



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**EL RECICLADO DE BARRO COCIDO, COMO AGREGADO EN EL
DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS POR EL MÉTODO MARSHALL**

Carlos Iván López López

Asesorado por el Ing. Omar Enrique Medrano Méndez

Guatemala, marzo de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EL RECICLADO DE BARRO COCIDO, COMO AGREGADO EN EL
DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS POR EL MÉTODO MARSHALL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

CARLOS IVÁN LÓPEZ LÓPEZ

ASESORADO POR EL ING. OMAR ENRIQUE MEDRANO MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MARZO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
EXAMINADOR	Ing. Crecencio Benjamín Cifuentes Velázquez
EXAMINADOR	Ing. Luis Estuardo Saravia Ramírez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

EL RECICLADO DE BARRO COCIDO, COMO AGREGADO EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS POR EL MÉTODO MARSHALL

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha noviembre de 2012.



Carlos Iván López López



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



Guatemala, noviembre de 2013

Ingeniero
Guillermo Francisco Melini Salguero
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles
Escuela de Ingeniería Civil
Guatemala

Respetado Ingeniero.

Luego de un breve saludo, sírvame la presente para informarle que el trabajo de graduación **“EL RECICLADO DE BARRO COCIDO, COMO AGREGADO EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS POR EL MÉTODO MARSHALL”**, elaborado por el alumno Carlos Iván López López, ha finalizado a satisfacción y revisado por mi persona.

Sin otro particular me despido.

Atentamente,

OMAR ENRIQUE MEDRANO MENDEZ
INGENIERO CIVIL
COLEGIADO No. 6842


Ing. Civil Omar Enrique Medrano Méndez
Colegiado 6842
Jefe de la sección de Mecánica de Suelos



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,
12 de febrero de 2014

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **EL RECICLADO DE BARRO COCIDO, COMO AGREGADO EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS POR EL MÉTODO MARSHAL**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Carlos Iván López López, quien contó con la asesoría del Ing. Omar Enrique Medrano Méndez.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Omar Enrique Medrano Méndez y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación del estudiante Carlos Iván López López, titulado EL RECICLADO DE BARRO COCIDO, COMO AGREGADO EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS POR EL MÉTODO MARSHALL, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, marzo 2014.

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





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 titulado: **EL RECICLADO DE BARRO COCIDO, COMO AGREGADO EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS POR EL MÉTODO MARSHALL**, presentado por el estudiante universitario: **Carlos Iván López López**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

Ing. Murphy Olympo Paiz Rascinos
Decano



Guatemala, marzo de 2014

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por otorgarme el valor y la sabiduría para concluir mis estudios.
Mis padres	Rómulo Baldomero López Rodas y Eluvia Judith López Gómez por su paciencia y apoyo en el transcurso de mi vida.
Mis compañeros	Juan Dubón, Fernando Castellanos, Luis Tórtola, Rony Aceytuno y Alex Reyes, por ser un apoyo dentro de la Facultad.
Ing. Omar Medrano	Por su asesoría, así como a los laboratoristas Byron García y José Istupe del Laboratorio de Mecánica de Suelos por el apoyo brindado durante mi investigación.
Laboratorios PADEGUA y Ladrillera Las Cruces	Por aportar la materia prima para la investigación.
Centro de Investigación de la Construcción	A sus trabajadores que hacen lo posible por brindar el mejor servicio con la mayor cortesía.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. BARRO COCIDO	1
1.1. Proceso de elaboración	3
1.2. Maduración.....	3
1.3. Tratamiento mecánico previo	4
1.3.1. Rompeterrones	4
1.3.2. Eliminador de piedras	4
1.3.3. Desintegrador	5
1.3.4. Laminador refinador.....	5
1.4. Depósito de materia prima procesada	5
1.5. Humidificación	6
1.6. Moldeado.....	7
1.7. Secado	10
1.8. Cocción.....	11
1.9. Almacenaje.....	13
2. RECICLADO Y APROVECHAMIENTO DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	15
2.1. Desechos sólidos de la construcción.....	18

2.1.1.	Características	18
2.1.2.	Gestión a nivel internacional	19
2.1.3.	Gestión a nivel nacional	20
2.1.4.	Volumen generado	21
2.1.5.	Legislación	22
2.1.6.	Alternativas de reutilización.....	23
2.2.	Concreto reciclado con escombros	23
2.2.1.	Manejo y disposición de escombros.....	23
2.2.2.	Tipos de desechos	25
2.2.2.1.	Demolición.....	25
2.2.2.2.	Otros	25
2.2.3.	Impacto ambiental	26
2.3.	Reciclado de pavimentos asfálticos	27
3.	MÉTODO MARSHALL PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	31
3.1.	Referencias históricas	33
3.2.	Objetivo	35
3.3.	Características de la mezcla asfáltica	35
3.3.1.	Selección de la muestra de material	36
3.3.2.	Contenido óptimo de bitumen.....	37
3.3.3.	Resistencia a la deformación permanente	38
3.3.4.	Resistencia a la fatiga	38
3.3.5.	Resistencia al agrietamiento por bajas temperaturas	38
3.3.6.	Durabilidad	38
3.3.7.	Resistencia a la humedad	39
3.3.8.	Resistencia al patinaje	39
3.3.9.	Trabajabilidad.....	39

4.	MÉTODO MARSHALL DE DISEÑO DE MEZCLAS.....	41
4.1.	Descripción del ensayo.....	41
4.1.1.	Equipo a utilizar	41
4.2.	Análisis granulométrico.....	47
4.2.1.	Preparación del agregado	48
4.2.2.	Abrasión de los ángeles	49
4.2.3.	Dosificación del agregado	51
4.2.3.1.	Curva de densidad máxima Fuller	52
4.3.	Análisis de cemento asfáltico	55
4.4.	Compactación.....	59
4.5.	Determinación del peso específico	64
4.5.1.	Peso específico del agregado.....	64
4.5.2.	Peso específico de la mezcla	66
4.5.3.	Método Rice.....	69
4.6.	Ensayos de estabilidad y fluencia.....	71
4.6.1.	Valor de la estabilidad Marshall	73
4.6.2.	Valor de la fluencia Marshall.....	74
4.6.3.	Relación de estabilidad y fluencia.....	75
4.7.	Cálculo de curvas de densidad.....	76
4.7.1.	Densidad de vacíos en la mezcla asfáltica	76
4.7.2.	Densidad de vacíos en el agregado mineral.....	78
4.7.3.	Densidad de vacíos rellenos de asfalto	80
4.8.	Contenido de bitumen	81
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	85
5.1.	Determinación del contenido óptimo de asfalto	85
5.2.	Requerimientos según normas.....	94
5.3.	Comparación de características para barro cocido	95
5.4.	Comparación para materiales comúnmente utilizados	96

5.5. Comparación económica.....	99
CONCLUSIONES.....	103
RECOMENDACIONES	105
BIBLIOGRAFÍA.....	107
ANEXOS.....	109

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Partes del ladrillo.....	2
2.	Reposo a la intemperie	6
3.	Humidificador	7
4.	Moldeado de ladrillo tubular	8
5.	Corte de piezas individuales	9
6.	Transporte de sobrantes para la reutilización	9
7.	Secado al aire libre.....	11
8.	Colocación de ladrillos en el horno	12
9.	Máquina de combustión móvil.....	13
10.	Prensa de estabilidad Marshall	43
11.	Cabeza de estabilidad Marshall con deformímetro	43
12.	Moldes de compactación Marshall	44
13.	Martillo de compactación.....	44
14.	Pedestal de compactación	45
15.	Baño de circulación de agua	45
16.	Picnómetro de vacíos.....	46
17.	Extractor de la centrifuga de asfalto	46
18.	Máquina para abrasión de los ángeles.....	51
19.	Gráfica de curvas de graduación tipo F.....	54
20.	Dosificación de agregado	59
21.	Dosificación de bitumen	61
22.	Mezcla asfáltica en caliente	61
23.	Equipo de compactación Marshall. Moldes, martillo, pedestal	62

24.	Equipo de extracción de probetas.....	63
25.	Probetas compactadas	63
26.	Equipo para ensayo rice	70
27.	Probetas sumergidas en el baño de agua	71
28.	Colocación de probeta en cabeza de estabilidad Marshall	72
29.	Ensayo de probetas en la prensa de estabilidad Marshall.....	72
30.	Gráfica de peso unitario contra contenido de asfalto	86
31.	Gráfica de porcentaje de vacíos contra contenido de asfalto	87
32.	Gráfica de vacíos en el agregado mineral contra contenido de asfalto	87
33.	Gráfica de vacíos rellenos de asfalto contra contenido de asfalto	88
34.	Gráfica de estabilidad contra contenido de asfalto	88
35.	Gráfica de fluencia contra contenido de asfalto	89
36.	Gráfica relación estabilidad/fluencia contra contenido de asfalto.....	89

TABLAS

I.	Graduación de agregados para pavimento de concreto asfáltico	48
II.	Graduación para tipo de abrasión de agregado grueso.....	50
III.	Resultados de abrasión de desechos de ladrillo de barro cocido	50
IV.	Dosificación tipo F para el análisis del barro cocido	54
V.	Caracterización del bitumen asfáltico tipo AC-20	56
VI.	Dosificación por peso de la mezcla asfáltica con contenido de bitumen de 10 y 14%	57
VII.	Dosificación por peso de la mezcla asfáltica con contenido de bitumen de 15 y 16%	58
VIII.	Dosificación por peso de la mezcla asfáltica con contenido de bitumen de 17 y 18%	58
IX.	Compactación de muestras	62

X.	Peso específico del residuo de barro cocido	65
XI.	Peso específico de mezcla asfáltica.....	68
XII.	Gravedad máxima teórica de la mezcla por el método rice.....	70
XIII.	Valores de estabilidad para residuos de barro cocido	73
XIV.	Valores de fluencia para residuos de barro cocido.....	74
XV.	Valores de relación estabilidad y fluencia con residuos de barro cocido	75
XVI.	Valores de porcentaje de vacíos en la mezcla	77
XVII.	Valores del porcentaje de vacíos en el agregado mineral.....	79
XVIII.	Valores de porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	81
XIX.	Contenido de bitumen en la mezcla asfáltica	83
XX.	Dosificación por peso del agregado y el bitumen asfáltico óptimo	90
XXI.	Compactación de muestras con asfalto óptimo.....	90
XXII.	Peso específico de mezcla asfáltica óptima	91
XXIII.	Gravedad máxima teórica por el método rice para asfalto óptimo	91
XXIV.	Valores de estabilidad para residuos mezcla óptima	91
XXV.	Valores de fluencia para mezcla óptima.....	92
XXVI.	Valores de relación estabilidad y fluencia para mezcla óptima.....	92
XXVII.	Valores de porcentaje de vacíos en la mezcla óptima	92
XXVIII.	Valores del porcentaje de vacíos en el agregado mineral.....	93
XXIX.	Valores de porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	93
XXX.	Contenido de bitumen en mezcla asfáltica óptima	93
XXXI.	Requerimientos para mezcla asfáltica por el método Marshall.....	94
XXXII.	Características óptimas para mezcla con residuos de barro cocido	95
XXXIII.	Características óptimas para mezcla con material calizo	96
XXXIV.	Características óptimas para mezcla con material basáltico	97

XXXV.	Características óptimas para mezcla con material pétreo	98
XXXVI.	Precios de elementos utilizados en la mezcla asfáltica	99
XXXVII.	Costo de fabricación de 1 m ³ de mezcla asfáltica con residuos de barro cocido.....	100
XXXVIII.	Costo de fabricación de 1 m ³ de mezcla asfáltica con material calizo	100
XXXIX.	Costo de fabricación de 1 m ³ de mezcla asfáltica con material basáltico	101
XL.	Costo de fabricación de 1 m ³ de mezcla asfáltica con material pétreo	101

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
d	Abertura en milímetros del tamiz analizado
D	Abertura en milímetros del tamiz máximo nominal
cm	Centímetros
cm³	Centímetro cúbico
Gmm	Densidad máxima teórica Rice
gal	Galón
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
g	Gramos
Gsaa	Gravedad específica aparente del agregado
Gsam	Gravedad específica aparente de la mezcla
Gsba	Gravedad específica bruta del agregado
Gsbm	Gravedad específica bruta de la mezcla
Gsea	Gravedad específica efectiva del agregado
Gsem	Gravedad específica efectiva de la mezcla
Gb	Gravedad específica del cemento asfáltico
Kpa	Kilo pascal
lb	Libra
m	Metro
m³	Metro cúbico
ml	Mililitro
mm	Milímetro
mm Hg	Milímetros de mercurio

N	Newton
PNa_{pasa Ti}	Peso neto acumulado que pasa en el tamiz analizado
PNa_{pasaTs}	Peso neto acumulado que pasa en el tamiz superior
Pa	Peso del agregado seco
Pas	Peso del agregado en condición seco saturado
Pam	Peso del agregado en la mezcla asfáltica
Pamw	Peso del matraz con el agregado y con agua
Pmw	Peso del matraz lleno con agua
Pnm	Peso neto de la mezcla o peso en el aire
Pn	Peso neto de la muestra
PN_{ret}	Peso neto retenido por el tamiz analizado
PNT	Peso neto total del material
Psm	Peso saturado de la mezcla
Pss	Peso saturado sumergido de la mezcla
Ps	Peso seco en el horno de la muestra
%	Porcentaje
% agr	Porcentaje de agregado en la mezcla
% asf	Porcentaje de asfalto en la mezcla
%Bit	Porcentaje de bitumen en la mezcla asfáltica
%VAM	Porcentaje de vacíos en el agregado mineral
%Va	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica
%VRA	Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto
%Pasa	Porcentaje que pasa por el tamiz analizado
pulg	Pulgada

GLOSARIO

AASHTO	Siglas que corresponden a la entidad, American Association of State Highway and Transportation Official.
Abrasión	Desgaste producido por la acción mecánica de rozamiento entre dos superficies.
Acopio	Acumulación planificada de materiales destinados a la construcción de una obra.
Adobe	Bloque de mampostería rustica elaborado con arcilla.
ASTM	Siglas que corresponden a la entidad, American Society for Testing and Materials.
Bitumen	Sustancia cementante semisólida o viscosa proveniente de la refinación del petróleo.
Curado	Tiempo durante el cual la mezcla alcanza su endurecimiento.
Embalaje	Colocar o empaquetar materiales de manera temporal para agrupar en unidades.

Escombros	Residuos sólidos inertes provenientes de la construcción o demolición de una obra o de un edificio derribado.
Fisura	Fractura o grieta lineal que afecta la capa exterior del elemento constructivo.
Gestión	Administración o diligencia para llevar a cabo una acción.
Higrométrico	Cambio en la humedad relativa del aire.
Homogeneización	Proceso en el cual los componentes de la mezcla están distribuidos uniformemente.
Insuflación	Introducir por medio de espacios reducidos una sustancia, gas o líquido con ayuda de la presión del aire.
Intemperismo	Cambios provocados por el clima y la oxidación de los elementos.
Junta	Espacio entre elementos de mampostería que es llenado de mezcla aglomerante.
Misceláneos	Mezcla de elementos variados muchas veces sin relación entre ellos.

RESUMEN

La utilización del barro cocido ha sido muy variada, sin cambiar la forma de producción que se basa en establecer la humedad óptima a la cual puede ser moldeado sin mayores complicaciones. Pero estos sistemas de elaboración de artículos, ya sea domésticos como constructivos, tiene como parte del proceso el cambio químico que se da en la etapa de cocción, el cual provoca que los residuos de los mismos no puedan ser reutilizados en su totalidad.

El reciclado en el área constructiva no ha tenido mayor importancia, debido a que Guatemala es un país rico en minerales y por lo tanto rico en materia prima para la construcción y producción de todo tipo de materiales. Pero, al tener en cuenta que la reutilización de material disminuye el costo de un proyecto, se han ido formando nuevas ideas para el aprovechamiento de estos sobrantes.

El método de diseño de mezclas asfálticas desarrollado por el ingeniero Bruce Marshall permite obtener el contenido óptimo de asfalto necesario para cualquier tipo de agregado dentro de la mezcla, logrando que se puedan analizar diferentes tipos de partículas de materiales, lo cual se considera de un gran aporte en la reutilización de materiales.

OBJETIVOS

General

Evaluar las características físicas y las propiedades mecánicas de los residuos de barro cocido y establecer los parámetros necesarios para ser utilizados en la elaboración de superficies asfálticas de rodadura por medio del diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall.

Específicos

1. Incentivar la utilización de nuevos materiales en las distintas áreas de ingeniería.
2. Proponer un nuevo uso para los restos de barro cocido dentro de la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.
3. Evaluar las características del pavimento asfáltico elaborado con residuos de barro cocido como el asfalto óptimo, el porcentaje de vacíos, la resistencia al desgaste.
4. Evidenciar la necesidad de cada uno de los ensayos aplicados en diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall.

INTRODUCCIÓN

La construcción de carreteras ha variado respecto a los materiales utilizados, esto es debido a la búsqueda de la reutilización de los sobrantes de demoliciones, reparaciones o fabricación de diversos elementos dirigidos a las diferentes áreas de la construcción, como pueden ser residuos de asfalto, de concreto o de mampostería.

Los residuos que se producen durante la elaboración de productos de barro cocido son contaminantes que al ser compactados no permiten una forestación del área en los lugares donde son depositados y, debido a su contenido de arcilla, deben ser estabilizados antes de poder edificar alguna estructura.

El ladrillo de barro cocido es un elemento que durante su fabricación pasa por una etapa de tratamiento mecánico en el cual se reducen sus dimensiones para cumplir con los parámetros establecidos en las normas de producción. Estos sobrantes serán analizados para conocer su comportamiento como un complemento dentro de las mezclas asfálticas y así poder dar un uso adecuado a estos residuos en la elaboración de superficies de rodadura.

El cuerpo de ingenieros decidió utilizar, desarrollar y adaptar el método Marshall para el diseño y control de mezclas de pavimento, debido en parte a que el método requería un equipo portátil. El propósito del método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados, lo que hace a este método ideal para estudiar distintos tipos de componentes dentro de la mezcla asfáltica.

1. BARRO COCIDO

La arcilla tiene propiedades plásticas, lo que significa que al humedecerla puede ser modelada fácilmente. Al secarse se vuelve firme y cuando se somete a altas temperaturas debido a reacciones químicas, entre otros cambios, la arcilla se convierte en un material permanentemente rígido.

Por estas propiedades, la arcilla es utilizada para hacer objetos de mampostería, de uso estructural o decorativo. Dependiendo del contenido mineral del suelo, la arcilla puede aparecer en varios colores, desde un pálido gris a un oscuro rojo anaranjado. Un horno diseñado específicamente para cocer arcilla es llamado horno de alfarero.

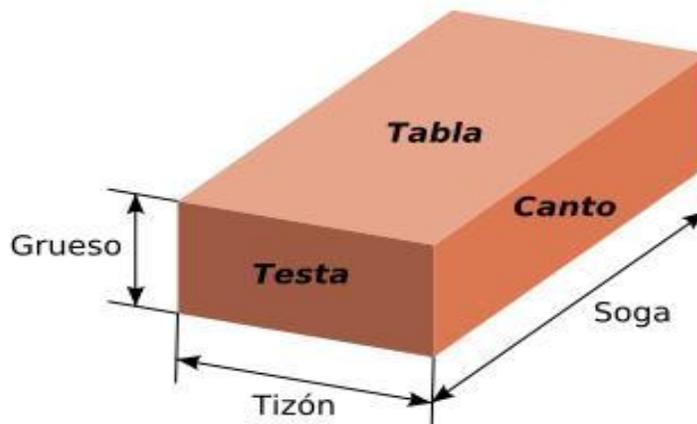
La humanidad descubrió las útiles propiedades de la arcilla en tiempos prehistóricos, y los recipientes más antiguos descubiertos son las vasijas elaboradas con arcilla. También se utilizó, desde la prehistoria, para construir edificaciones de tapial, adobe y posteriormente ladrillo, elemento de construcción cuyo uso aún perdura y es utilizado para hacer muros y paredes en el mundo moderno.

La arcilla cocida al fuego, o barro cocido, es uno de los medios más baratos para producir objetos de uso cotidiano, y una de las materias primas utilizada profusamente, aun hoy en día. Ladrillos, vasijas, platos, objetos de arte, e incluso instrumentos musicales, tales como la ocarina, fueron y son modelados con arcilla. La arcilla también se utiliza en muchos procesos industriales, tales como la producción de cemento, elaboración de papel, y obtención de sustancias de filtrado.

Un ladrillo es una pieza de construcción empleada en albañilería, generalmente cerámica y cuyas dimensiones permiten que se pueda colocar con una sola mano por parte de un operario. Su forma es la de un prisma rectangular, en el que sus diferentes dimensiones reciben el nombre de sogá, tizón y grueso, siendo la sogá su dimensión mayor. Asimismo, las diferentes caras del ladrillo reciben el nombre de tabla, canto y testa (la tabla es la mayor). Por lo general, la sogá es del doble de longitud que el tizón o, más exactamente, dos tizones más una junta, lo que permite combinarlos libremente. El grueso, por el contrario, puede no estar modulado.

Existen diferentes formatos de ladrillo, por lo general son de un tamaño que permita manejarlo con una mano. En particular, destacan el formato métrico, en el que las dimensiones son 24 x 11,5 x 5,25 / 7 / 3,5 centímetros (cada dimensión es dos veces la inmediatamente menor, más 1 cm de junta) y el formato catalán de dimensiones 29 x 14 x 5,2 / 7,5 / 6 centímetros, y los más normalizados que miden 25 x 12 x 5 centímetros.

Figura 1. **Partes del ladrillo**



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Ladrillo>. Consulta: 07 de marzo de 2013.

1.1. Proceso de elaboración

En la actualidad, en cualquier fábrica de ladrillos se llevan a cabo una serie de procesos estandarizados que comprenden desde la elección del material arcilloso al proceso de empaclado final. La materia prima utilizada para la producción de ladrillos es, fundamentalmente, la arcilla. Este material está compuesto, en esencia, de sílice, agua y cantidades variables de óxidos de hierro y otros materiales alcalinos, como los óxidos de calcio y los óxidos de magnesio.

Las partículas del material son capaces de absorber hasta un 70 por ciento de su peso en agua. Cuando está hidratada, la arcilla adquiere la plasticidad suficiente para ser moldeada, a diferencia de cuando está seca; estado en el que presenta un aspecto terroso.

Durante la fase de endurecimiento, por secado o por cocción, el material arcilloso adquiere características de notable solidez, y experimenta una disminución de masa, por pérdida de agua, de entre un 5 y 15 por ciento.

1.2. Maduración

Antes de incorporar la arcilla al ciclo de producción hay que someterla a ciertos tratamientos de trituración, homogeneización y reposo en acopio, con la finalidad de obtener una adecuada consistencia y uniformidad de las características físicas y químicas deseadas.

El reposo a la intemperie tiene la finalidad de facilitar el desmenuzamiento de los terrones para impedir las aglomeraciones de partículas arcillosas. La exposición a la acción atmosférica (aire, lluvia, sol, hielo) favorece además la

descomposición de la materia orgánica que pueda estar presente y permite la purificación química y biológica del material. De esta manera se obtiene un material completamente inerte y poco dado a posteriores transformaciones mecánicas o químicas.

1.3. Tratamiento mecánico previo

Después de la maduración, que se produce en la zona de acopio, sigue la fase de preelaboración, que consiste en una serie de operaciones que tienen la finalidad de purificar y refinar la materia prima. Los instrumentos utilizados en la preelaboración, para un tratamiento puramente mecánico suelen ser:

1.3.1. Rompeterrones

Su función consiste en deshacer los terrones que se forman debido a su almacenamiento y así reducir las dimensiones de las partículas hasta un diámetro de entre 15 y 30 milímetros, para poder asegurar un mejor acomodamiento entre las partículas en la fase de moldeado.

1.3.2. Eliminador de piedras

Está constituido generalmente por 2 cilindros que giran a diferentes velocidades capaces de separar la arcilla de las piedras, para que el contenido de materia prima esté compuesto en su totalidad por arcilla para asegurar una mejor calidad en el producto final.

1.3.3. Desintegrador

Se encarga de triturar los terrones de mayor tamaño, más duros y compactos, por la acción de una serie de cilindros dentados, los cuales han sido creados por el paso de la arcilla por las maquinarias previas y que pueden causar una hidratación no homogénea afectando el moldeado.

1.3.4. Laminador refinador

Está formado por dos cilindros rotatorios lisos montados en ejes paralelos, con separación entre sí de 1 a 2 milímetros, espacio por el cual se hace pasar la arcilla sometiéndola a un aplastamiento y un planchado que hacen aún más pequeñas las partículas. En esta última fase se consigue la eventual trituración de los últimos nódulos que pudieran estar todavía en el interior del material.

1.4. Depósito de materia prima procesada

A la fase de preelaboración, sigue el depósito de material en silos especiales en un lugar techado, donde el material se homogeniza definitivamente tanto en apariencia como en características fisicoquímicas.

Figura 2. Reposo a la intemperie



Fuente: ladrillera Las Cruces, km. 9 carretera a San Pedro Ayampuc, zona 18.

1.5. Humidificación

Antes de llegar a la operación de moldeo, se saca la arcilla de los silos y se lleva a un laminador refinador. Posteriormente se traslada a un mezclador humedecedor, donde se agrega agua para obtener la humedad precisa.

Figura 3. **Humidificador**



Fuente: ladrillera Las Cruces, km. 9 carretera a San Pedro Ayampuc, zona 18.

1.6. Moldeado

El moldeado consiste en hacer pasar la mezcla de arcilla previamente hidratada, a través de una boquilla al final de la estructura. La boquilla es una plancha perforada que tiene la forma del objeto que se quiere producir.

Figura 4. **Moldeado de ladrillo tubular**



Fuente: ladrillera Las Cruces, km. 9 carretera a San Pedro Ayampuc, zona 18.

El moldeado se suele hacer en caliente utilizando vapor saturado aproximadamente a 130 grados Celsius y a presión reducida. Procediendo de esta manera se obtiene una humedad más uniforme y una masa más compacta, puesto que el vapor tiene un mayor poder de penetración que el agua.

Luego; el bloque de arcilla humedecida es colocado en una máquina que lo corta en piezas individuales donde los operarios realizan una inspección visual retirando los sobrantes y los elementos defectuosos.

Figura 5. **Corte de piezas individuales**



Fuente: ladrillera Las Cruces, km. 9 carretera a San Pedro Ayampuc, zona 18.

Los elementos defectuosos y los sobrantes son transportados de nuevo a la parte inicial de la humidificación para poder ser reutilizados. Esta etapa es la última en la que el 100 por ciento del material se puede mezclar con la materia prima para poder ser utilizado nuevamente dentro de la producción.

Figura 6. **Transporte de sobrantes para la reutilización**



Fuente: ladrillera Las Cruces, km. 9 carretera a San Pedro Ayampuc, zona 18.

1.7. Secado

Los ladrillos individuales son almacenados en estanterías para que adquieran consistencia, no son llevados inmediatamente a la cámara de secado debido a que estos podrían agrietarse o provocar variaciones en los esfuerzos actuantes.

El secado es una de las fases más delicadas del proceso de producción. De esta etapa depende, en gran parte, el buen resultado y calidad del material, más que nada en lo que respecta a la ausencia de fisuras. El secado tiene la finalidad de eliminar el agua agregada en la fase de moldeado para poder pasar a la fase de cocción.

Esta fase se realiza en secaderos que pueden ser de diferentes tipos. A veces se hace circular aire de un extremo a otro por el interior del secadero, y otras veces es el material el que circula por el interior del secadero sin inducir corrientes de aire.

Lo normal es que la eliminación del agua del material crudo se lleve a cabo insuflando aire caliente con una cantidad de humedad variable. Eso permite evitar golpes termohigrométricos que puedan producir una disminución de la masa de agua a ritmos diferentes en distintas zonas del material y, por lo tanto, a producir fisuras localizadas.

Figura 7. Secado al aire libre



Fuente: ladrillera Las Cruces, km. 9 carretera a San Pedro Ayampuc, zona 18.

1.8. Cocción

Se realiza en hornos de túnel que, en algunos casos, pueden llegar a medir hasta 120 metros de longitud y donde la temperatura de la zona de cocción oscila entre 900 y 1 000 grados centígrados.

Las cámaras de secado son alimentadas de un combustible a base de resinas, o bien aserrín de madera, el cual alcanza una alta temperatura al sufrir combustión con base a gasolina o etanol.

Figura 8. **Colocación de ladrillos en el horno**



Fuente: ladrillera Las Cruces, km. 9 carretera a San Pedro Ayampuc, zona 18.

En el interior del horno la temperatura varía de forma continua y uniforme. El material secado se coloca en carros especiales, en paquetes estándar y es introducido por una de las extremidades del túnel, saliendo por el extremo opuesto una vez que está cocido. Sin embargo, existen hornos en los cuales es el calor inducido el que se mueve a lo largo del túnel por medio de una máquina que logra realizar la combustión de cada una de las cámaras de fuego, que se interconecta a una tubería de ventilación y a su vez a la cámara de secado.

Figura 9. **Máquina de combustión móvil**



Fuente: ladrillera Las Cruces, km. 9 carretera a San Pedro Ayampuc, zona 18.

Es durante la cocción cuando se produce la rigidización, de manera que la cocción resulta una de las instancias cruciales del proceso en lo que a la resistencia del ladrillo respecta.

1.9. Almacenaje

Antes del embalaje se procede a la formación de paquetes sobre bases, que permitirán después moverlos fácilmente con carretillas de horquilla. El proceso de embalaje consiste en envolver los paquetes con cintas de plástico o de metal, de modo que puedan ser depositados en lugares de almacenamiento, para posteriormente ser trasladados en camión.

2. RECICLADO Y APROVECHAMIENTO DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

La generación de residuos es tan antigua como el mismo hombre. Lo que ha variado a través del tiempo es la cantidad y la composición química y física de los residuos, la cual está estrechamente ligada con la evolución cultural y tecnológica de la civilización, y está particularmente relacionada con el nivel de ingresos.

En Europa y Estados Unidos, los residuos de construcción y demolición, en general denominados materiales residuales de construcción, normalmente se han evacuado junto con los restantes residuos sólidos desde principios hasta mediados del siglo XX. En un principio, el reciclaje de estos residuos fue concebido como una respuesta a la escasez de materiales de construcción y a los gastos de movilización.

La acción de construir y demoler genera un volumen importante de residuos. Así, en los trabajos previos al comienzo de una obra nueva es habitual que se tenga que derribar una construcción existente o que se tengan que efectuar ciertos movimientos de tierra. Durante la realización de la obra, también se origina una cantidad importante de residuos en forma de sobrantes y de restos diversos.

Los escombros de construcciones y demoliciones se generan en el lugar de la actividad constructora. Pueden producirse como consecuencia de la construcción de edificios y otras estructuras, o pueden producirse por la demolición de viejas estructuras o partes de estructuras. La actividad de la

construcción genera producción de escombros provenientes de las distintas actividades que se realizan. Pedazos de cerámica, mampuestos, concreto y madera, son algunos de los residuos más comunes.

El flujo de residuos generados por la repavimentación de carreteras, demolición y construcción de puentes, y actividades de remodelación y renovación, se categoriza de forma amplia como residuos de construcción y demolición.

El reciclaje de los escombros es un sector económicamente rentable y muy organizado en algunos países europeos como Alemania y Holanda, donde hay escasez de recursos naturales y se le da gran valor económico al suelo. El fomento de dicho reciclaje se ha puesto en práctica desde hace muchos años con resultados muy positivos. Todos estos hechos convergen en la necesidad de investigar acerca de las características de estos residuos sólidos, con el fin de conocer su capacidad para ser aplicados en la industria de la construcción.

En teoría, una gran cantidad de los residuos de construcción y demolición pueden reciclarse o reutilizarse fácilmente. Se debe tener en cuenta que los escombros tienen un potencial considerable para el reciclaje, si se comparan con otros tipos de residuos. Por otro lado, los productos reciclados tienen que competir con los materiales de construcción tradicionales, de ahí la necesidad de una calidad uniforme. En este sentido, es importante conocer cuál es el origen y la composición de estos residuos para conseguir una aceptabilidad futura del material reciclado.

Las actividades humanas pueden tener consecuencias perjudiciales e incluso irreversibles sobre el medioambiente, provocando deterioro de los recursos naturales, contaminación biológica, contaminación química y alteración

física, las que se manifiestan en la erosión del suelo, la destrucción de la flora y de la fauna, la escasez de agua y el agotamiento de los recursos minerales entre otros. Según el World watch Institute de Washington, los edificios consumen el 60 por ciento de los materiales extraídos de la tierra.

El problema de la contaminación ha aumentado en los últimos años debido al acelerado crecimiento demográfico y al progreso desde el punto de vista tecnológico y económico, y está íntimamente ligado al sistema de recolección, tratamiento y disposición final de los residuos.

Los grandes sectores productores de residuos son:

- Sector doméstico
- Sector comercial
- Sector manufacturero
- Sector minero
- Sector de la construcción
- Sector agrícola
- Sector de la alimentación
- Sector de la energía nuclear y de la electricidad

Gran parte de los residuos derivan de los desechos de la construcción, entre los que se cuentan aquellos provenientes de:

- Demolición de viejos edificios, estructuras
- Rehabilitación y restauración de viviendas
- Edificios y estructuras existentes
- Construcción de edificios, estructuras
- Producción de materiales de construcción

En la actualidad la alternativa más utilizada para la eliminación de estos residuos de construcción y/o demolición es el vertido. Es importante tener en cuenta que estos ocupan un gran volumen dentro de los vertederos municipales, lo cual reduce el tiempo de vida útil de los mismos, generando a su vez un gran problema debido a la falta de lugares de depósito apropiados. Por otra parte, frecuentemente son empleados por parte de particulares para realizar rellenos, sin considerar los daños ocasionados desde el punto de vista ecológico.

2.1. Desechos sólidos de la construcción

Son aquellos que se generan como resultado de actividades de construcción y demolición de obras, tales como: edificios, puentes, carreteras y otros producidos por la elaboración de materiales.

Los desechos sólidos de la construcción se pueden clasificar de acuerdo al tipo de actividad y objeto de la obra que los genera (ver tabla en anexos).

2.1.1. Características

Durante la construcción, remodelación y/o mantenimiento de una obra se genera un volumen considerable de desechos los cuales tienen características negativas como:

- Son fuente de polvo y otros contaminantes.
- Tapan los drenajes cuando se abandonan en las calles.
- Provocan el desborde de los cauces de agua cuando van a parar a ellos.
- Impiden el aprovechamiento de tierras fértiles cuando se depositan en ellas sin ningún control.

Los desechos sólidos de la construcción constituyen un amplio porcentaje del total de desechos sólidos generados, sin embargo, han sido siempre considerados de menor importancia frente a desechos como los domésticos, debido al bajo nivel tóxico que producen.

Actualmente existe una considerable fracción de materiales reutilizables que no están siendo aprovechados de una manera adecuada en muchos países. Sin embargo los desechos sólidos de la construcción tienen un alto potencial de reutilización, en comparación con otros tipos de desecho y a un menor costo.

2.1.2. Gestión a nivel internacional

El sector de la construcción y demolición es una de las actividades que más desechos genera. A pesar del gran volumen producido y del elevado potencial de reutilización que posee este tipo de desechos, la mayor parte es llevada a vertederos.

En las últimas décadas la ocupación de terrenos, la degradación del paisaje, la contaminación de los suelos, el impacto sobre la hidrología, y la escasez de materiales de construcción, entre otros factores, han hecho necesario el reciclaje de los materiales incluidos en los desechos de la construcción.

En los países de la Unión Europea los desechos sólidos son depositados en vertederos especiales, ya sean controlados o no controlados. En Holanda más de la mitad son reciclados, España y Dinamarca también tienen altos porcentajes de reciclaje de desechos sólidos provenientes de la construcción.

En Latinoamérica la gestión de los desechos de las construcciones tiene poco control en la mayoría de países, a pesar de que existen leyes, reglamentos y entidades que regulan la gestión de los desechos sólidos, no prestan especial interés a los provenientes de la construcción. Sin embargo, en México, Colombia y Brasil existen proyectos o programas de entidades estatales o empresas privadas que llevan a cabo el reciclaje de este tipo de material.

2.1.3. Gestión a nivel nacional

Según el informe Análisis Sectorial de Residuos en Guatemala, (OPS/OMS, 1995) el tema de los desechos sólidos no ha sido una prioridad a nivel institucional, a pesar de ser un problema de salud y ambiental.

En Guatemala existen leyes y normas que determinan una serie de obligaciones para entidades encargadas de la gestión de desechos sólidos, y a pesar de ello la planificación en esta área ha sido escasa y, al no conocerse las necesidades de recursos humanos, técnicos, físicos y financieros, no se desarrollan de manera ordenada las distintas acciones que deberían desempeñar las instituciones competentes en el tema.

Los desechos sólidos de la construcción constituyen un porcentaje significativo de los desechos totales del país, sin embargo, debido a que no son directamente nocivos a la salud, su disposición final no tiene un enfoque prioritario. En Guatemala los desechos de las construcciones son manejados en forma conjunta, es decir, no existe un sistema de clasificación, por lo que la reutilización o el reciclaje de cualquier tipo de residuos es limitado.

La actividad volcánica de Guatemala ha definido características de los materiales geológicos, con dos tipos de rocas: sedimentarias con el 68 por ciento con predominio en Petén, ígneas y metamórficas con el 32 por ciento del total predominantes en la meseta central, esto convierte al territorio de Guatemala en un lugar rico en materiales constructivos, y por ende, que no exista una cultura para reciclar los residuos de construcción.

2.1.4. Volumen generado

La confiabilidad de los datos varía mucho de un país a otro, dependiendo del nivel de las políticas de gestión de los desechos provenientes de la construcción y de los métodos de cálculo empleados. Según la Asociación de Reciclado de Materiales de Construcción (CMRA, por sus siglas en inglés) en Estados Unidos se generan anualmente unos 325 millones de toneladas de desechos sólidos, en su mayoría reciclables. Estas cifras pueden tener más o menos variaciones con respecto de un año a otro, ya que están directamente ligadas al crecimiento del sector de la construcción así como a eventualidades por desastres.

Según datos de la Unión Europea, en 1992 los países miembros produjeron 200 millones de toneladas de desechos sólidos. La información más confiable sobre las cantidades de desechos generados en Europa se presenta en el informe Symonds.

En el año 2002 la Agencia Europea de Medio Ambiente publicó el informe *Review of Selected Waste Streams*; en el cual se establece que, Finlandia genera 1 500 toneladas al año por habitante de desechos sólidos, Alemania aparece con 2 700 toneladas al año por habitante. España produce 35 millones de toneladas al año, de los cuales solo el 14 por ciento es tratado y separado

para su reutilización, y de éstos se estima que solamente el 2 por ciento es reutilizado como agregado reciclado. En México se producen de 3 500 a 5 000 toneladas diarias de desechos sólidos, solamente en el Distrito Federal, un 50 por ciento se recibe en una planta de reciclaje.

En algunas ciudades de Colombia, la cantidad de desechos sólidos asciende a 6 000 toneladas al día; Brasil está entre 2 400 a 6 000 toneladas diarias. Estas cantidades cambian según la región, el nivel de desarrollo y el tamaño de la ciudad que se trate (ver tabla en anexos). En Guatemala no existen datos oficiales sobre el volumen de desechos sólidos de construcción generado.

2.1.5. Legislación

La Comunidad Europea actualmente trabaja en crear y llevar a cabo legislaciones específicas que contemplen la obligatoriedad de la recolección y tratamiento de los desechos sólidos y su transformación necesaria como material reciclado. Estas leyes ayudarán a la protección de la salud humana, los recursos naturales y el medio ambiente.

En algunos países como Dinamarca han prohibido el vertido de los escombros que sean aptos para su reciclaje; esta regulación controla rigurosamente el destino de los residuos de manera que las empresas constructoras se ven obligadas a reciclar; en otros países, como México, Perú, Nicaragua, Estados Unidos y España también existen leyes que contemplan el manejo y disposición de los desechos (ver tabla en anexos). En Guatemala existen leyes y reglamentos sobre el manejo de los desechos sólidos, sin embargo, no regulan los desechos provenientes de la construcción.

2.1.6. Alternativas de reutilización

El reciclaje de escombros es un sector económicamente rentable y muy organizado en algunos países europeos como Alemania, donde factores como una legislación más restrictiva, la escasez de recursos naturales y sobre todo el alto valor económico del suelo ha obligado a fomentar su reciclaje desde hace muchos años, con resultados muy positivos.

2.2. Concreto reciclado con escombros

El término escombros se le da al material residuo de actividades como demolición, remodelación y construcción. Normalmente, los escombros se clasifican como residuos urbanos, aunque están más relacionados con una actividad industrial que doméstica. La tendencia de la construcción sostenible es llegar a la búsqueda de la eficiencia y reducción de impactos desfavorables en las distintas labores de ingeniería. El concreto reciclado es simplemente el concreto viejo que se triturará para producir partículas con características de agregado. En otros países se ha usado satisfactoriamente como un agregado en subbases granulares, suelo cemento y en el concreto nuevo como la única fuente o como reemplazo parcial del agregado nuevo.

2.2.1. Manejo y disposición de escombros

El sistema convencional utilizado para un correcto manejo de los residuos sólidos generados por los escombros, comprende una serie de etapas operacionales desde que se generan los desechos, la evacuación segura y fiable, almacenamiento, recolección, transporte, aprovechamiento y disposición final.

Históricamente, se han depositado los residuos sólidos en el suelo de la superficie terrestre o de los océanos. No obstante, el vertido en tierra es el método más común utilizado para la evacuación de residuos. Los vertederos han sido el método más económico y ambientalmente más aceptable para la evacuación de residuos sólidos en todo el mundo. La gestión de vertederos implica la planificación, diseño, explotación, clausura y control de vertederos.

Para la disposición, siendo la última etapa operacional del manejo de residuos sólidos, el método más aplicable prácticamente para todo tipo de desechos es el relleno sanitario, definido como una técnica de disposición final de los residuos en el suelo con las instalaciones especialmente diseñadas y operadas como una obra de saneamiento básico, que cuenta con elementos de control lo suficientemente seguros como para minimizar efectos adversos para el ambiente y para la salud pública.

Cualquier otro sitio utilizado para tal fin, como barrancos, predios baldíos, cuencas hidrológicas, además de perjudiciales a la salubridad del medio ambiente, hacen que el paisaje sea de un aspecto desordenado.

Cuando se exponen importantes ventajas de la reutilización y el reciclaje de escombros para crear nuevos materiales, es indudable que el beneficio ambiental para los ecosistemas urbanos es evidente y cuantificable. Pero, de acuerdo a las dinámicas de una sociedad en la cual hasta ahora el factor económico predomina por encima del factor ambiental, se hace necesaria la comprobación científica acerca del desempeño de un material que utilizará escombros como agregados.

2.2.2. Tipos de desechos

Los tipos de desechos utilizados para el concreto reciclado son provenientes de obras que han sufrido daños por causas naturales, malas planificaciones, obras que han cumplido su funcionalidad y materiales provenientes de industria de concreto, piso u otro material manufacturado, seleccionándolos según sus características físicas.

2.2.2.1. Demolición

Estos residuos proceden de la remodelación y demolición de edificios, de proyectos de repavimentación de carreteras, reparación de puentes y de limpieza asociada con desastres naturales. Normalmente los residuos están constituidos mayormente por concreto, asfalto, ladrillos, bloques y suciedad, otro porcentaje por madera y productos relacionados y un pequeño porcentaje de residuos misceláneos.

2.2.2.2. Otros

Escombros generados por laboratorios provenientes de los ensayos a compresión de ladrillos, bloques, tubos y columnas de concreto, adoquines, baldosas de cemento líquido, cilindros de concreto, y desperdicio de concreto fresco. Así como desperdicios provenientes de industria de concreto, piso u otro material manufacturado.

2.2.3. Impacto ambiental

El impacto ambiental que genera la eliminación de una estructura, ya sea parcial o total, el impacto de los desastres naturales en las construcciones y los residuos que generan laboratorios e industrias de materiales de construcción hacen una gama notable de residuos que causan un impacto en el medio ambiente.

Estos residuos, en términos generales son inertes, ocupan grandes espacios y generan polvo y ruido. Fundamentalmente, el principal problema medioambiental que provocan, es la degradación del paisaje cuando se vierten de manera incontrolada.

Encontrar la manera de manejar estos desechos es de importancia, logrando que se eliminen vertederos inadecuados de residuos procedentes de la construcción que se extienden por toda la ciudad y dándole una aplicación a estos desechos que beneficien a los habitantes así como a las ciudades.

Con el paso del tiempo la exigencia de una mejora en la protección del medioambiente, la preservación de la naturaleza y del paisaje motiva a que en el ámbito de la construcción se controlen estos residuos por medio de una gestión adecuada y, si es posible, minimizar las cantidades de los residuos desechados haciendo que puedan ser reciclados y, en el mejor de los casos, reutilizados.

El sector de la construcción, como otros sectores industriales, ha de afrontar problemas ambientales, debido a esto se buscan nuevos sistemas ahorradores de energía y materias primas en la producción de nuevos materiales y sistemas más eficaces. Una de las líneas de investigación

propuesta en este sentido es el reciclaje y la reutilización de los escombros y su uso posterior en obras, ya sean públicas o privadas.

El aumento de contaminación, los problemas de salud, el deterioro del espacio público, y la necesidad de soluciones ecoeficientes son algunos de los problemas identificados por la acumulación indiscriminada de residuos.

2.3. Reciclado de pavimentos asfálticos

El pavimento de una carretera está sujeto a la acción continua del tráfico y del cambio climático. Estos dos factores, junto con el envejecimiento natural de los materiales, hacen que la capa de rodadura sufra un proceso de progresivo deterioro. Este envejecimiento y deterioro de la capa de rodadura conlleva una disminución paulatina en los niveles de seguridad y confort del tráfico, que al sobrepasar ciertos valores hacen necesaria una operación de conservación.

La conservación de la capa de rodadura, en la actualidad, es un aspecto de gran importancia debido a los recursos que moviliza. El presupuesto necesario para el mantenimiento, así como los problemas ambientales que de él se derivan, justifican la búsqueda de nuevas técnicas que permitan reducir costos y sean respetuosas con el medio. En este contexto, el reciclado de asfalto, como forma de racionalizar los recursos, toma un renovado protagonismo y se convierte en una necesidad.

La creciente sensibilización social acerca de la necesidad de preservar el medioambiente ha hecho que la legislación sea hoy mucho más proteccionista que en el pasado. Esto dificulta la obtención de materias primas adecuadas, aumentando su costo y el de su transporte hasta la obra, ya que casi nunca se producen en el lugar donde se necesitan. De igual manera, es creciente la

dificultad para encontrar un vertedero para los materiales retirados del firme a precio razonable. Estos problemas son especialmente ciertos en ámbitos urbanos.

El desecho de los materiales envejecidos, además de provocar problemas relacionados con la adquisición de nuevas materias y con su vertido, resulta contraproducente desde el punto de vista técnico, ya que pese a estar envejecidos, conservan buena parte de sus cualidades. La reutilización del compuesto asfáltico permite un gran ahorro, ya que requiere sólo de un 1 por ciento a un 3 por ciento de betún adicional, mientras que un nuevo hormigón asfáltico puede necesitar más del 6 por ciento. Este aspecto, junto con el reducido costo de transporte y la escasa energía necesaria para la producción de un firme reciclado, hacen que el ahorro energético sea importante respecto de la construcción convencional de pavimentos.

El sistema de gestión de cualquier asfalto debe controlar sus características durante toda su vida útil. De esta manera se podrá decidir en cualquier momento la mejor opción de conservación para mantener el nivel de servicio exigido por las necesidades del usuario. Estos sistemas pretenden ser la herramienta ideal para encontrar el momento y el procedimiento óptimo para realizar la conservación de modo que se obtenga el mejor resultado posible al menor costo para la sociedad. Incluimos en este costo social tanto el costo efectivo de la reparación como los posibles gastos externos referidos a la circulación de los vehículos, a los posibles accidentes que puedan derivar del mal estado de la capa de rodadura, a los tiempos de demora.

Las operaciones de conservación pueden ser muy frecuentes pero poco importantes o por el contrario, escasas y de mayor extensión. Aquellas actuaciones de menor presupuesto, o más espaciadas en el tiempo tendrán un

mayor costo social. En cambio, una actuación más completa y costosa o más frecuente comportaría un menor costo social. Así pues, es la administración la que debe decidir aquella actuación menos costosa socialmente posible teniendo en cuenta el presupuesto que dispone.

El sistema de gestión proporciona los elementos de juicio necesarios para poder decidir cuál es la mejor estrategia para cada caso particular, considerando a la vez las necesidades y las prioridades de la red. El sistema simula las consecuencias positivas y negativas de cada actuación posible, lo que permite una mejor planificación de la red y una mejor administración del presupuesto destinado a la conservación.

3. MÉTODO MARSHALL PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

El concepto del método Marshall en el diseño de mezclas para pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall, a la vez que desarrolló un criterio de diseño de mezclas.

El método original únicamente es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 milímetros (1 pulg) o menor. El método Marshall modificado se desarrolló para tamaños máximos de 38 milímetros (1,5 pulg), y está pensado para diseño en laboratorio y control en campo de mezclas asfálticas en caliente, con gradación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar.

El método Marshall utiliza especímenes de prueba (briquetas) estándar de 64 milímetros (2 ½ pulg) de alto y 102 milímetros (4 pulg) de diámetro; se preparan mediante un procedimiento para calentar, combinar y compactar mezclas de asfalto agregado (ASTM D1559).

Los dos aspectos principales del método Marshall son: la densidad - análisis de vacíos, la prueba de estabilidad - flujo de los especímenes compactados; cabe mencionar que este proceso de diseño no tiene especificado pruebas para agregados minerales ni para cementos asfálticos.

El procedimiento del método de diseño envuelve los siguientes pasos principales:

- Ensayos de calidad en agregados
- Ensayos de calidad en el bitumen asfáltico
- Tipo y cantidad aproximada de bitumen asfáltico
- Variación del contenido de asfalto residual
- Selección del contenido óptimo de asfalto

La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en libras que un espécimen estándar desarrollará a 60 grados Celsius cuando es ensayado. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0,25 milímetros (1/100 pulg) que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.

Una mezcla asfáltica en caliente consiste en la combinación uniforme de agregados con cemento asfáltico.

El concreto asfáltico es un tipo de mezcla en caliente que cumple con estrictos requisitos de control de calidad, resultando una carpeta de rodadura de alta calidad, con buena calidad de agregados y bien compactada.

3.1. Referencias históricas

Con el acontecimiento de la Segunda Guerra Mundial, el Cuerpo de Ingenieros del ejército de los Estados Unidos de Norteamérica vio, como un importante problema, el diseño y construcción de aeropuertos militares en todos los frentes de batalla.

En ese momento el Cuerpo de Ingenieros tenía un tipo de ensayos simples, esquemas de trabajo para los proyectos y el control de calidad de campo para pavimentos asfálticos.

Carecían también, de un criterio racional para la determinación del contenido óptimo de asfalto en mezclas que serían sometidas a enormes cargas por los aviones y vehículos militares.

Teniendo en cuenta estos problemas, el Cuerpo de Ingenieros inició un estudio para seleccionar aparatos de ensayo simples y de fácil transporte que podría ser usado en campo como control de calidad.

La segunda fase de este estudio era determinar un método de compactar cuerpos de prueba en laboratorio, cuyos valores de densidad fueran comparables y compatibles con aquellos obtenidos en campo.

La tercera fase de esa búsqueda era naturalmente el establecimiento de un criterio de proyecto racional de ensayos previos de control.

Así fue que el Cuerpo de Ingenieros adoptó un aparato y método de proyecto de mezclas asfálticas, concebido por Bruce Marshall del Departamento de Caminos del estado de Mississippi.

El Método Marshall para el diseño de mezclas fue desarrollado por Bruce Marshall, del Mississippi Highway Department alrededor de 1939. El ensayo Marshall, en su forma actual, surgió de una investigación iniciada por The Corps of Engineers Waterways (WES) de los Estados Unidos en 1943.

A fin de determinar un método de laboratorio para la compactación de los cuerpos sometidos a prueba y para un criterio de seguridad de las propiedades de ciertas mezclas con el ensayo de Marshall, fue necesario construir un gran número de pistas experimentales, en las cuales se variaban el porcentaje de asfalto y la granulometría de los agregados. Diferentes cargas fueron aplicadas a estas pistas experimentales un gran número de veces, para determinar el efecto de compactación por el propio tráfico. De dicho estudio el Cuerpo de Ingenieros estableció el siguiente criterio, basado en los resultados obtenidos con el ensayo de Marshall:

La utilización de este criterio debe ser limitado a las mezclas asfálticas, utilizándose cementos asfálticos de penetración usual, y contenido de agregados con diámetro máximo de una pulgada (2,54 cm) o menos.

El Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos estableció que para que haya equilibrio entre la estabilidad y la durabilidad, los vacíos ocupados por aire en la mezcla total serian limitados entre 3 y 5 por ciento.

Este método fue normalizado por la norma ASTM D-1559, denominado Resistencia al Flujo Plástico de Mezcla Bituminosa usando el equipo Marshall (el método AASHTO T-245 es similar a la Norma ASTM D-1559, excepto en lo referente al martillo operado mecánicamente, en lugar de un martillo operado manualmente), sin embargo, actualmente la norma ASTM D-1559 ha sido reemplazada por otro procedimiento denominado Superpave.

3.2. Objetivo

Determinar el contenido óptimo de asfalto para una mezcla específica de agregados; así como proporcionar información sobre las características físicas y mecánicas de mezcla asfáltica en caliente, de tal manera que sea posible establecer si cumple en lo referente al establecimiento de densidades y contenidos óptimos de vacío durante la construcción de la capa del pavimento.

El método consiste en ensayar una serie de probetas, cada una preparada con la misma granulometría y con diferentes contenidos de asfalto. Dichas probetas se preparan siguiendo un procedimiento específico para calentar el asfalto y los agregados, mezclar y compactar.

Las probetas preparadas con el método se rompen en la prensa Marshall, determinado su estabilidad (resistencia) y fluencia (deformación). Si se desean conocer los porcentajes de vacíos de las mezclas así fabricadas, se determinarán previamente los pesos específicos de los materiales empleados y de las probetas compactadas, antes del ensayo de rotura.

3.3. Características de la mezcla asfáltica

Al realizar el diseño de mezclas asfálticas en caliente, se deben obtener las siguientes características, dependiendo del desempeño esperado de la carpeta asfáltica así como sus propiedades mecánicas, las cuales se ven afectadas por el medio ambiente donde sean utilizadas.

3.3.1. Selección de la muestra de material

Diferentes agregados y asfaltos presentan diferentes características, estas características tienen un impacto directo sobre la naturaleza misma del pavimento.

El primer paso en el método de diseño, entonces, es determinar las cualidades (estabilidad, durabilidad, trabajabilidad, resistencia al deslizamiento), que debe tener la mezcla de pavimentación y seleccionar un tipo de agregado y un tipo compatible de asfalto que puedan combinarse, para producir esas cualidades. Una vez hecho esto, se puede empezar con la preparación de los ensayos.

La primera preparación, para los ensayos consta de reunir muestras de asfalto y del agregado que van a ser usados en la mezcla de pavimentación. Es importante que las muestras de asfalto tengan características idénticas a las del asfalto que va a ser usado en la mezcla final. Lo mismo debe ocurrir con las muestras de agregado. La razón es simple: los datos extraídos de los procedimientos de diseño de mezcla determinan la fórmula o receta para la mezcla de pavimentación. La fórmula será exacta solamente si los ingredientes ensayados en el laboratorio tienen características idénticas a los ingredientes usados en el producto final.

Una amplia variedad de problemas graves, que van desde una mala trabajabilidad de la mezcla hasta una falla prematura del pavimento, son el resultado histórico de variaciones ocurridas entre los materiales ensayados en el laboratorio y los utilizados en la realidad.

3.3.2. Contenido óptimo de bitumen

El contenido óptimo de asfalto para la carpeta de rodadura es la cantidad de asfalto que forma una membrana alrededor de las partículas, de espesor suficiente para resistir los elementos del intemperismo evitando que el asfalto se oxide con rapidez. Por otro lado, no debe ser tan gruesa como para que la mezcla pierda estabilidad, es decir, deformación excesiva por flujo plástico o resistencia y no soporte las cargas de los vehículos. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento.

El Método Marshall, como se presenta en este trabajo, sólo se aplica a mezclas asfálticas (en caliente) de pavimentación que usan cemento asfáltico clasificado con viscosidad o penetración y que contiene agregados con tamaños máximo de una pulgada (25,0 mm) o menos. El método puede ser usado, para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas (en caliente) de pavimentación.

El Método Marshall usa muestras normalizadas de prueba (probetas) de 2,5 pulgadas (64 mm) de espesor por cuatro pulgadas (102 mm) de diámetro. Una serie de probetas, cada una con la misma combinación de agregados pero con diferente contenido de asfalto, es preparada usando un procedimiento específico, para calentar, mezclar y compactar mezclas asfálticas de agregado.

Los 2 datos más importantes del diseño de mezclas del Método Marshall son: análisis de vacíos y una prueba de estabilidad – flujo de las muestras compactadas.

3.3.3. Resistencia a la deformación permanente

La resistencia a la deformación permanente es crítica al elevarse la temperatura durante los meses de verano cuando la viscosidad del cemento asfáltico baja y la carga del tráfico es soportada por la estructura del agregado en mayor proporción.

3.3.4. Resistencia a la fatiga

La mezcla no se agrietará por causa de la repetición de las cargas en un período de tiempo (período de diseño), el cual dependerá de las situaciones en las que se utilice la mezcla asfáltica, es decir las cargas dinámicas que se presenten sobre la carpeta asfáltica no deben afectar sus características físicas.

3.3.5. Resistencia al agrietamiento por bajas temperaturas

Esta propiedad es importante en regiones frías, que experimentan bajas temperaturas, lo cual produce una contracción que puede reducir sus propiedades mecánicas y así afectar la calidad y eficiencia de la mezcla asfáltica. Sin embargo, para ello se utilizan aditivos diversos.

3.3.6. Durabilidad

La mezcla contiene suficiente cemento asfáltico, asegurando un adecuado espesor de película rodeando las partículas de agregados, así se minimiza el endurecimiento del cemento asfáltico. El curando durante la producción y la puesta en servicio también contribuye a esta característica. Por otro lado, la mezcla compactada no debería tener altos porcentajes de vacíos que aceleren el proceso de curado.

3.3.7. Resistencia a la humedad

Algunas mezclas expuestas a humedad pierden adhesión entre el agregado y el cemento asfáltico. Las propiedades del agregado son las principales responsables de este fenómeno, aunque algunos cementos asfálticos son más propensos a separarse que otros.

3.3.8. Resistencia al patinaje

Este requisito es solamente aplicable a mezclas superficiales que sean diseñadas para proporcionar la suficiente fricción entre los vehículos y la carpeta asfáltica. Esta característica depende en gran parte de la calidad de los agregados en la mezcla asfáltica, por lo que se deben realizar estudios de desgaste a los agregados utilizados.

3.3.9. Trabajabilidad

La mezcla debe ser capaz de ser colocada y compactada con razonable esfuerzo, los problemas de trabajabilidad se presentan frecuentemente durante los trabajos de pavimentación cuando la calidad de los agregados o la adherencia por medio del bitumen es muy baja.

4. MÉTODO MARSHALL DE DISEÑO DE MEZCLAS

Este método está elaborado según especificaciones de las normas AASHTO T245-97 (Método estándar de prueba para la resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas con la prensa de estabilidad Marshall), y ASTM D 1559 (Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall e interpretación de resultados).

4.1. Descripción del ensayo

El propósito del Método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto, para una combinación específica de agregados realizando probetas de ensayo con diferentes cantidades de agregado y cemento asfáltico, siguiendo distintos ensayos para establecer sus características mecánicas y físicas.

4.1.1. Equipo a utilizar

El equipo utilizado durante los ensayos para establecer el contenido de bitumen óptimo en la mezcla asfáltica es sencillo; pero al ser una mezcla en caliente se deben tomar las debidas precauciones, en especial en la etapa de compactación, debido a que la mezcla se manipula a una temperatura elevada.

El equipo estándar utilizado en los ensayos para mezclas asfálticas por el método Marshall, se enlista a continuación:

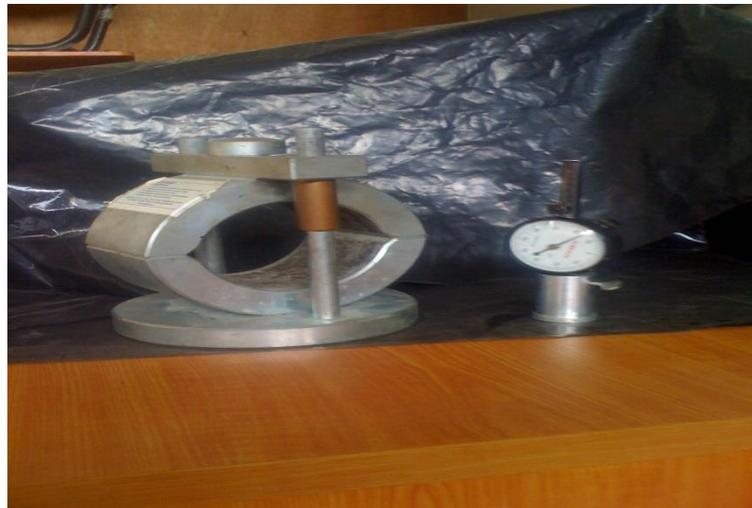
- Prensa de estabilidad Marshall, provista de un anillo de lectura de resistencia con capacidad de 10 000 libras (44,50 kN).
- Cabeza de rotura de estabilidad Marshall, de 4 pulgadas (101,7 mm) de diámetro. Peso total de 20 libras (9 kg).
- Molde de compactación Marshall, de 4 pulgadas (101,7 mm) de diámetro y peso de 8 libras (3,6 kg).
- Martillo de compactación Marshall, de 10 libras (4,54 kg) con una altura de caída de 18 pulgadas (457 mm). Peso total de 17 libras (7,7 kg).
- Pedestal de compactación, con dimensiones de 8 x 8 pulgadas de lado y 18 pulgadas de altura. Con un peso total de 85 libras (38 kg).
- Placa superior del pedestal de compactación, con dimensiones de 12 x 12 pulgadas de lado y 1 pulgada de espesor.
- Baño de circulación de agua, tipo magnético, con capacidad de calentar hasta 12 probetas Marshall de 4 pulgadas. Con termómetro de control. Con un peso total de 47 libras (21,4 kg).
- Picnómetro de vacíos, con capacidad de 2 000 gramos y un peso total de 15 libras (6,8 kg).
- Extractor de la centrífuga del asfalto, velocidad variable entre 0–3600 revoluciones por minuto, con freno de parada automático. Peso total de 70 libras (32 kg).

Figura 10. **Prensa de estabilidad Marshall**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 11. **Cabeza de estabilidad Marshall con deformímetro**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 12. **Moldes de compactación Marshall**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 13. **Martillo de compactación**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 14. **Pedestal de compactación**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 15. **Baño de circulación de agua**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 16. **Picnómetro de vacíos**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 17. **Extractor de la centrifuga de asfalto**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

4.2. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico es la medición y graduación que se realiza a un material, para conocer su origen y la cantidad de partículas correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica.

El método de determinación granulométrico más sencillo es hacer pasar las partículas por una serie de mallas de distintos tamaños de aberturas que actúan como filtros, lo que se llama comúnmente columna de tamices.

Para su realización se utiliza una serie de tamices con diferentes diámetros que son ensamblados en una columna. En la parte superior, donde se encuentra el tamiz de mayor diámetro, se agrega el material original (suelo o sedimento mezclado) y la columna de tamices se somete a vibración y movimientos rotatorios intensos en una máquina especial. Luego de algunos minutos, se retiran los tamices y se desensamblan, tomando por separado los pesos de material retenido en cada uno de ellos y que, en su suma, deben corresponder al peso total del material que inicialmente se colocó en la columna de tamices (conservación de la masa).

Las partículas del agregado deben ser dosificadas y combinadas en proporciones que resulten en una mezcla compuesta con una curva granulométrica continua, sin quiebres bruscos, situada dentro de los límites para el tamaño máximo nominal apropiado del agregado indicado en la tabla 401-1 de las especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes (libro azul), correspondiente a graduaciones densas Norma ASTM D 3515.

Tabla I. **Graduación de agregados para pavimento de concreto asfáltico**

Tamaño del Tamiz	Porcentaje en Masa que Pasa el Tamiz designado (AASHTO T 27 y T 11)					
	Graduación Designada y Tamaño Máximo Nominal					
	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"
63,00 mm	100					
50,00 mm	90-100	100				
38,10 mm	-	90-100	100			
25,00 mm	60-80	-	90-100	100		
19,00 mm	-	56-80	-	90-100	100	
12,50 mm	35-65	-	56-80	-	90-100	100
9,50 mm	-	-	-	56-80	-	90-100
4,75 mm	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85
2,36 mm	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67
0,30 mm	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23
0,075 mm	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10

Fuente: tabla 401-1. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes.*
Edición 2000, p. 401-3.

4.2.1. Preparación del agregado

La relación viscosidad – temperatura del cemento asfáltico que va a ser usado debe ser ya conocida, para poder establecer las temperaturas de mezclado y compactación en el laboratorio.

En consecuencia, los procedimientos preliminares se enfocan hacia el agregado, con el propósito de identificar exactamente sus características. Estos procedimientos incluyen: determinar su abrasión, peso específico y efectuar un análisis granulométrico por lavado.

4.2.2. Abrasión de los ángeles

Las partículas que conforman el agregado presente en el asfalto natural deberán poseer una resistencia a la abrasión medida en el ensayo al desgaste de los agregados por medio de la máquina de los ángeles Norma ASTM C-131 y AASHTO T96, no mayor de treinta y cinco por ciento (35%) en materiales de sub-base y base y no mayor de treinta por ciento (30%) en materiales destinados a la carpeta de rodadura. Este procedimiento se realiza en agregado grueso para partículas que no sobrepasan 1 ½ pulgadas (38,1 mm) de tamaño, para la resistencia a la abrasión con efectos de impacto y fricción, utilizando la máquina de los ángeles, que debido a la rotación del tambor de dicha máquina, provoca que el material y las esferas se impacten, ocasionando fracturas que hacen disminuir el tamaño de las partículas.

La cantidad de material utilizada es de 5 000 gramos de agregado grueso, clasificado según el tipo de abrasión especificada en la tabla II.

Tabla II. **Graduación para tipo de abrasión de agregado grueso**

TIPO	TAMAÑO DE MATERIAL RETENIDO	MASA EN (g) DE CADA TAMAÑO	NO. DE ESFERAS	REV.	TIEMPO(min)
A	1" ¾" ½" 3/8"	1 250 ± 10	12	500	17
B	½" 3/8"	2 500 ± 10	11	500	17
C	¼" 4"	2 500 ± 10	8	500	17
D	No. 8	2 500 ± 10	6	500	17

Fuente: Norma ASTM (American Society for Testing and Materials) C 131.

El tipo de abrasión utilizada para el análisis del barro cocido debido al tamaño de sus partículas y el porcentaje de desgaste obtenido se muestran en la tabla III.

Tabla III. **Resultados de abrasión de desechos de ladrillo de barro cocido**

REFERENCIA	MUESTRA
Norma de ensayo	ASTM C-131
Graduación	"B"
% Desgaste	82,86

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Máquina para abrasión de los ángeles**



Fuente: Laboratorio de Concretos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

4.2.3. Dosificación del agregado

Teniendo en cuenta que el valor del porcentaje de abrasión de las partículas del barro cocido obtenido es muy elevado se optó por utilizar una dosificación tipo F ya que es la que analiza los tamaños más pequeños de agregado.

Observando que los valores de dosificación del agregado vienen dados como un porcentaje de la masa total de material a utilizar se puede establecer una fórmula sencilla de dosificación de material retenido por cada tamiz sin afectar el comportamiento descrito por la gráfica de curvas de graduación.

Fórmulas para dosificación de agregados

$$PNa_{\text{pasa Ti}} = \frac{\%Pasa * PNT}{100}$$

Donde:

$PNa_{\text{pasa Ti}}$ = Peso neto acumulado que pasa en el tamiz analizado
 $\%Pasa$ = Porcentaje que pasa por el tamiz analizado
 PNT = Peso neto total de material

$$PN_{\text{ret}} = PNa_{\text{pasaTs}} - PNa_{\text{pasa Ti}}$$

Donde:

PN_{ret} = Peso neto retenido por el tamiz
 PNa_{pasaTs} = Peso neto acumulado que pasa en el tamiz superior
 $PNa_{\text{pasa Ti}}$ = Peso neto acumulado que pasa en el tamiz analizado

4.2.3.1. Curva de densidad máxima Fuller

La distribución granulométrica de los agregados fue estudiada por muchos investigadores y de sus experiencias surgen curvas tales como la de Fuller, que compatibilizan dentro de ciertos límites la máxima compactación (densidad) con el mínimo de vacíos de agregado mineral.

La granulometría de máxima densidad representa la graduación para la cual las partículas de agregado se acomodan entre sí, formando la dosificación más compacta posible.

Esta granulometría debe evitarse porque habría muy poco espacio entre los agregados como para permitir el desarrollo de una película de asfalto lo suficientemente gruesa, como para obtener una mezcla durable.

Fórmula para la curva de densidad máxima Fuller

$$\%Pasa = 100 * \left(\frac{d}{D} \right)^{0.5}$$

Donde:

% Pasa= Porcentaje que pasa por el tamiz analizado

d = Abertura en milímetros del tamiz analizado

D = Abertura en milímetros del tamiz máximo nominal

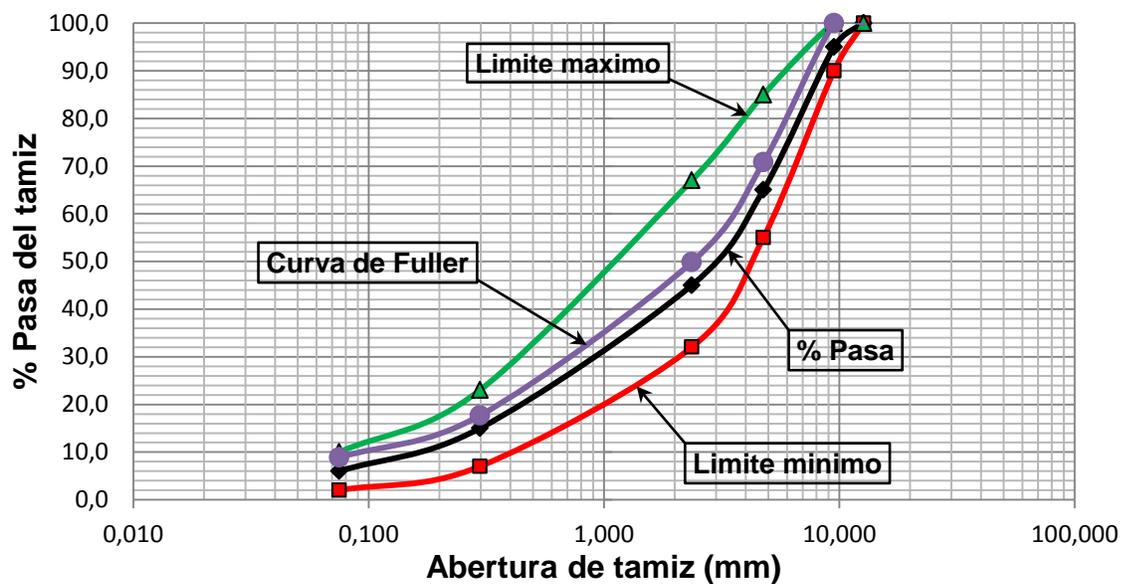
Conociendo los porcentajes que forman la curva Fuller se puede dosificar el agregado de una forma que no existan inconvenientes futuros.

Tabla IV. Dosificación tipo F para el análisis del barro cocido

Tamaño del tamiz		Graduación Tipo F (tamaño máximo nominal 3/8)		
Abertura estándar	No. alternativo	%Pasa (AASHTO T27 y T11)	%Pasa utilizado	Curva de densidad máxima Fuller
12,50	½"	100	100	100
9,50	3/8"	90-100	95	100
4,75	No. 4	55-85	65	70,79
2,36	No. 8	32-67	45	49,84
0,30	No. 50	7-23	15	17,68
0,075	No. 200	2-10	6	8,89

Fuente: elaboración propia

Figura 19. Gráfica de curvas de graduación tipo F



Fuente elaboración propia.

Al determinar los porcentajes de masa utilizados por cada tamiz se dosifica el agregado teniendo en cuenta que el porcentaje de asfalto afecta al porcentaje total de material dentro de la mezcla.

4.3. Análisis de cemento asfáltico

El cemento asfáltico es un producto bituminoso altamente viscoso o casi sólido a temperatura ambiente, con propiedades adhesivas e impermeables y cuya consistencia disminuye al ser calentado. Es obtenido por destilación directa del petróleo.

La clasificación de asfaltos se realiza de diversas formas siendo la viscosidad una de las más importantes para lo cual se aplica la Norma ASTM D-3381 (Clasificación estándar por grado de viscosidad para cementos asfálticos utilizados en pavimentación) que clasifica los asfaltos en base a su viscosidad absoluta a 60 grados Celsius. El poise (P) es la unidad normal de medida. Dependiendo de esta, los asfaltos se clasifican en:

- AC- 5 (500 ± 100): utilizado en la fabricación de emulsiones asfálticas para riego de impregnación, riego de liga, en estabilizaciones y en mezclas asfálticas en caliente.
- AC- 10 (1000 ± 200): utilizado en la fabricación de emulsiones asfálticas para carpetas y morteros de mezcla en frío.
- AC- 20 (2000 ± 400): utilizado en la fabricación de mezclas en caliente, emulsiones asfálticas usadas en morteros y carpetas de mezclas en frío.
- AC- 30 (3000 ± 600): utilizado en la fabricación de mezclas en caliente, emulsiones para carpetas y mezclas en frío.

Para el análisis del diseño Marshall se utilizó un cemento asfáltico tipo AC-20 este tipo de asfalto se especifica por su viscosidad cinemática a 60 grados Celsius y es el más utilizado en la construcción y conservación de carreteras.

Tabla V. **Caracterización del bitumen asfáltico tipo AC-20**

Ensayo	Unidad	mínimo	máximo	Método ASTM
Pérdida de masa por calentamiento	Porcentaje (%)	0,5	0,89	D 1754
Viscosidad absoluta a 60 °C	Poises (P)	1 600	2 400	D 2171 D 4402
Viscosidad cinemática a 135 °C	Centistokes (cSt)	300		D 2170
Gravedad específica	Gramos/centimetro ³ (g/cm ³)	1,300		D 1188
Densidad	Libra/galon (lb/gal)	8,73		D 1298

Fuente: ficha técnica versión 3. BITAFAL. 2013.

El rango entre el cual se debe realizar un diseño de concreto asfáltico varía de acuerdo a las características del agregado a utilizar, cuando un agregado es bueno en cuanto a sus características físicas y tiene un porcentaje de desgaste bajo, generalmente la cantidad de cemento asfáltico para iniciar el diseño se reduce.

En este caso el residuo de barro cocido, tienen un desgaste alto por lo cual el rango de dosificación de bitumen asfáltico se varía entre 10 y 18 por ciento para los diseños.

Al analizar cómo se le agregara el porcentaje al diseño, el rango de porcentaje de cemento asfáltico sería de la siguiente manera: 10, 14, 15, 16, 17, 18, es decir se realizan 2 probetas de cada punto, y se agrega dicho porcentaje en peso de la muestra total que será de 800 gramos.

La cantidad de material que forma la mezcla asfáltica se determina por medio de la altura de los moldes de compactación a utilizar ya que la altura de los mismos no afecta el ensayo a realizar pero si tiene efecto en la compactación de las probetas a analizar.

Tabla VI. **Dosificación por peso de la mezcla asfáltica con contenido de bitumen de 10 y 14%**

		Asfalto	10%	Asfalto	14%
		Asfalto (g)	80	Asfalto (g)	112
		Peso neto (g)	720	Peso neto (g)	688

Tamiz	% pasa	PNa pasa (g)	PN ret (g)	PNa pasa (g)	PN ret (g)
1/2	100	720,00	0,00	688,00	0,00
3/8	95	684,00	36,00	653,60	34,40
No. 4	65	468,00	216,00	447,20	106,40
No. 8	45	324,00	144,00	309,60	137,60
No. 50	15	108,00	216,00	103,20	206,40
No. 200	6	43,20	64,80	41,28	61,92
fondo	0	0	43,20	0	41,28

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Dosificación por peso de la mezcla asfáltica con contenido de bitumen de 15 y 16%**

Asfalto	15%	Asfalto	16%
Asfalto (g)	120	Asfalto (g)	128
Peso neto (g)	680	Peso neto (g)	672

Tamiz	% pasa	PNa pasa (g)	PN ret (g)	PNa pasa (g)	PN ret (g)
1/2	100	680,00	0,00	672,00	0,00
3/8	95	646,00	34,00	638,40	33,60
No. 4	65	442,00	204,00	436,80	201,60
No. 8	45	306,00	136,00	302,40	134,40
No. 50	15	102,00	204,00	100,80	201,60
No. 200	6	40,80	61,20	40,32	60,48
fondo	0	0	40,80	0	40,32

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Dosificación por peso de la mezcla asfáltica con contenido de bitumen de 17 y 18%**

Asfalto	17%	Asfalto	18%
Asfalto (g)	136	Asfalto (g)	144
Peso neto (g)	664	Peso neto (g)	656

Tamiz	% pasa	PNa pasa (g)	PN ret (g)	PNa pasa (g)	PN ret (g)
1/2	100	664,00	0,00	656,00	0,00
3/8	95	630,80	33,20	623,20	32,80
No 4	70	431,60	199,20	426,40	196,80
No 8	49,5	298,80	132,80	295,20	131,20
No 50	15	99,60	199,20	98,40	196,80
No 200	6	39,84	59,76	39,36	59,04
fondo	0	0	39,84	0	39,36

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Dosificación de agregado**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

4.4. **Compactación**

La preparación de los compuestos de la mezcla asfáltica (agregado y bitumen) se realiza por separado siguiendo las proporciones establecidas para la dosificación según el tipo de granulometría que se esté utilizando. Al tener el agregado preparado se calienta a 60 grados Celsius (140°F) para que el bitumen tenga una mayor facilidad de adherencia.

Cuando el bitumen es vertido en el agregado se debe tener en cuenta que este es viscoso por lo que el control que debe tenerse para aplicar la cantidad exacta establecida debe ser muy cuidadoso. Cuando la proporción esté lista se debe mezclar constantemente para que todas las partículas del agregado sean cubiertas por una capa de bitumen hasta que la temperatura de la mezcla alcance 140 grados Celsius (284°F).

Antes de verter la mezcla dentro de los moldes de compactación estos se deben calentar durante unos minutos, para que el cambio de temperatura en el momento de la compactación no afecte el acoplado de las partículas de la mezcla.

El número de golpes del martillo (35, 50, 75), depende de la cantidad del tránsito para la cual la mezcla está siendo diseñada. En la actualidad es recomendable compactar las muestras utilizando 75 golpes, ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes. Así, una probeta Marshall de 35 golpes recibe, realmente un total de 70 golpes, una probeta de 50 golpes recibe 100 impactos y una de 75 golpes recibe 150 impactos. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

Figura 21. **Dosificación de bitumen**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 22. **Mezcla asfáltica en caliente**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 23. **Equipo de compactación Marshall. Moldes, martillo, pedestal**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Tabla IX. **Compactación de muestras**

% asf	Muestras	Material (g)	Agregado (g)	Asfalto (g)	Temperatura de mezclado °C (°F)	Golpes por cara	Total de golpes
10	2	800	720	80	140 (284)	75	150
14	2	800	688	112	140 (284)	75	150
15	2	800	680	120	140 (284)	75	150
16	2	800	672	128	140 (284)	75	150
17	2	800	664	136	140 (284)	75	150
18	2	800	656	144	140 (284)	75	150

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Equipo de extracción de probetas**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 25. **Probetas compactadas**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

4.5. Determinación del peso específico

El peso específico o gravedad específica de una sustancia o material es la proporción peso-volumen de una unidad de esa sustancia comparada con la proporción peso-volumen de una unidad de agua. En otras palabras es el peso por unidad de volumen que posee el material.

4.5.1. Peso específico del agregado

La realización de gravedades específicas de agregado, cambia el procedimiento de ensayo, ya que ahora se realizan las gravedades con la ayuda de un matraz de 500 mililitros, debido a que el residuo de barro cocido es un material fino con pocas partículas gruesas que se pudieran considerar como sólidas.

Fórmulas de peso específico para finos

Gravedad específica bruta del agregado (Gsba)

$$Gsba = \frac{Pa}{Pmw + Pas - Pamw}$$

Gravedad específica efectiva del agregado (Gsea)

$$Gsea = \frac{Pas}{Pmw + Pas - Pamw}$$

Gravedad específica aparente del agregado (Gsaa)

$$G_{sba} = \frac{P_a}{P_{mw} + P_a - P_{amw}}$$

Donde:

P_a = Peso del agregado seco

P_{mw} = Peso del matraz (500 ml) + agua

P_{amw} = Peso del matraz (500 ml) + agua + agregado

P_{as} = Peso del agregado en condición seco saturado

Tabla X. **Peso específico del residuo de barro cocido**

Pa (g)	Pmw (g)	Pamw (g)	Pas (g)
200	674,07	795,35	210

Gsba	Gsea	Gsaa
2,254	2,367	2,541

Fuente: elaboración propia.

4.5.2. Peso específico de la mezcla

El cálculo del peso específico es utilizado para conocer el peso de la muestra sin el contenido de vacíos dentro de la misma y así establecer la cantidad de espacios sin contenido de bitumen dentro de cada una de las probetas.

El método para calcular el peso específico se basa en conocer diferentes pesos de la probeta después de extraerla del molde de compactación.

Fórmulas de peso específico para sólidos

Gravedad específica bruta de la mezcla (Gsbm)

$$Gsbm = \frac{Pnm}{Psm - Pssm}$$

Gravedad específica efectiva de la mezcla (Gsem)

$$Gsem = \frac{Psm}{Psm - Pssm}$$

Gravedad específica aparente de la mezcla (Gsam)

$$G_{sam} = \frac{P_{nm}}{P_{nm} - P_{ssm}}$$

Donde:

P_{nm} = Peso neto de la mezcla o peso en el aire

P_{sm} = Peso saturado de la mezcla

P_{ssm} = Peso saturado sumergido de la mezcla

El peso neto o peso en el aire se mide cuando la probeta es extraída del molde de compactación, el peso saturado se mide después de mantener sumergida la probeta en el agua durante un tiempo aproximado de 24 horas y el peso sumergido saturado se mide después de saturar la probeta mientras la misma se mantiene suspendida dentro de un volumen de agua.

Tabla XI. **Peso específico de mezcla asfáltica**

% asf	Muestra	Pnm (g)	Psm (g)	Pssm (g)	Gsbm	Gsem	Gsam
10	1	759,25	780,40	320,23	1,650	1,696	1,729
	2	750,01	772,39	312,10	1,629	1,678	1,713
14	1	769,36	785,17	345,20	1,749	1,785	1,814
	2	768,25	786,55	343,61	1,734	1,776	1,809
15	1	778,55	790,40	353,95	1,784	1,811	1,834
	2	776,05	787,60	350,95	1,777	1,804	1,826
16	1	771,63	781,05	351,72	1,797	1,819	1,838
	2	770,49	777,91	354,91	1,821	1,839	1,854
17	1	786,37	791,35	365,45	1,846	1,858	1,868
	2	782,60	786,55	364,37	1,854	1,863	1,871
18	1	790,46	792,40	388,56	1,957	1,962	1,967
	2	784,52	788,71	394,37	1,989	2,000	2,011

Fuente: elaboración propia.

4.5.3. Método Rice

Esta gravedad específica es la masa por unidad de volumen máxima que puede llegar a tener la mezcla asfáltica. Existen dos formas de encontrarla, ya sea por el ensayo de la Norma ASTM 2041 y AASHTO T 209 donde se indican el procedimiento de ensayo, el cual es similar a la gravedad específica de los agregados con la diferencia del picnómetro de vacíos que tiene una capacidad de 2 000 mililitros y el controlador de presión que se debe ajustar a no más de 30 milímetros de mercurio (4 kpa), o por la ecuación de densidad máxima teórica de la mezcla.

Fórmula de densidad máxima Rice

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{\% \text{ asf}}{G_b} + \frac{\% \text{ agr}}{G_{sea}}}$$

Donde:

- G_{mm} = Densidad máxima teórica (rice)
- G_b = Gravedad específica del asfalto
- G_{sea} = Gravedad específica efectiva del agregado
- % asf = Porcentaje de asfalto en la mezcla
- % agr = Porcentaje de agregado en la mezcla

Tabla XII. **Gravedad máxima teórica de la mezcla por el método rice**

% asf	% agr	Gb	Gsea	Gmm
10	90	1,300	2,367	2,187
14	86	1,300	2,367	2,123
15	85	1,300	2,367	2,108
16	84	1,300	2,367	2,092
17	83	1,300	2,367	2,077
18	82	1,300	2,367	2,062

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Equipo para ensayo Rice**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

4.6. Ensayos de estabilidad y fluencia

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla y la fluencia mide la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla, para esto las probetas son calentadas en un baño de agua a 60 grados Celsius (140°F), esta temperatura representa, comúnmente la temperatura más caliente que la carpeta de rodadura experimenta durante su servicio.

La probeta es removida del baño de agua, se seca la humedad superficial y se coloca rápidamente en la prensa de estabilidad Marshall para ser analizada.

Figura 27. **Probetas sumergidas en el baño de agua**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 28. **Colocación de probeta en cabeza de estabilidad Marshall**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 29. **Ensayo de probetas en la prensa de estabilidad Marshall**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

4.6.1. Valor de la estabilidad Marshall

Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a esto, las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficientemente altas para soportar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exige el rango de condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto menos durable que lo deseado. El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente.

Tabla XIII. Valores de estabilidad para residuos de barro cocido

% asf	Muestra	Estabilidad (lb)	Promedio (lb)
10	1	2 417,92	2 394,34
	2	2 370,75	
14	1	3 547,17	3 579,72
	2	3 612,26	
15	1	3 500,00	3 406,13
	2	3 312,26	
16	1	3 011,32	3 100,57
	2	3 189,81	
17	1	2 814,15	2 936,32
	2	3 058,49	
18	1	2 823,58	2 677,36
	2	2 531,13	

Fuente: elaboración propia.

4.6.2. Valor de la fluencia Marshall

El ensayo de estabilidad indica, en centésimas de pulgada (0.01 pulg.), la deformación de la probeta provocada por la disminución en el diámetro vertical durante el análisis.

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall se consideran demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tienen tendencia a deformarse fácilmente bajo las cargas del tránsito.

Tabla XIV. **Valores de fluencia para residuos de barro cocido**

% asf	Muestra	Fluencia (0,01 pulg.)	Promedio (0,01 pulg.)
10	1	14	13,50
	2	13	
14	1	21	21
	2	21	
15	1	28	27
	2	26	
16	1	25	25,5
	2	26	
17	1	33	27
	2	21	
18	1	24	25,50
	2	27	

Fuente: elaboración propia.

4.6.3. Relación de estabilidad y fluencia

Es la relación que resulta al dividir el valor de estabilidad dentro del valor de flujo, lo cual indica la proporción por centésima de pulgada que se deforma la probeta para la carga aplicada, en otras palabras nos indica la resistencia por centésima de pulgada que tendrá la mezcla asfáltica; debiendo estar este entre 120 y 275.

Tabla XV. **Valores de relación estabilidad y fluencia con residuos de barro cocido**

% asf	Estabilidad Promedio (lb)	Fluencia Promedio (0,01 pulg.)	Relación Estabilidad/Fluencia (lb/0,01 pulg.)
10	2 394,34	13,50	177,36
14	3 579,72	21	170,46
15	3 406,13	27	126,15
16	3 100,57	25,5	121,59
17	2 936,32	27	108,75
18	2 677,36	25,5	104,99

Fuente: elaboración propia.

4.7. Cálculo de curvas de densidad

Cada una de las curvas muestra el comportamiento de la mezcla asfáltica según el parámetro analizado lo que permite establecer los valores necesarios según el tipo de función que tendrá la carpeta asfáltica.

4.7.1. Densidad de vacíos en la mezcla asfáltica

Los vacíos son las pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto y puede ser calculado a partir del peso específico de los componentes de la mezcla asfáltica.

El contenido de vacíos está directamente relacionado a la cantidad de asfalto dentro de la mezcla. Entre más alta es la cantidad de asfalto, menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla y viceversa.

Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar al menor número posible (en realidad) de vacíos, preferiblemente menos del ocho por ciento.

Esta densidad se calcula de diversas formas las cuales siguen lo establecido en las Normas ASTM D 3203 y AASHTO T 269 de la siguiente forma:

Fórmula para calcular el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica

$$\%Va = \frac{Pnm - Psm}{Pnm} * 100$$

Donde:

%Va = Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica

Pnm = Peso neto de la mezcla asfáltica en el aire

Psm = Peso saturado de la mezcla asfáltica

Tabla XVI. Valores de porcentaje de vacíos en la mezcla

% asf	Muestra	Pnm (g)	Psm (g)	%Va	Promedio %Va
10	1	759,25	780,40	2,79	2,88
	2	750,01	772,39	2,98	
14	1	769,36	785,17	2,05	2,22
	2	768,25	786,55	2,38	
15	1	778,55	790,40	1,52	1,51
	2	776,05	787,60	1,49	
16	1	771,63	781,05	1,22	1,09
	2	770,49	777,91	0,96	
17	1	786,37	791,35	0,63	0,57
	2	782,60	786,55	0,50	
18	1	790,46	792,40	0,25	0,39
	2	784,52	788,71	0,53	

Fuente: elaboración propia.

4.7.2. Densidad de vacíos en el agregado mineral

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (que es 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 VAM más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VAM los cuales están especificados y recomendados en función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas del agregado, más durable será la mezcla.

Los vacíos en el agregado mineral se expresan como un porcentaje del volumen total de la mezcla y pueden ser calculados al restar el volumen de agregado determinado por el peso específico del agregado y el volumen total de la mezcla compactada.

Fórmula para calcular el porcentaje de vacíos en el agregado mineral

$$\%VAM = \left(\frac{\left(\frac{Pnm}{Gsem} \right) - \left(\frac{Pam}{Gsea} \right)}{Pnm} \right) * 100$$

Donde:

%VAM = Porcentaje de vacíos en el agregado mineral

Pnm = Peso neto de la mezcla asfáltica

Pam = Peso del agregado en la mezcla

Gsem = Gravedad específica efectiva de la mezcla asfáltica

Gsea = Gravedad específica efectiva del agregado

Tabla XVII. Valores del porcentaje de vacíos en el agregado mineral

% asf	% agr	Pnm (g)	Pam (g)	Gsem	Gsea	%VAM	Promedio %VAM
10	90	759,25	683,33	1,696	2,367	20,94	21,26
	90	750,01	675,01	1,678	2,367	21,57	
14	86	769,36	661,65	1,785	2,367	19,70	19,84
	86	768,25	660,70	1,776	2,367	19,98	
15	85	778,55	661,77	1,811	2,367	19,31	19,42
	85	776,05	659,64	1,804	2,367	19,53	
16	84	771,63	648,17	1,819	2,367	19,48	19,18
	84	770,49	647,21	1,839	2,367	18,89	
17	83	786,37	652,69	1,858	2,367	18,75	18,68
	83	782,60	649,56	1,863	2,367	18,61	
18	82	790,46	648,18	1,962	2,367	16,32	15,84
	82	784,52	643,31	2,000	2,367	15,36	

Fuente: elaboración propia.

4.7.3. Densidad de vacíos rellenos de asfalto

Los vacíos rellenos de asfalto VRA indican el porcentaje de vacíos entre las partículas de agregado (VAM) que se encuentran llenas de asfalto. El VAM abarca asfalto y aire, y por lo tanto, el VRA se calcula al restar los vacíos de aire del VAM y luego dividiendo por el VAM, y expresando el valor final como un porcentaje.

Fórmula para calcular el porcentaje de vacíos rellenos de asfalto

$$\%VRA = \frac{\%VAM - \%Va}{\%VAM} * 100$$

Donde:

%VRA = porcentaje de vacíos rellenos de asfalto

%VAM = porcentaje de vacíos en el agregado mineral

%Va = porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica

Tabla XVIII. **Valores de porcentaje de vacíos rellenos de asfalto**

% asf	%VAM	%Va	%VRA	Promedio %VRA
10	20,94	2,79	86,70	86,43
	21,57	2,98	86,17	
14	19,70	2,05	89,57	88,82
	19,98	2,38	88,08	
15	19,31	1,52	92,12	92,25
	19,53	1,49	92,38	
16	19,48	1,22	93,73	94,32
	18,89	0,96	94,90	
17	18,75	0,63	96,62	96,96
	18,61	0,50	97,29	
18	16,32	0,25	98,50	97,51
	15,36	0,53	96,52	

Fuente: elaboración propia.

4.8. Contenido de bitumen

El contenido de bitumen indica la cantidad de material asfáltico dentro de la muestra y así poder verificar que esta haya sido dosificada de una forma exacta, este ensayo se lleva a cabo cuando se realiza un control de calidad en la carpeta asfáltica.

La prueba de extracción mide el contenido de asfalto efectivo (bitumen) y proporciona agregado para el análisis granulométrico. Es la revisión final de todas las operaciones individuales que han hecho parte de la producción de la mezcla, y puede ser de gran ayuda en la evaluación de la calidad de la mezcla.

El proceso se realiza a través de la máquina centrífuga que por medio de rotación y con la ayuda de combustible que sirve de disolvente en la mezcla logra separar el bitumen y extraerlo quedando únicamente el agregado el cual después de secarlo completamente queda libre de cualquier residuo.

Fórmula para calcular el contenido de bitumen

$$\% \text{Bit} = \frac{P_n - P_s}{P_n} * 100$$

Donde:

%Bit = porcentaje de bitumen en la muestra

Pn = peso neto de la muestra (generalmente 500g)

Ps = peso seco en el horno de la muestra

Tabla XIX. **Contenido de bitumen en la mezcla asfáltica**

% asf	Muestra	Pn (g)	Ps (g)	%Bit
10	1	500	449,25	10,15
	2	500	449,84	10,03
14	1	500	429,56	14,09
	2	500	429,40	14,12
15	1	500	424,20	15,16
	2	500	424,84	15,03
16	1	500	419,58	16,08
	2	500	419,15	16,17
17	1	500	413,05	17,39
	2	500	414,65	17,07
18	1	500	409,26	18,15
	2	500	408,75	18,25

Fuente: elaboración propia.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Determinación del contenido óptimo de asfalto

Para poder determinar el contenido óptimo de asfalto es necesario obtener diferentes características de la mezcla con distintas cantidades de asfalto; los siguientes 2 métodos son comúnmente empleados para determinar el óptimo contenido de asfalto por medio de las curvas de densidad:

- Método 1

Determinar el contenido de asfalto correspondiente a la medida especificada del contenido de vacíos (4% típicamente). Este es el óptimo contenido de asfalto.

Determinar las siguientes propiedades en el óptimo contenido de asfalto de los gráficos:

- Estabilidad Marshall
- Flujo
- Porcentaje de vacíos del agregado mineral, VAM
- Porcentaje de vacíos llenos de asfalto, VRA

Comparar cada uno de estos valores de especímenes y si todos tiene el rango especificado, entonces el óptimo contenido de asfalto determinado es satisfactorio. Si algunas de estas propiedades están fuera del rango de especificaciones, la mezcla debe ser rediseñada.

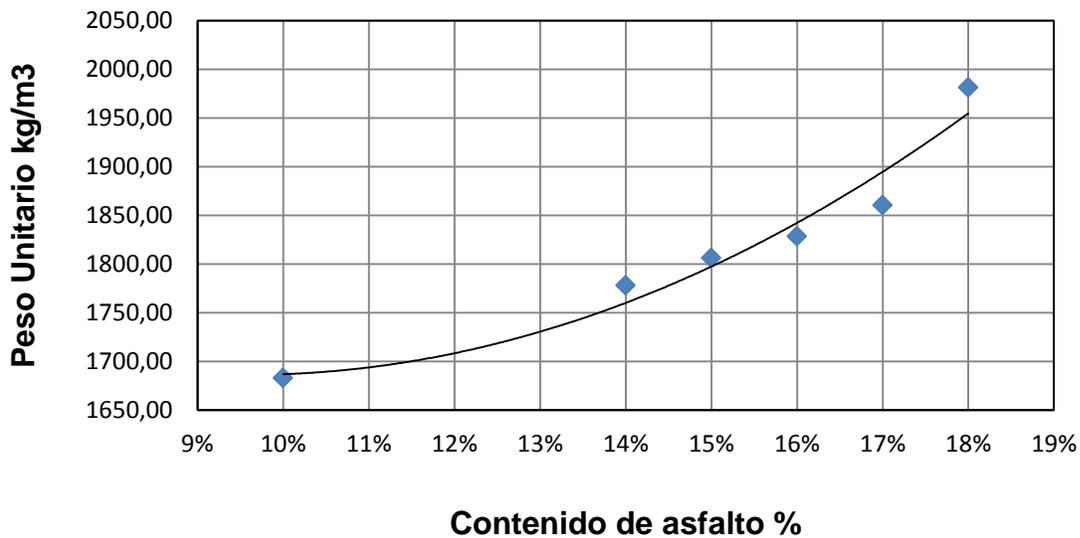
- Método 2

Determinar el contenido de asfalto en la estabilidad máxima. Para el contenido de asfalto, ver las curvas de densidad y determinar las siguientes propiedades:

- Estabilidad Marshall
- Flujo
- Porcentaje de vacíos del agregado mineral, VAM
- Porcentaje de vacíos llenos de asfalto, VRA

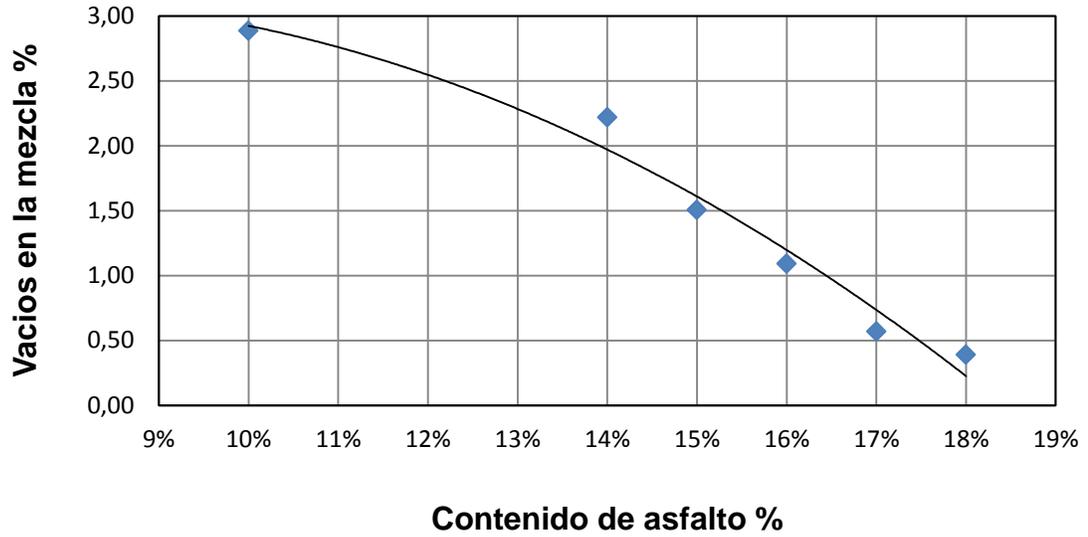
Se puede realizar una probeta con el porcentaje de asfalto determinado para analizar cada una de las propiedades.

Figura 30. **Gráfica de peso unitario contra contenido de asfalto**



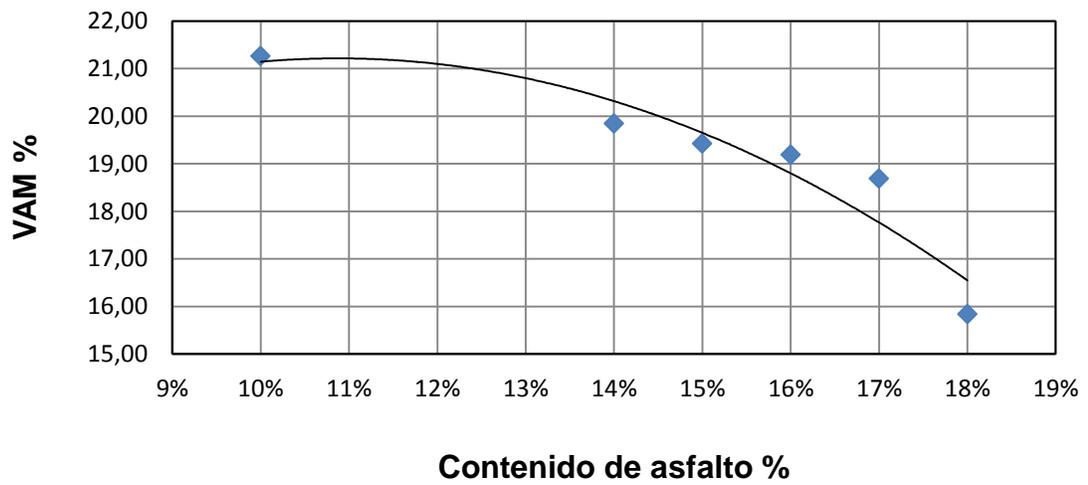
Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Gráfica de porcentaje de vacíos contra contenido de asfalto**



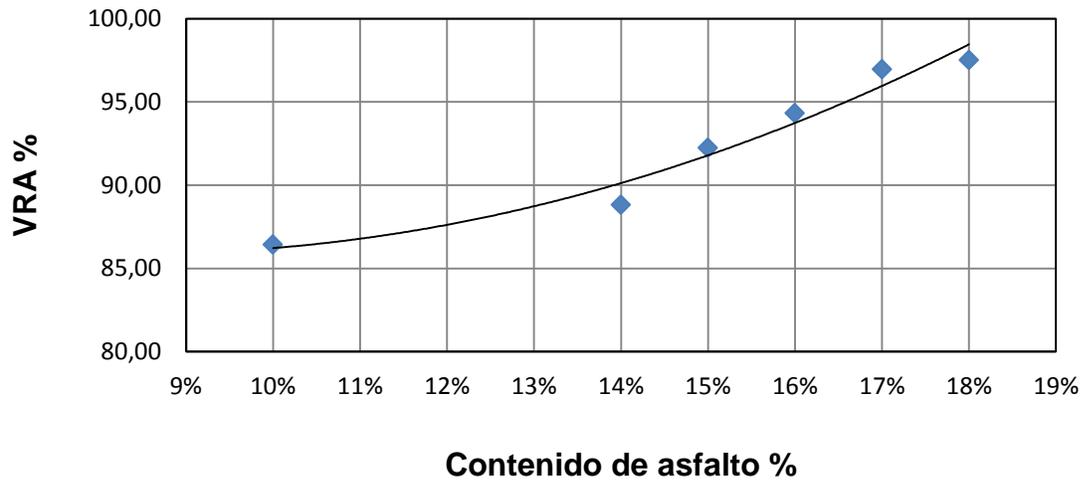
Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Gráfica de vacíos en el agregado mineral contra contenido de asfalto**



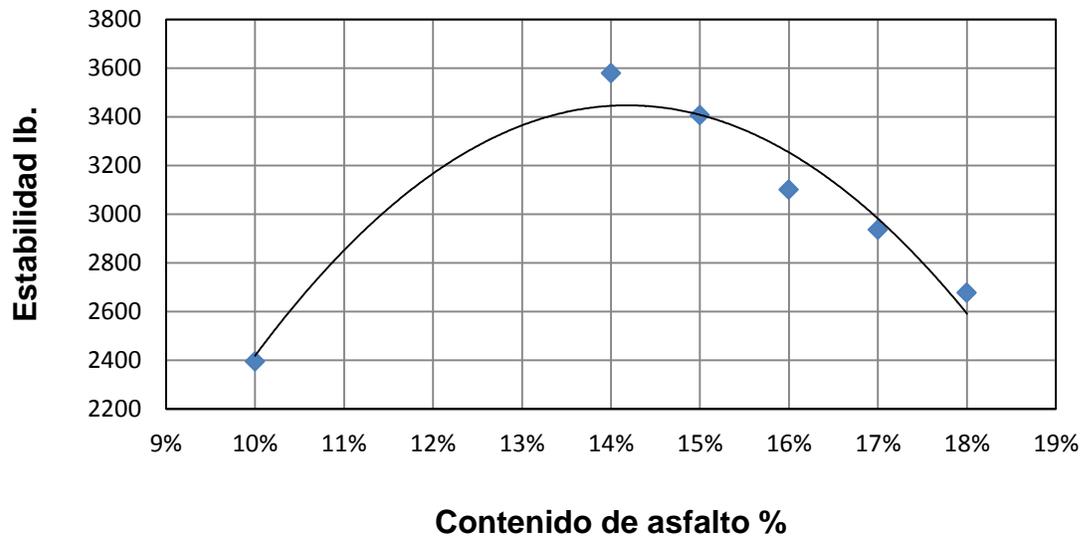
Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Gráfica de vacíos rellenos de asfalto contra contenido de asfalto**



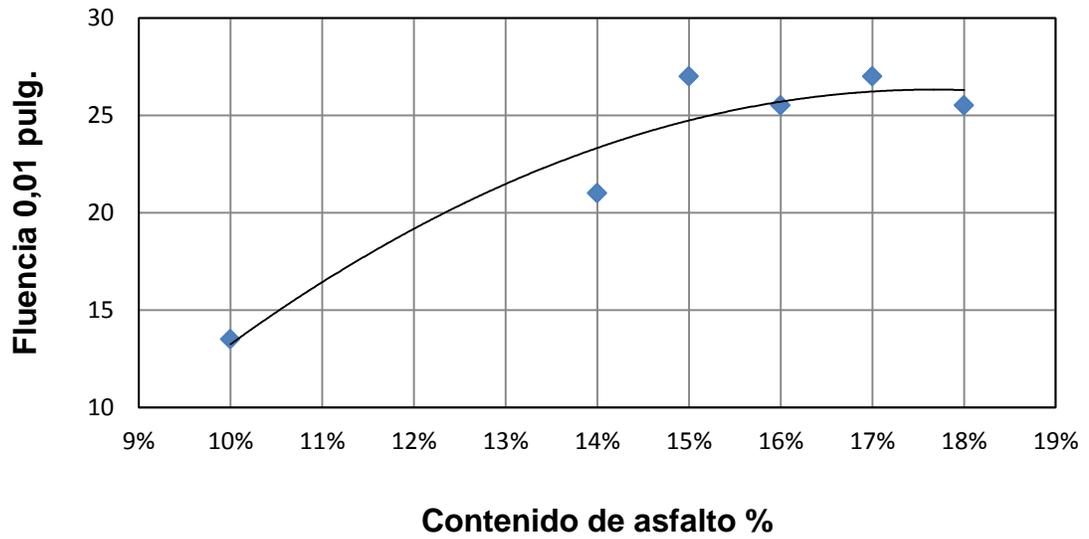
Fuente: elaboración propia.

Figura 34. **Gráfica de estabilidad contra contenido de asfalto**



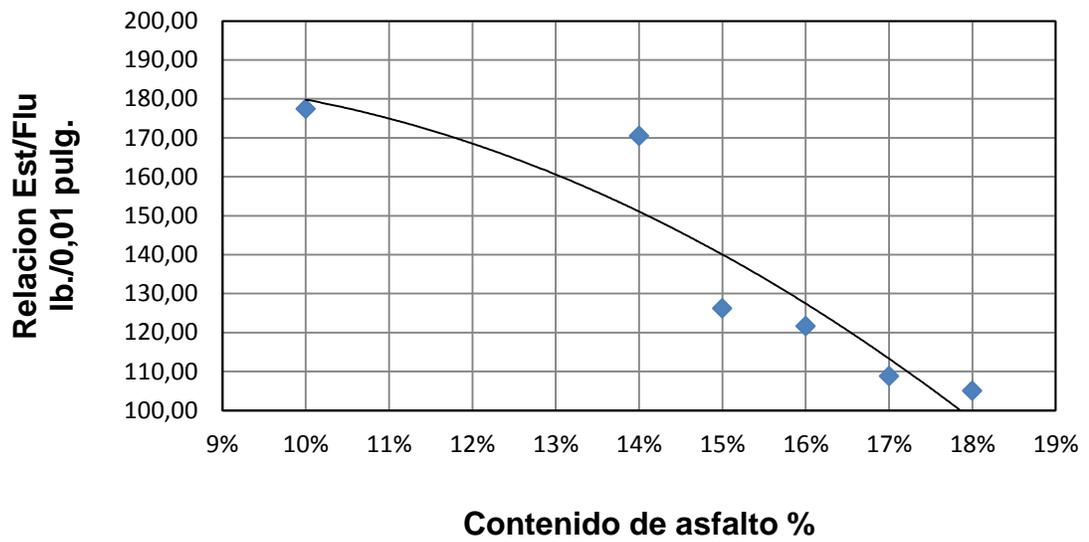
Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Gráfica de fluencia contra contenido de asfalto**



Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Gráfica relación estabilidad/fluencia contra contenido de asfalto**



Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta que el residuo de barro cocido es un material muy fino y absorbente, se utilizó el método 2 para determinar el contenido de asfalto óptimo para la mezcla el cual se propuso como 14,25 por ciento y sus propiedades se enlistan a continuación.

Tabla XX. **Dosificación por peso del agregado y el bitumen asfáltico óptimo**

Asfalto		14,25%
Asfalto (g)		114
Peso neto (g)		686

Tamiz	% pasa	PNa pasa (g)	PN ret (g)
1/2	100	686,00	0,00
3/8	95	651,70	34,30
No 4	65	445,90	205,80
No 8	45	308,70	137,20
No 50	15	102,90	205,80
No 200	6	41,16	61,74
Fondo	0	0	41,16

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Compactación de muestras con asfalto óptimo**

% asf	Muestras	Material (g)	Agregado (g)	Asfalto (g)	Temperatura de mezclado °C (°F)	Golpes por cara	Total de golpes
14.25	2	800	720	80	140 (284)	75	150

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Peso específico de mezcla asfáltica óptima**

% asf	Muestra	Pnm (g)	Psm (g)	Pssm (g)	Gsbm	Gsem	Gsam
14,25	1	773,85	789,68	347,08	1,748	1,784	1,813
	2	776,06	790,56	354,67	1,780	1,814	1,842

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Gravedad máxima teórica por el método Rice para asfalto óptimo**

% asf	% agr	Gb	Gsea	Gmm
14,25	90	1,300	2,367	2,119

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Valores de estabilidad para residuos mezcla óptima**

% asf	Muestra	Estabilidad (lb)	Promedio (lb)
14,25	1	3 650,00	3 621,76
	2	3 593,52	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Valores de fluencia para mezcla óptima**

% asf	Muestra	Fluencia (0,01 pulg.)	Promedio (0,01 pulg.)
14,25	1	23	25
	2	27	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Valores de relación estabilidad y fluencia para mezcla óptima**

% asf	Estabilidad Promedio (lb)	Fluencia Promedio (0,01 plg.)	Relación Estabilidad/Fluencia (lb/0,01 plg.)
14,25	3621,76	25	144,87

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Valores de porcentaje de vacíos en la mezcla óptima**

% asf	Muestra	Pnm (g)	Psm (g)	%Va	Promedio %Va
14,25	1	773,85	789,68	2,05	1,96
	2	776,06	790,56	1,87	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Valores del porcent aje de vacíos en el agregado mineral**

% asf	% agr	Pnm (g)	Pam (g)	Gsem	Gsea	%VAM	Promedio %VAM
14,25	85,75	773,85	663,58	1,784	2,367	19,83	19,36
	85,75	776,06	665,47	1,814	2,367	18,90	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Valores de porcentaje de vacíos rellenos de asfalto**

% asf	%VAM	%Va	%VRA	Promedio %VFA
14,25	19,83	2,05	89,66	89,88
	18,90	1,87	90,11	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Contenido de bitumen en mezcla asfáltica óptima**

% asf	Muestra	Pn (g)	Ps (g)	%Bit
14,25	1	500	428,54	14,29
	2	500	428,20	14,36

Fuente: elaboración propia.

5.2. Requerimientos según normas

La mezcla de agregados y material bituminoso, debe llenar los requisitos del método de diseño establecido en las especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes. Tabla 401-12 ó según corresponda con las disposiciones especiales requeridas.

Tabla XXXI. **Requerimientos para mezcla asfáltica por el método Marshall**

Característica	Unidad (símbolo)	Valor	
		Mínimo	Máximo
Temperatura de compactación	Celsius (°C)	140	160
No. de golpes por cara en compactación		75	75
Estabilidad	Libras (lb)	1 200	
Fluencia	0,01 pulgadas (0,01pulg)	8	16
Relación estabilidad/fluencia	Libras/0,01pulgadas (lb/0,01pulg)	120	275
% Va	Porcentaje (%)	3	5
% VAM	Porcentaje (%)	9,5	16
% VRA	Porcentaje (%)	65	78

Fuente: tabla 401-12. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes.*

Edición 2000, p. 401-7.

5.3. Comparación de características para barro cocido

Los resultados presentados a continuación para los residuos de barro cocido fueron obtenidos por medio de ensayos elaborados en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Tabla XXXII. **Características óptimas para mezcla con residuos de barro cocido**

Característica	Unidad (símbolo)	Valor
Contenido de asfalto	Porcentaje (%)	14,25
Contenido de barro cocido	Porcentaje (%)	85,75
Temperatura de compactación	Celsius (°C)	140
No. de golpes por cara en compactación		75
Peso específico bruto	Gramos/centímetro ³ (g/cm ³)	1,764
Peso específico efectivo	Gramos/centímetro ³ (g/cm ³)	1,799
Peso específico aparente	Gramos/centímetro ³ (g/cm ³)	1,827
Gravedad máxima teórica	Gramos/centímetro ³ (g/cm ³)	2,119
Estabilidad	Libras (lb)	3 621,76
Fluencia	0,01 pulgadas (0,01pulg)	25
Relación estabilidad/fluencia	Libras/0,01pulgadas (lb/0,01pulg)	144,87
% Va	Porcentaje (%)	1,96
% VAM	Porcentaje (%)	19,36
% VRA	Porcentaje (%)	89,88
Contenido de Bitumen	Porcentaje (%)	14,29

Fuente: elaboración propia.

5.4. Comparación para materiales comúnmente utilizados

Los materiales que se utilizan en la construcción de pavimentos asfálticos debido al método Marshall, pueden ser muy variados sin embargo por estudios realizados se pueden presentar datos obtenidos para algunos materiales.

Tabla XXXIII. **Características óptimas para mezcla con material calizo**

Característica	Unidad (símbolo)	Valor
Contenido de asfalto	Porcentaje (%)	5
Contenido de material calizo	Porcentaje (%)	95
Temperatura de compactación	Celsius (°C)	140
No. de golpes por cara en compactación		75
Peso específico bruto	Gramos/centímetro ³ (g/cm ³)	2,401
Peso específico efectivo	Gramos/centímetro ³ (g/cm ³)	2,453
Peso específico aparente	Gramos/centímetro ³ (g/cm ³)	2,474
Gravedad máxima teórica	Gramos/centímetro ³ (g/cm ³)	2,492
Estabilidad	Libras (lb)	2 011
Fluencia	0,01 pulgadas (0,01pulg)	12
Relación estabilidad/fluencia	Libras/0,01pulgadas (lb/0,01pulg)	165,90
%Va	Porcentaje (%)	3,7
% VAM	Porcentaje (%)	14,3
% VRA	Porcentaje (%)	74,2

Fuente: MENDOZA, Marco Antonio, *Incidencia del origen de los materiales calizos y basálticos en el diseño de mezclas de concreto asfáltico método Marshall*. Octubre 2009. p.113.

Tabla XXXIV. **Características óptimas para mezcla con material basáltico**

Característica	Unidad (símbolo)	Valor
Contenido de asfalto	Porcentaje (%)	4,5
Contenido de material basáltico	Porcentaje (%)	95,5
Temperatura de compactación	Celsius (°C)	140
No. de golpes por cara en compactación		75
Peso específico bruto	Gramos/centímetro ³ (g/cm ³)	2,384
Peso específico efectivo	Gramos/centímetro ³ (g/cm ³)	2,406
Peso específico aparente	Gramos/centímetro ³ (g/cm ³)	2,428
Gravedad máxima teórica	Gramos/centímetro ³ (g/cm ³)	2,492
Estabilidad	Libras (lb)	2 083
Fluencia	0,01 pulgadas (0,01pulg)	12
Relación estabilidad/fluencia	Libras/0,01pulgadas (lb/0,01pulg)	173,60
% Va	Porcentaje (%)	4,3
% VAM	Porcentaje (%)	13,6
% VRA	Porcentaje (%)	67,9

Fuente: MENDOZA, Marco Antonio, *Incidencia del origen de los materiales calizos y basálticos en el diseño de mezclas de concreto asfáltico método Marshall*. Octubre 2009. p. 114.

Tabla XXXV. **Características óptimas para mezcla con material pétreo**

Característica	Unidad (símbolo)	Valor
Contenido de asfalto	Porcentaje (%)	5,9
Contenido de material pétreo	Porcentaje (%)	94,1
Temperatura de compactación	Celsius (°C)	140
No. de golpes por cara en compactación		75
Peso específico bruto	Gramos/centímetro ³ (g/cm ³)	2,188
Peso específico efectivo	Gramos/centímetro ³ (g/cm ³)	2,216
Peso específico aparente	Gramos/centímetro ³ (g/cm ³)	2,264
Gravedad máxima teórica	Gramos/centímetro ³ (g/cm ³)	2,294
Estabilidad	Libras (lb)	3 900,00
Fluencia	0,01 pulgadas (0,01pulg)	13,5
Relación estabilidad/fluencia	Libras/0,01pulgadas (lb/0,01pulg)	288,89
% Va	Porcentaje (%)	4
% VAM	Porcentaje (%)	18,02
% VRA	Porcentaje (%)	76

Fuente: ESCOBAR, Guillermo, *Aplicación del método Marshall en el diseño de mezcla asfáltica*. Noviembre 2011. p. 85.

5.5. Comparación económica

El factor económico en la elaboración de carpetas asfálticas depende directamente de los materiales que componen la mezcla. Dado que el costo de la mano de obra no se ve afectado por el contenido de los agregados en la mezcla, se analizarán únicamente los materiales utilizados como agregado y el bitumen asfáltico dentro de la mezcla.

Tabla XXXVI. **Precios de elementos utilizados en la mezcla asfáltica**

Elemento	Unidad	Precio unitario
Cemento asfáltico Tipo AC-20	gal.	Q. 52,42
Material calizo	m ³	Q. 170,00
Material basáltico	m ³	Q. 230,00
Material pétreo	m ³	Q. 155,73
Residuo de barro cocido	m ³	Q. 100,00

Fuente: Unidad Ejecutora de Conservación Vial. *Catálogo de reglones y precios unitarios*. 2013.

Tabla XXXVII. **Costo de fabricación de 1 m³ de mezcla asfáltica con residuos de barro cocido**

Elemento	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Monto
Cemento asfáltico Tipo AC-20	gal	37,64	Q. 52,42	Q. 1 973,09
Residuos de barro cocido	m ³	0,86	Q. 100,00	Q. 86,00
			Total	Q. 2 059,09

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Costo de fabricación de 1 m³ de mezcla asfáltica con material calizo**

Elemento	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Monto
Cemento asfáltico Tipo AC-20	gal	13,21	Q. 52,42	Q. 692,47
Material calizo	m ³	0,95	Q. 170,00	Q. 161,50
			Total	Q. 853,97

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Costo de fabricación de 1 m³ de mezcla asfáltica con material basáltico**

Elemento	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Monto
Cemento asfáltico Tipo AC-20	gal	11,89	Q. 52,42	Q. 623,27
Material basáltico	m ³	0,955	Q. 230,00	Q. 219,65
			Total	Q. 842,92

Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Costo de fabricación de 1 m³ de mezcla asfáltica con material pétreo**

Elemento	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Monto
Cemento asfáltico Tipo AC-20	gal	15,59	Q. 52.42	Q.817,23
Material pétreo	m ³	0,941	Q. 155.73	Q. 146,54
			Total	Q. 963,77

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. La reutilización de los materiales reduce los costos dentro de cualquier proyecto estructural, además de mejorar el ambiente en el que se desenvuelve la sociedad actual.
2. La implementación de residuos de barro cocido como agregados en el diseño de mezclas asfálticas queda a disposición de cada persona al reconocer los parámetros necesarios que se presenten, en relación al uso que se le dará.
3. En la fase de compactación las partículas del barro cocido son trituradas, reduciendo su tamaño debido a los golpes recibidos por el martillo de compactación Marshall, provocando que la mezcla asfáltica contenga una alta cantidad de material fino.
4. Se puede reducir el porcentaje de absorción de los residuos de barro cocido, tratándolos previamente con un impermeabilizante, al reducir este porcentaje también se disminuye el contenido de bitumen utilizado en la mezcla asfáltica.
5. La deformación (fluencia) obtenida es muy alta en relación al límite establecido por la norma, provocada por el alto contenido de bitumen, por la relación de vacíos que presenta y por la resistencia al desgaste que caracteriza al barro cocido como agregado dentro de la mezcla asfáltica.

6. Los residuos de barro cocido presentan una resistencia a la carga (estabilidad) aceptable al superar el límite establecido por la norma, esto debido a la distribución de las partículas de agregado que se acomodan en la fase de compactación.
7. Cada uno de los ensayos que se llevaron a cabo tienen una importancia dentro del diseño de mezclas asfálticas y se utilizaron como parámetros de comparación con los requerimientos que las normas presentan, existen ensayos que según sea el objetivo de la mezcla pueden ser analizados, sin embargo no son tomados en cuenta dentro de las normas.
8. El aspecto económico se ve afectado por el contenido de bitumen dentro de la mezcla asfáltica provocando que los residuos de barro cocido no sean un elemento favorable para la producción de mezcla asfáltica en comparación a los materiales comúnmente utilizados.
9. Las mezclas asfálticas desarrolladas que incluyen los residuos de barro cocido, aunque presentan una buena capacidad de carga tienen una deformación muy alta.

RECOMENDACIONES

1. Al analizar la posibilidad de utilizar materiales reciclados se debe tener en cuenta la procedencia de los mismos y así poder determinar un método de desinfección o tratamiento, para que los procesos por los que fueron sometidos no afecten su desempeño en la reutilización.
2. Establecer las situaciones en las que actuará la mezcla asfáltica para reconocer cada una de las características requeridas por los elementos que la componen.
3. Se debe evitar la reducción de las partículas del agregado como consecuencia de la compactación reduciendo el número de golpes aplicados por el martillo Marshall.
4. Para la elaboración de mezclas asfálticas se debe reducir al máximo posible el contenido de bitumen utilizado con el objetivo de que el producto final sea económico.
5. Los residuos de barro cocido al ser utilizados como agregados en el diseño de mezclas asfálticas deben ser tratados con un aditivo que reduzca la absorción para reducir la cantidad de bitumen que debe ser utilizado y así lograr una reducción en la deformación (fluencia) provocada por las cargas aplicadas.

6. La resistencia a la carga (estabilidad) debe ser disminuida en la fase de compactación por distintos métodos como la reducción de golpes en cada cara de la probeta o la utilización de elementos que eviten el impacto directo del martillo de compactación.
7. En futuros trabajos relacionados con mezclas asfálticas donde se incluyen, residuos de barro cocido, se deben estandarizar los procedimientos matemáticos del método Rice debido a las variaciones encontradas en las diversas fuentes bibliográficas.
8. La reducción del contenido de bitumen beneficiaría el aspecto económico en la producción de mezcla asfáltica y esto se podría lograr con la aplicación de métodos que reduzcan la absorción y el desgaste de los residuos de barro cocido.
9. La utilización de residuos de barro cocido como agregados en las mezclas asfálticas puede ser útil en lugares donde la carga aplicada sea reducida como caminamientos o banquetas pero no es factible en carreteras destinadas a tránsito vehicular.

BIBLIOGRAFÍA

1. CABALLEROS SANCHEZ, Roberto Estuardo. *Desechos sólidos fuente de energía y material de construcción*. Trabajo de graduación de Arquitecto. Facultad de Arquitectura, Universidad Francisco Marroquín. Guatemala, 2003. 102 p
2. CORRO, Santiago; PRADO, Guillermo. *Diseño estructural de pavimentos asfálticos, incluyendo carreteras de altas especificaciones*. Instituto de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México. 1999. 112 p.
3. Dirección General de Caminos, Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda República de Guatemala. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. Ingenieros Consultores de Centro América. Septiembre, 2000. 724 p.
4. HERNÁNDEZ CANALES, Juan Carlos. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 510 p.
5. Instituto de asfalto. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. Estados Unidos. Serie de manuales No. 2 (MS-22), 2001. 275 p.

6. MARROQUÍN MUÑOZ, Ernesto Iván. *Reciclaje de desechos de concreto y verificación de características físicas y propiedades mecánicas*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 131 p.
7. MENDOZA IXPANEL, Marco Antonio. *Incidencia del origen de los materiales calizos y basálticos en el diseño de mezclas de concreto asfáltico*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009. 188 p.
8. MINAYA, Silene. *Manual de laboratorio de ensayos para pavimentos*. Lima, Perú. Universidad Nacional de Ingeniería Civil, Laboratorio No 2 de Mecánica Suelos y Pavimentos. Volumen I. 2001. 188 p.
9. RAMÍREZ MARTINEZ, Laura María. *Caracterización de los desechos sólidos generados en la planta Monolit Amatitlán y factibilidad de uso en la elaboración de concretos*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009. 128 p.
10. TIRNER, Jirina; KLESS, Delia; NATALINI, Mario. *Reciclaje reutilización de materiales residuales de construcción y demolición*. Universidad Nacional del Nordeste, Departamento de Estabilidad Facultad de Ingeniería, Argentina, 2000. 4 p.

ANEXOS

Tabla XLI. **Composición de los desechos sólidos de la construcción**

Actividad	Objeto	Componentes principales
Demolición	Viviendas Otros edificios Obras públicas	Mampostería, bloques, ladrillo, adobe, concreto, madera, yeso, tejas, hierro, acero, metales, plásticos.
Construcción	Excavación Edificación y obras públicas Reparación y mantenimiento Reconstrucción y rehabilitación	Tierras, suelo, roca, concreto, hierro, acero, ladrillos, bloques, tejas, materiales cerámicos, cal, yeso, madera, pavimentos, plásticos, productos no férreos, materiales bituminosos.
Producción	Aglomerantes Agregados Mampostería	Cemento, arcillas, agregados finos, residuos de reacciones químicas, residuos sólidos triturados.

Fuente: RAMÍREZ MARTÍNEZ, Laura María. *Caracterización de los desechos sólidos generados en la planta Monolit Amatitlán y factibilidad de uso en la elaboración de concretos*. Guatemala, agosto 2009. p. 5.

Tabla XLII. **Leyes vigentes sobre DSC en algunos países**

País	Entidad reguladora	Ley	Artículo
México	Secretaría del Medio Ambiente, SMA	Ley de Residuos Sólidos	Artículo 31 – Clasifica al residuo de la construcción como residuo de manejo especial. Artículo 32 – Plan de manejo para residuos de manejo especial.
Perú	Consejo Nacional del Ambiente, CONAM	Ley General de Residuos Sólidos Ley núm. 27314	Artículo 8 – Delega la gestión de los residuos sólidos de la Construcción al Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción.
E.E.U.U.	Agencia de Protección Ambiental, EPA (por sus siglas en inglés)	Disposición de desechos sólidos, 42 USC	Capítulo 42 – Regula todo lo referente a la disposición y tratamiento de desechos sólidos.
España	Consejería de Medio Ambiente, Madrid	Plan de Gestión Integrada de Residuos de Construcción y Demolición	Pretende definir un modelo de gestión adecuada para la totalidad de estos residuos

Continuación de la tabla XLII.

Nicaragua	Sistema de Gestión Ambiental, SISGA	Requisitos Básicos Ambientales, FISE	Título VIII – Requisitos sobre el manejo y disposición de los desechos sólidos de construcción.
-----------	-------------------------------------	--------------------------------------	---

Fuente: RAMÍREZ MARTÍNEZ, Laura María. *Caracterización de los desechos sólidos generados en la planta Monolit Amatitlán y factibilidad de uso en la elaboración de concretos*. Guatemala, agosto 2009. p. 11.

Tabla XLIII. **Volumen de desechos sólidos generado en algunos países**

País/ciudad	Generación de DSC (ton/día)
Comunidad europea	19,673
Estados unidos	5,626
República de Chile	12,276
México D.F.	5,076

Fuente: Revista DELOS: *Desarrollo Local Sostenible*, Vol. 1, núm. 3 (septiembre 2008).



ENSAYO DE ABRASION POR MAQUINA DE LOS ANGELES

ASTM C-131

INFORME No. S.C. - 341

O.T. No. 31370

INTERESADO: Carlos Iván López López, carné No. 2004-13334
PROYECTO: Trabajo de Graduación " El reciclado de barro cocido, como agregado en el diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall".
DIRECCION: 3a. Av. 22-60, zona 12 Villa Lobos 1.
FECHA: 7 de mayo de 2013

REFERENCIAS	MUESTRA
1. Norma de Ensayo	ASTM C-131
2. Graduación	"B"
3. % Desgaste	82.86

OBSERVACIONES: a) Muestra proporcionada por el interesado.
b) Material analizado, desecho de ladrillo de barro cocido.

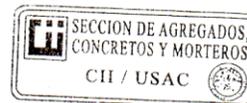
ATENTAMENTE,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora CII/USAC



Inga. Dilma Yaret Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros



M.C.

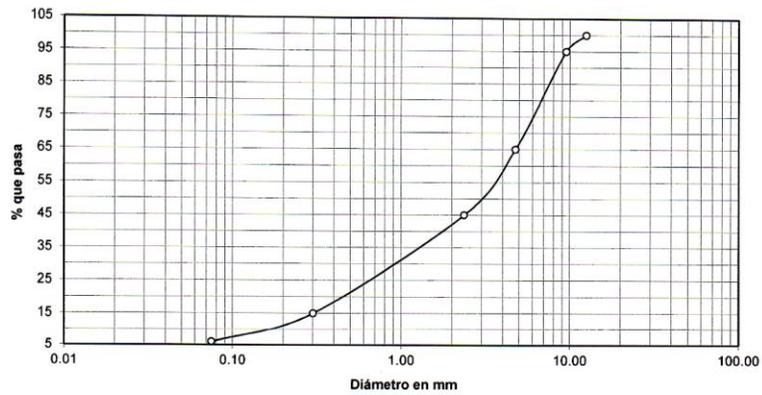


CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
 FACULTAD DE INGENIERIA
 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



INFORME No. 0849 S.S O.T.: 31,978
 Interesado: Carlos Ivan López López
 Tipo de Ensayo: Análisis Granulométrico, con tamices.
 Norma: A.A.S.H.T.O. T-27,
 Proyecto: Trabajo de Graduación Titulado "El Reciclado de Barro Cocido, como Agregado en el
 Diseño de Mezclas Asfálticas por el Método Marshall"
 Fecha: 31 de Octubre del 2013

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
1/2"	12.50	100.00
3/8"	9.5	95.00
4	4.75	65.00
8	2.36	45.00
50	0.3	15.00
200	0.075	6



Descripción del suelo: Fragmentos de Barro Cocido

Observaciones: Muestra tomada por el interesado.

Vo. Bo.:

Atentamente,

Inga. Telma Maricela Cano Morales
 DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
 Jefe Sección Mecánica de Suelos



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



INFORME No. 0848 S.S.

O.T. No.

31,978

Interesado: Carlos Ivan López López

Proyecto: Trabajo de Graduación Titulado "El Reciclado de Barro Cocido, como Agregado en el Diseño de Mezclas Asfálticas por el Método Marshall"

Asunto: DENSIDADES PASTILLAS COMPACTADAS

Norma: AASHTO T-166

Ubicación: Guatemala

FECHA: 31 de octubre del 2013

RESULTADOS:

PASTILLA	DENSIDAD
1	1.75
2	1.78

Atentamente,

Vo. Bo.
Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



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



INFORME No 0851 S.S.

O.T. No. 31,978

Interesado: Carlos Ivan López López

Proyecto: Trabajo de Graduación Titulado "El Reciclado de Barro Cocido, como Agregado en el Diseño de Mezclas Asfálticas por el Método Marshall"

Asunto: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL

Norma: ASTM D15, ASTM D-1559

Ubicación: Guatemala

FECHA: 31 de octubre del 2013

RESULTADOS:

PASTILLA	FLUJO (0.25")	Carga en Lbs.
1	23	3650
2	27	3594

Atentamente,

Vo. Bo.
Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



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



INFORME No. 0850 S. S. O.T.: 31,978

Interesado: Carlos Ivan López López

Proyecto: Trabajo de Graduación Titulado "El Reciclado de Barro Cocido, como Agregado en el Diseño de Mezclas Asfálticas por el Método Marshall"

Asunto: CONTENIDO DE BITUMEN

Ubicación: Guatemala

FECHA: 31 de octubre del 2013

RESULTADOS:

CONTENIDO DE BITUMEN	14.29%
-------------------------	--------

Observaciones:

Muestra tomada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos