 2.6998$$

Porcentaje de Absorción

$$\frac{B-A \times 100}{A} = 0.55$$

701
14/11/17