

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE CIVIL

DISERTACION PREVIA A LA OBTENCIÓN DE TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**“UTILIZACIÓN DE ESCORIAS SIDERÚRGICAS PARA EL  
MEJORAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO”**

VICENTE XAVIER CAJAS RAMÍREZ

ANDRÉS GEOVANNY IGLESIAS RAMÍREZ

DIRECTOR: ING. GUSTAVO YANEZ

QUITO, 2010

## INDICE

<b>1. CAPÍTULO I: DEFINICIÓN DE LOS MATERIALES.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Generalidades.....</b>	<b>1</b>
1.1.1. Asfalto.....	1
1.1.2. Emulsificantes.....	2
1.1.3. Emulsiones asfálticas.....	5
1.1.3.1. Propiedades de las emulsiones asfálticas.....	10
1.1.3.1.1. Estabilidad al almacenamiento.....	10
1.1.3.1.2. Estabilidad de la emulsión ante los agregados pétreos.....	11
1.1.3.1.3. Adhesividad.....	11
1.1.3.1.4. Viscosidad.....	11
1.1.3.1.5. Características reológicas del residuo.....	12
1.1.4. Agregados pétreos.....	12
<b>1.2. Definiciones generales.....</b>	<b>14</b>
1.2.1. Mezclas con emulsiones asfálticas.....	14
1.2.2. Mezclas con emulsiones asfálticas y adición escorias siderúrgicas.....	18
<b>1.3. Escorias siderúrgicas.....</b>	<b>20</b>
1.3.1. Concepto.....	20

1.3.2. Características de la escoria.....	22
<b>1.4. Descripción de las mezclas asfálticas.....</b>	<b>24</b>
1.4.1. Mezclas con emulsiones asfálticas.....	24
1.4.2. Diseño de la mezcla.....	27
<b>2. CAPÍTULO II: REALIZACIÓN DE ENSAYOS.....</b>	<b>29</b>
<b>2.1 Descripción de los ensayos.....</b>	<b>29</b>
2.1.1. Obtención de los agregados en cantera.....	29
<b>2.2. Ensayos y características de los materiales granulares.....</b>	<b>31</b>
2.2.1. Granulometría.....	31
2.2.2. Contenido de humedad natural de los agregados.....	32
2.2.3. Desgaste de los agregados gruesos en la máquina de los Ángeles.....	33
2.2.4. Gravedad específica de los agregados.....	34
2.2.5. Durabilidad de los agregados a la acción de los sulfatos.....	35
2.2.6. Contenido orgánico de la arena.....	36
2.2.7. Equivalente de arena.....	37
<b>2.3. Ensayos a los materiales bituminosos.....</b>	<b>39</b>

2.3.1. Ensayos a la emulsión.....	39
2.3.1.1. Carga de la partícula.....	40
2.3.1.2. Gravedad específica.....	41
2.3.1.3. Retenido en la malla # 20.....	42
2.3.1.4. Viscosidad.....	43
2.3.1.5. Residuo por evaporación.....	45
2.3.1.6. Estabilidad a las 24 horas.....	46
2.3.1.7. Pruebas de residuo.....	47
2.3.1.7.1. Ensayo de penetración.....	48
2.3.1.7.2. Ductilidad.....	49
<b>2.4. Ensayos a las escorias siderúrgicas.....</b>	<b>50</b>
2.4.1. Granulometría de las escorias siderúrgicas.....	50
<b>3. CAPITULO III: DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFALTICAS CON EL METODO MARSHALL MODIFICAD.....</b>	<b>52</b>
<b>3.1. Introducción.....</b>	<b>52</b>
3.1.1. Determinación de la gravedad específica.....	53
3.1.2. Prueba de estabilidad y flujo.....	54

3.1.3. Análisis de densidad y vacíos.....	55
<b>3.2. Diseño de mezclas asfálticas con emulsión.....</b>	<b>56</b>
3.2.1. Determinación del porcentaje de agua de mezclado o pre-envuelta.....	57
3.2.2. Cálculo del porcentaje óptimo teórico de emulsión en una mezcla.....	58
3.2.3. Elaboración de los especímenes.....	59
3.2.4. Prueba de estabilidad Marshall.....	62
3.2.5. Prueba de pérdida de estabilidad por inmersión.....	63
3.2.6. Prueba de tracción indirecta.....	63
3.2.7. Prueba de tracción indirecta sumergida.....	65
3.2.8. Ventajas del ensayo de tracción indirecta.....	65
3.2.9. Cálculo teórico del porcentaje de emulsión asfáltica.....	68
3.2.10. Cálculo práctico de la cantidad de emulsión asfáltica.....	70
3.2.11. Ensayo Marshall de la mezcla en frío con el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica.....	74
3.2.12. Ensayos de tracción indirecta a la mezcla óptima.....	75
3.2.12.1. Resistencia conservada de las briquetas .....	75
<b>3.3. Diseño de la mezcla en frío con 5% de adición de escoria siderúrgica.....</b>	<b>76</b>
3.3.1. Ensayo Marshall de la mezcla.....	76

3.3.2. Ensayos de tracción indirecta.....	77
3.3.2.1. Resistencia conservada de las briquetas .....	77
<b>3.4. Diseño de la mezcla en frío con 7.5% de adición de escoria siderúrgica.....</b>	<b>78</b>
3.4.1. Ensayo Marshall de la mezcla.....	78
3.4.2. Ensayos de tracción indirecta.....	79
3.4.2.1. Resistencia conservada de las briquetas.....	79
<b>3.5. Diseño de la mezcla en frío con 10% de adición de escoria siderúrgica.....</b>	<b>80</b>
3.5.1. Ensayo Marshall de la mezcla.....	80
3.5.2. Ensayos de tracción indirecta.....	81
3.5.2.1. Resistencia conservada de las briquetas.....	81
<b>3.6. Diseño de la mezcla en frío con 12.5% de adición de escoria siderúrgica... </b>	<b>82</b>
3.6.1. Ensayo Marshall de la mezcla.....	82
3.6.2. Ensayos de tracción indirecta.....	83
3.6.2.1. Resistencia conservada de las briquetas.....	83
<b>3.7. Diseño de la mezcla en frío con 15% de adición de escoria siderúrgica.....</b>	<b>84</b>
3.7.1. Ensayo Marshall de la mezcla.....	84
3.7.2. Ensayos de tracción indirecta.....	85
3.7.2.1. Resistencia conservada de las briquetas.....	85

<b>3.8. Cuadro comparativo de resultados de las mezclas.....</b>	<b>86</b>
<b>4. CAPITULO IV: EVALUACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA.....</b>	<b>87</b>
<b>4.1. Introducción.....</b>	<b>87</b>
<b>4.2. Ensayo de Marshall Modificado.....</b>	<b>87</b>
<b>4.3. Ensayo de tracción indirecta.....</b>	<b>88</b>
<b>4.4. Ensayo de peladura por el Método del Hervido.....</b>	<b>89</b>
<b>4.5. Grafico para determinar el porcentaje de escoria óptimo.....</b>	<b>92</b>
<b>4.6. Diseño de la mezcla en frío con 11.7% de adición de escoria siderúrgica...93</b>	
4.6.1. Ensayo Marshall de la mezcla.....	93
4.6.2. Ensayos de tracción indirecta.....	94
4.6.2.1. Resistencia conservada de las briquetas.....	94
<b>4.7. Ensayo de peladura por el Método del Hervido.....</b>	<b>95</b>
<b>5. CAPITULO V: RESULTADOS DE LA MEZCLA ASFALTICA EN FRIO CON LA UTILIZACION DE ESCORIAS SIDERURGICAS.....</b>	<b>96</b>
<b>5.1 Análisis comparativo entre mezclas en frío y mezclas en frío con la utilización de escorias siderúrgicas.....</b>	<b>96</b>
5.1.1. Cuadro comparativo de resultados de las mezclas.....	97

<b>5.2. Análisis de costos comparativos entre mezclas en frío y mezclas en frío con la utilización de escorias siderúrgicas.....</b>	<b>98</b>
<b>6. CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>100</b>
<b>6.1. Conclusiones.....</b>	<b>100</b>
<b>6.2. Recomendaciones.....</b>	<b>104</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>107</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>109</b>

## **RESUMEN**

A lo largo de los años se han venido desarrollando diversos estudios de las diferentes presentaciones de asfalto en el Ecuador. Estos estudios han intentado buscar las maneras de satisfacer a las necesidades actuales del medio que han ido cambiando por diversos factores como aumento de tráfico, cargas mayores, cambios constantes de temperatura.

Estos factores han llegado a producir problemas de deterioro en las vías como desprendimiento de materiales pétreos de la capa de rodadura, ahuellamiento por deformación plástica del ligante bituminoso, rotura por fatiga del pavimento y rotura por cambios bruscos de temperatura.

En la ingeniería siempre se busca nuevas opciones, métodos y materiales para la construcción con el fin de que sean útiles, eficaces, económicos y que reduzcan tiempo en el proceso constructivo.

En nuestro país se ha podido comprobar experimentalmente que los pavimentos utilizados en nuestras vías cumplen deficientemente con las especificaciones tanto nacionales como internacionales por lo que es una necesidad la investigación e implementación de nuevos tipos de mezclas asfálticas que mejoren las deficientes características del pavimento.

Durante varios años en nuestro país los desechos siderúrgicos también llamados escorias de altos hornos han sido eliminados debido a que no existe un proceso de reutilización de este material por lo que es una necesidad poner en práctica procesos constructivos para aprovechar estos desechos.

Las escorias son un subproducto de la fundición de la mena para purificar los metales. Se pueden considerar como una mezcla de óxidos metálicos; sin embargo, pueden contener sulfuros de metal y átomos de metal en forma de elemento.

Mediante la investigación se quiere llegar a conocer experimentalmente si la modificación de las mezclas asfálticas con escorias siderúrgicas contribuyen al desempeño de los pavimentos asfálticos.

En la presente tesis se va a desarrollar un estudio de mezclas asfálticas en frío cuyo objetivo es evaluar y comparar el comportamiento de las mezclas asfálticas en frío con la utilización de escorias siderúrgicas con el fin de determinar si la utilización de escorias mejoran la resistencia de las mezclas asfálticas y si es viable su utilización en nuestro medio.

Para este estudio se utilizarán mezclas abiertas mediante el método Marshall haciendo una comparación entre mezclas en frío sin adición de escoria y mezclas en frío con adición de escoria al 5%, 7,5%, 10%, 12,5%, y 15% y la determinación del porcentaje óptimo de escoria siderúrgica que mejore las características mecánicas de la mezcla.

## **OBJETIVOS.**

### **Objetivo general:**

Evaluar y comparar el comportamiento de las mezclas asfálticas en frío con la utilización de escorias siderúrgicas con el fin de determinar si la utilización de escorias mejoran la resistencia de las mezclas asfálticas y si es viable su utilización en nuestro medio.

### **Objetivos específicos:**

- Evaluar y determinar la calidad del material pétreo de la mina de Guayllabamba a emplearse en la elaboración de las distintas mezclas asfálticas en frío.
- Determinar si las emulsiones asfálticas cumplen con las normas especificadas para nuestro país.
- Determinar las características de la mezcla una vez adheridos los diferentes porcentajes de escorias siderúrgicas.
- Establecer el porcentaje óptimo de escorias siderúrgicas a utilizarse en la mezcla.
- Comparar los resultados de la mezcla asfáltica óptima con escoria con la mezcla asfáltica sin escorias siderúrgicas.
- Determinar si la utilización de escorias siderúrgicas en mezclas asfálticas en frío son económicamente viables para la utilización en nuestro medio.

## **CAPITULO I**

### **DEFINICIÓN DE LOS MATERIALES**

#### **1.1. Generalidades.**

##### **1.1.1. Asfalto.**

El asfalto es un material de color oscuro, que presenta propiedades ligantes y aglutinantes, conformado por una serie muy compleja de elementos y compuestos en los que sobresalen los hidrocarburos; soluble en gran parte, en disulfuro de carbono, presenta consistencia semisólida a las temperaturas ambientales ordinarias pero tiende rápidamente a la liquidez al incrementarse la temperatura. El asfalto es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes. Esta última propiedad ha permitido adecuarlo a muchos usos en la construcción de distintas obras civiles.

El asfalto es considerado un sistema coloidal complejo de hidrocarburos. El modelo adoptado para configurar la estructura del asfalto se denomina modelo micelar, el cual provee de una razonable explicación de dicha estructura, en el cual existen dos fases; una discontinua (aromática) formada por dos asfáltenos y una continua que rodea y solubiliza a los asfáltenos, denominada maltenos. Las resinas contenidas en los maltenos son intermediarias en el asfalto, cumpliendo la misión de homogeneizar y compatibilizar, a los de otra manera insolubles, asfáltenos. Los maltenos y asfáltenos existen como islas flotando en el tercer componente del asfalto, los aceites.

Existen 2 tipos de asfaltos; los asfaltos naturales y los asfaltos derivados de la producción de petróleo.

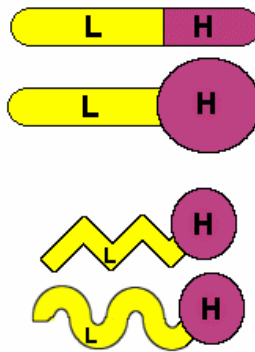
Los asfaltos mas utilizados en el mundo hoy en día, son los derivados de petróleo, los cuales se obtienen por medio de un proceso de destilación industrial del crudo. Representan más del 90 % de la producción total de asfaltos. La mayoría de los petróleos crudos contienen algo de asfalto y a veces casi en su totalidad. Sin embargo existen algunos petróleos crudos, que no contienen asfalto.

El asfalto, es parte integral de muchos petróleos en los que existe una solución. Mediante el proceso de regeneración se separan las fracciones volátiles quedando el asfalto como residuo de este proceso.

En procesos de destilación natural a través de millones de años, se han formado depósitos naturales de asfalto, algunos libres de impurezas y otros en los que se encuentran mezclados con cantidades naturales en que el asfalto se presenta dentro de la estructura de una roca porosa se conocen comúnmente como asfaltos de roca o roca asfáltica.

### **1.1.2. Emulsificantes.**

Las propiedades de una emulsión asfáltica dependen en gran medida del emulsificante a utilizar. Un emulsificante es un agente tensoactivo que modifica la tensión superficial en la interfase entre las partículas de asfalto y de agua, por lo que mantiene los glóbulos de asfalto estables en suspensión y controla el tiempo de rompimiento. (Figura 1)



L= Parte Liposoluble: atracción a las grasas

H= Parte Hidrosoluble: atracción al agua

**Figura 1.-** Partes del emulsificante.

Un producto químico que sea utilizado como emulsificante debe tener en su estructura química dos zonas perfectamente definidas, una parte hidrófoba o polar (repelente al agua) y una parte hidrófila (afín al agua). Este comportamiento permite obtener una dispersión estable del asfalto en el agua, obteniendo así la emulsión deseada.

La parte polar de la molécula del emulsificante asfáltico presenta cargas libres muy positivas o muy negativas, por lo que los emulsificantes deberán encontrarse en forma de sales para obtener su funcionamiento como tales.

La concentración en la fase intermedia (actividad superficial) depende de la molécula del emulsificante teniendo características lipofílicas (compatible con aceite) e hidrofílicas. Un emulsificante típico tiene un grupo polar como “cabeza” hidrofílica y una “cola” o cadena hidrofóbica (lipofílica) derivada de materiales renovables como grasas, aceites vegetales y resinas. Los emulsificantes como proteínas, ligninas, polímeros y minerales pueden tener una o más ramificaciones hidrofóbicas

o hidrofílicas. En la fase intermedia el emulsificante se orienta con la posición(es) hidrofóbica(s) hacia la fase asfáltica y el grupo polar con los contra-iones hacia la fase acuosa. La molécula de un emulsificante es mucho más pequeña que una partícula de asfalto y cada partícula está estabilizada por miles de moléculas de emulsificante.

La mayoría de los emulsificantes catiónicos son principalmente aminas grasas, además de amidoaminas e imidazolininas. Las aminas son principalmente convertidas en sales mediante la reacción con ácido clorhídrico.

Las sales cuaternarias de amonio son utilizadas normalmente como aditivos, son sales solubles en agua, que no requieren la adición de ácido, presentan estabilidad y son efectivas. De acuerdo a lo anterior, se puede afirmar que la emulsión asfáltica es una dispersión de una fase orgánica o aceites líquida (asfalto) en otra fase líquida (agua) en forma de pequeños glóbulos.

Esta dispersión se obtiene por medios mecánicos (molino coloidal) y por medios físico-químicos que consisten en la adición de agentes emulsificantes.

La presencia del agente emulsificante facilita la dispersión inicial del asfalto en el agua y evita que las partículas de agua vuelvan a unirse. Cuando este fenómeno ocurre, se dice que la emulsión se ha roto. Existen muchos factores que pueden afectar la estabilidad de la emulsiones, sin embargo, en la práctica la rotura de la emulsión ocurre al contacto de esta con las superficies superficiales de los materiales pétreos y/o a la evaporación del agua de la emulsión.

Una vez rota la emulsión, el asfalto queda firmemente adherido al material pétreo debido a la acción del agente emulsificante ya que se forma un puente químico en ambas superficie.

### **1.1.3. Emulsiones asfálticas.**

Se llama emulsión asfáltica a la dispersión de un sólido o un líquido (fase dispersa) en forma de glóbulos minúsculos, en un líquido no miscible con el elemento disperso (fase continua). Cuando las dos fases permanecen en equilibrio sin que las partículas en suspensión se aglomeren o se sedimenten, se dice que la emulsión es estable. Ciertas emulsiones exigen la presencia de un agente emulsificador para conservar la estabilidad.

Las emulsiones asfálticas son dispersiones en agua de glóbulos asfálticos de dos a cinco micrones de diámetro, que se mantienen estables en presencia de un agente emulsificante que pueden ser ácidos grasos o resinas con bases fuertes que son normalmente utilizados para la fabricación de emulsiones aniónicas o los resultantes de la acción de ácidos minerales sobre compuestos amínicos que son usados para la elaboración de emulsiones catiónicas.

El contenido de asfalto de las emulsiones bituminosas para pavimentación varía normalmente entre 50 y el 65% del peso total.<sup>1</sup>

Los glóbulos de asfalto contenidos en una emulsión están cargados con electricidad que pueden ser positivas o negativas dando origen a las emulsiones catiónicas o aniónicas respectivamente.

Cuando dos fases de una emulsión asfáltica se disocian completamente separándose netamente de la fase acuosa se dice que ocurre un rompimiento de la emulsión.

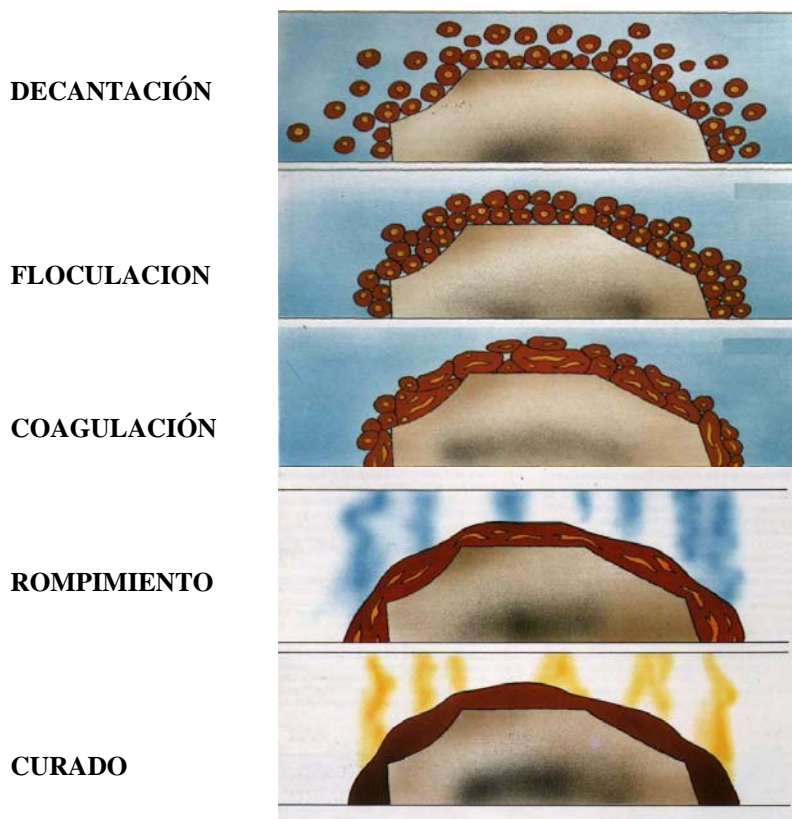
El rompimiento de una emulsión asfáltica es provocado por una modificación en el equilibrio electrostático que mantiene a los glóbulos de asfalto en suspensión en la

---

<sup>1</sup> Montejo Alfonso, Ingeniería de pavimentos, Tomo 2, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2006, pág. 46.

fase acuosa y que puede deberse a la evaporación de esta última, a cambios notables de su pH o a la reacción entre la fase acuosa y el material pétreo (Figura 2). Existen varios factores que afectan la velocidad de rotura como son las presentadas a continuación.<sup>2</sup>

- Velocidad de absorción de agua por el agregado.
- Contenido de humedad del agregado.
- Distribución de tamaños y composición mineral del agregado.
- Tipo y cantidad de agente emulsificante.
- Condiciones atmosféricas.
- Fuerzas mecánicas originadas por compactación y tráfico.



**Figura 2.-** Esquema de rompimiento de la emulsión asfáltica.

<sup>2</sup> Chova del Ecuador, Bitumix, Boletín técnico, pág. 6.

Existen varias ventajas para la utilización de emulsiones asfálticas de las que se puede mencionar las siguientes.

- Permite el empleo de agregados.
- No necesita el empleo de activantes para tener adhesividad.
- Empleo de equipos más sencillos.
- Evita el consumo del combustible.
- Evita problemas de sobrecalentamiento.
- Evita riesgos de incendios y de explosiones.
- Su manipulación es más fácil.
- Permite dosificaciones más exactas del ligante.
- Su empleo no produce contaminaciones.

El fluidificante de la emulsión es el agua, y como es un sistema heterogéneo de dos fases normalmente inmiscibles, como son el asfalto y el agua, se le incorpora una pequeña cantidad de un agente emulsificador, generalmente de base jabonosa o solución alcalina, el cual mantiene estable el sistema de las fases continuas, que es el agua, y discontinua que esta constituida por pequeños glóbulos de asfalto en suspensión. Los agentes emulsificantes forman una película protectora alrededor de los glóbulos de asfalto estableciéndoles una determinada polaridad en la superficie, lo que hace que estos se repelan, manteniendo estable la emulsión.

Cuando una emulsión se pone en contacto con el agregado se produce un desequilibrio eléctrico que rompe la emulsión llevando a las partículas de asfalto a unirse a la superficie del agregado, y el agua fluye o se evapora separándose de las piedras recubiertas por el asfalto.

Hay agentes emulsificadores que permiten que esta rotura o quiebre sea instantáneo y otros mas poderosos que retardan este fenómeno. De acuerdo a esto las emulsiones se dividen en:

- Emulsión asfáltica de quiebre rápido, la que se designa con las letras RS (rapid setting).
- Emulsión asfáltica de quiebre medio, la que se designa con las letras MS (medium setting).
- Emulsión asfáltica de quiebre lento, la que se designa con las letras SS (slow setting).

Como se sabe, existen áridos de polaridad positiva y negativa; por lo tanto, para tener buena adherencia es necesario tener la emulsión eléctricamente afín al árido. Esta cualidad se la confiere el agente emulsificador que puede darles polaridad negativa o positiva, tomando el nombre de aniónicas las primeras, afines a áridos de carga negativa, como lo son de origen calizos, y catiónicas las segundas, afines a áridos de carga positiva como son los de origen cuarzosos o silíceos, que son los que mas abundan en nuestro país.

Un resumen claro de las principales características de las emulsiones se puede observar en la tabla 1.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> [www.ucn.com](http://www.ucn.com)

	Quiebre Rápido				Quiebre medio				Quiebre lento			
	CRS - 1		CRS - 2		CMS - 2		CMS - 2h		CSS - 1		CSS - 1h	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Viscosidad Saybolt Furol a 25 °c, seg									20	100	20	100
Viscosidad Saybolt Furol a 50 °c, seg	20	100	100	400	50	450	50	450				
Sedimentación, 5 días, %		5		5		5		5		5		5
Ensayo estabilidad, 1 día, %		1		1		1		1		1		1
Demulsibilidad, 35 ml, %.	40		40									
Cubrimiento y resistencia al agua:												
Cubrimiento agregado seco					Bueno		Bueno					
Cubrimiento luego de esparcido					Regular		Regular					
Cubrimiento agregado húmedo					Regular		Regular					
Cubrimiento, luego de esparcido					Regular		Regular					
Ensayo carga de partícula	(+)		(+)		(+)		(+)		(+)		(+)	
Ensayo mezclado con cemento, %										2.0		2.0
Aceite destilado, por vol. de emulsión, %		3		3		12		12				
Residuo,%	60		65		65		65		57		57	
Penetración, 25 °c, 100 g, 5 seg.	100	250	100	250	100	250	40	90	100	250	40	90
Ductilidad, 25 °c, 5 cm./min, cm.	40		40		40		40		40		40	
Solubilidad en Tricloroetileno %.	97		97		97		97		97		97	
Ensayo de la mancha con: Nafta Standard Solvente Nafta-Xilol, % Xilol Solvente Heptano-Xilol, % Xilol.	Negativa para todos los grados Negativa para todos los grados Negativa para todos los grados											

**Tabla 1.-** Requisitos para emulsiones asfálticas catiónicas AASHTO M 208.

### **1.1.3.1. Propiedades de las emulsiones asfálticas.**

Las emulsiones asfálticas poseen propiedades que condicionan las características de la misma y su comportamiento. Entre las principales propiedades están las siguientes<sup>4</sup>:

- Estabilidad al almacenamiento.
- Estabilidad ante los agregados pétreos.
- Grado de adhesividad.
- Viscosidad.
- Características reológicas del residuo.

#### **1.1.3.1.1. Estabilidad al almacenamiento.**

Todas las emulsiones asfálticas modifican en mayor o menor grado sus propiedades durante el manejo y almacenamiento. Una emulsión puede almacenarse durante varios meses sin producirse ningún deterioro y sin necesidad de calentarla para utilizarla. Sin embargo es normal que para almacenamientos prolongados se presenten los siguientes fenómenos:

1. Formación de natas y sedimentos: Durante el almacenamiento en obra pueden surgir dos fenómenos que se acentúan con el tiempo. La nata que es una película que se forma en la superficie de la emulsión por el contacto del asfalto con el aire. Para evitar este fenómeno es aconsejable utilizar tanques de almacenamiento de pequeña área y verticales. Así mismo la sedimentación consiste en un ligero aumento de la concentración del asfalto a medida que vamos descendiendo hacia la parte inferior del tanque de almacenamiento.

---

<sup>4</sup> Bedón Tito Roberto, Diseño de mezclas asfálticas en frío con emulsión y adición de polímeros. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador, 2009, Tesis, pág. 59.

Este fenómeno se presenta por el fenómeno de la gravedad, es un fenómeno reversible con la utilización de un mezclador el cual hace que la emulsión recobre su uniformidad en la concentración de asfalto.

2. Formación de espuma: Los emulsificantes por su naturaleza química forman espuma, por lo que se debe tener cuidado de no incluir aire en el momento de mezclado o agitación. Es recomendable transportarlas por medio de carro tanques provistos de sistemas de tabiques que dividan el interior. El llenado de estos tanques debe realizarse con una manguera flexible que se encuentre prolongada hasta unos 10 o 20 cm. del fondo del tanque.

#### **1.1.3.1.2. Estabilidad de la emulsión ante los agregados pétreos.**

La estabilidad de la emulsión ante los agregados pétreos resulta de la rotura de esta al entrar en contacto con el agregado. Mientras más fino sea el agregado la rotura de la emulsión será más rápido. La velocidad de rotura dependerá de la humedad del agregado, clima del lugar de la obra, el tipo de emulgente, naturaleza química del cemento asfáltico y de la granulometría del agregado.

#### **1.1.3.1.3. Adhesividad.**

La adhesividad depende del tipo y cantidad de emulgente, de la naturaleza del material bituminoso, de los aditivos incorporados al cemento asfáltico, del pH de la emulsión en donde los valores cercanos a 7 proveen una buena adherencia pero estabilidades menores, de la mineralogía del agregado y de su velocidad de rotura.

#### **1.1.3.1.4. Viscosidad.**

Esta propiedad depende directamente de la concentración de la emulsión (contenido de asfalto residual). Valores por encima del 65% de asfalto residual incrementa rápidamente este parámetro. La viscosidad también varía con el tipo y

cantidad del emulgente y de la granulometría de la emulsión. Las emulsiones asfálticas con glóbulos de tamaño uniforme son más viscosas que con tamaños bien graduados. La granulometría depende del tipo de ligante (cemento asfáltico) y de los fluidificantes del mismo.

#### **1.1.3.1.5. Características reológicas del residuo.**

La consistencia del cemento asfáltico residual influye en las propiedades de la emulsión asfáltica. Cuando se utilizan fluidificantes se facilita la envuelta de las partículas de agregado pero se pueden generar problemas ante la acción directa del tránsito debido a un mal curado (evaporación de los solventes) produciéndose ahuellamientos y deformaciones prematuras. Los fluidificantes pueden llegar a perjudicar la adherencia dependiendo de su naturaleza, por una disminución de la viscosidad del ligante residual.

#### **1.1.4. Agregados pétreos.**

Se puede definir como agregado pétreo al material compuesto de uno o varios minerales como resultado final de los diferentes procesos geológicos. El concepto de agregado pétreo no se relaciona necesariamente con la forma compacta o cohesionada; también las gravas, arenas, arcillas, etc.

Estos materiales granulares se dividen en dos clases: grueso y fino; denominándose el fino a la arena y el grueso a la grava, comprendiendo a esta denominación genérica todos los tamaños.

Como todo material granular estos agregados como se los conoce en el campo de la construcción, están formados por diversos minerales y pueden clasificarse en simples, cuando están conformados por un solo mineral o por varios minerales pero

en muy pequeñas proporciones; ó en compuestos cuando están formados por varios minerales abundantes.

La clasificación más común que se hace a los materiales granulares es:

- Ígneas o volcánicas
- Sedimentarias
- Metamórficas

El material ígneo que es el origen de la mayor parte de los agregados pétreos de nuestro país, procede de los magmas que al solidificarse han dado origen a este tipo de agregado.

Los magmas son grandes masas de materiales fundidos que se hallan en zonas profundas de la litosfera. Se ha originado por efecto de las grandes presiones y de altas temperaturas.

Los agregados pétreos se combinan con asfaltos para preparar mezclas con diversas aplicaciones. Estos materiales normalmente constituyen el 90% en peso o más de estas mezclas, por estos sus propiedades tienen gran influencia sobre el producto terminado.

En la construcción de los pavimentos asfálticos el control de las propiedades de los agregados pétreos es tan importante como el del asfalto. Los agregados pétreos más utilizados son piedra y escoria partida, gravas, arenas y fillers.



**Foto 3.-** Agregados pétreos de la cantera de Guayllabamba.

## **1.2. Definiciones generales.**

Es este sub-capítulo se hablará de mezclas con emulsiones asfálticas utilizadas en esta investigación. Se entiende que el asfalto es el principal componente de las emulsiones asfálticas.

### **1.2.1. Mezclas con emulsiones asfálticas.**

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua éste. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan (Figura 4).



**Figura 4.-** Elaboración de asfalto en frío en una central fija.

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los firmes para tráficos pesados intensos.

Las mezclas en frío se preparan con emulsiones superestables (sin solvente) y agregado graduado y partido tanto en planta como con mixer y aún in situ. Se agrega cemento o cal para aumentar la resistencia al agua si se desea controlar estos problemas. Debido a que se utilizan emulsiones sin solvente la mezcla asfáltica no se puede almacenar por más de unos pocos días.

Las emulsiones asfálticas constituyen la solución lógica y natural para poner en obra cementos asfálticos a temperatura ambiente sin miedo a la presencia de humedad ni los problemas que produce una mala adhesividad con los áridos. Las soluciones usadas en años anteriores, fluidificando ligantes con derivados ligeros del petróleo, resultan en el momento actual poco viables tecnológicamente y caras por el gasto

energético que representa el malgastar aquel componente ligero, cuyo destino final es la desaparición por evaporación sin ningún uso productivo.

En el estado actual del problema, se está todavía lejos de un enfrentamiento frío-caliente. Normalmente, deben ser las condiciones locales y económicas las que decidan la elección de una de las dos técnicas. Es impensable usar mezclas asfálticas en caliente en obras pequeñas o de mantenimiento y alejadas de las plantas existentes de fabricación, o cuando el clima es húmedo y los pétreos se encuentran saturados de agua. Por ello, en la mayoría de los casos ambas técnicas son complementarias.

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de vías, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico a la explanada para que sean soportadas por ésta.

Se tienen que considerar dos aspectos fundamentales en el diseño y proyecto de una vía:

1. La función resistente, que determina los materiales y los espesores de las capas que habremos de emplear en su construcción.
2. La finalidad, que determina las condiciones de textura y acabado que se deben exigir a las capas superiores de la vía, para que resulten seguras y confortables. A estas capas superiores se le denomina pavimento.

Las tipologías de las vías de acuerdo a su comportamiento y respuesta se pueden dividir en los siguientes tipos:

- a) Pavimentos Flexibles. (Base Granular).

Constituidos por capas de sub-base y base de material granular, y por un tratamiento superficial o por una capa de mezcla asfáltica de espesores muy delgados que pueden ir hasta los 10 cm. regularmente, las capas granulares resisten fundamentalmente la acción del tráfico, la capa de rodadura sirve para impermeabilizar al conjunto de capas que conforma la vía, resistir los efectos abrasivos del tráfico y proporcionar una rodadura cómoda y segura.

b) Pavimentos flexibles. (Base Asfáltica).

Compuesto por una base y un pavimento asfáltico y el cual está constituido por una capa intermedia y otra de rodadura, la sub-base puede ser granular o bien tratada con un ligante hidráulico o hidrocarbonado.

c) Pavimentos semi-rígidos. (Base tratada con ligantes hidráulicos).

Constituido por una capa de base tratada con ligantes hidráulicos, o de concreto, la sub-base suele ser de material granular, pudiendo ser estabilizada, el pavimento está formado por una o dos capas de mezcla asfáltica (rodadura e intermedia).

d) Pavimentos rígidos. (Pavimentos de hormigón).

Están formados por una losa de hormigón colocada directamente sobre la explanada, o sobre una capa de base granular o estabilizada o un hormigón pobre, la losa de hormigón actúa como capa de rodadura.

Existen diversos campos de aplicación para las mezclas asfálticas de los cuales se puede enumerar los siguientes<sup>5</sup>:

---

<sup>5</sup> Montejo Alfonso, Ingeniería de pavimentos, Tomo 2, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2006, pág. 80.

- Bacheos: Recomendado por su facilidad de manejo, el tamaño máximo del agregado será elegido en función de la profundidad del bache. Es preferible a los riesgos sucesivos por su mayor rendimiento y regularidad.
- Capas de base: previa a la selección de la granulometría adecuada, dadas las buenas características que ofrecen a la flexibilidad y resistencia a la fatiga.
- Capa de rodadura: En carreteras de nueva construcción donde se prevén deflexiones y consolidaciones importantes.

### **1.2.2. Mezclas con emulsiones asfálticas y adición de escorias siderúrgicas.**

Después de la primera guerra mundial y como consecuencia del incremento de la producción siderúrgica se empezaron a aprovechar las escorias siderúrgicas o de alto horno, siendo uno de los principales destinos su utilización como árido en las diferentes capas constituyentes de las carreteras. Desde entonces el aumento de la producción y evolución de las características estructurales de bases y pavimentos han modificado las exigencias de este material y dado lugar a una diversidad de usos.

Las propiedades favorables de las escorias siderúrgicas para el empleo en mezclas bituminosas las hacen aptas para utilizarlas en capas de rodadura o intermedias. Su homogeneidad y limpieza, rozamiento interno, rugosidad superficial y facilidad de extensión son ventajas para su utilización con los agregados pétreos en las mezclas asfálticas.

En las mezclas asfálticas se emplea como agregados pétreos grava a la que se le añade arena para aumentar la fracción fina y el resto se lo completa con escoria siderúrgica incorporada.<sup>6</sup>

Usualmente la composición de la mezcla es la siguiente:

75% de grava

15% de arena

10% de escoria siderúrgica

Estos porcentajes dependen mucho de las características físico-mecánicas que tengan los agregados a utilizarse al igual que la escoria siderúrgica (Figura 5).



**Figura 5.-** Escorias siderúrgicas a utilizarse en las mezclas asfálticas en frío.

La finalidad de la inserción de escorias siderúrgicas en mezclas asfálticas se puede resumir en estos puntos.

- Las características que se busca que la adición aporte a la mezcla. Se debe tener claro si lo que se persigue es que la adición sea un filler, una adición

---

<sup>6</sup> Llamazares Gomez Olegario, Empleo de escorias de alto horno en los firmes de carretera, Revista de obras públicas, Madrid, España.

inerte, que cumpla función de reemplazo de alguna materia prima constituyente del material o que su aporte sea de orden activo.

- El contenido de materia orgánica es un aspecto sobre el cual se debe tener control para evitar que su descomposición afecte a la mezcla asfáltica o alguna de las otras materias primas, variando sus propiedades.
- Propiedades físicas y químicas las cuales se deben estudiar con detenimiento, porque ellas dan una idea del potencial de la adición y de su posible acción y aporte dentro la mezcla.
- Composición mineralógica es un aspecto que reviste gran importancia cuando se busca que la adición cumpla un papel activo. De las fases mineralógicas constituyentes y de su orden estructural depende el comportamiento final del material y el aporte que ella puede llegar a ofrecer.
- Su acción en función de la durabilidad. Se hace necesario evaluar el comportamiento de la adición dentro de la mezcla a lo largo del tiempo y la acción que agentes agresivos externos le puedan causar tanto a ella como al material.

### **1.3. Escorias Siderúrgicas**

#### **1.3.1. Concepto**

Las escorias son un subproducto de la fundición de la mena para purificar los metales. Se pueden considerar como una mezcla de óxidos metálicos; sin embargo, pueden contener sulfuros de metal y átomos de metal en forma de elemento. Aunque la escoria suele utilizarse como un mecanismo de eliminación de residuos en la fundición del metal, también pueden servir para otros propósitos, como ayudar en el

control de la temperatura durante la fundición y minimizar la re-oxidación del metal líquido final antes de pasar al molde.

En la naturaleza, los minerales de metales como el hierro, el cobre, el aluminio y otros metales se encuentran en estados impuros, a menudo oxidados y mezclados con silicatos de otros metales.

Durante la fundición, cuando la mena está expuesta a altas temperaturas, estas impurezas se separan del metal fundido y se pueden retirar. La colección de compuestos que se retira es la escoria (Figura 6).



**Figura 6.-** Escorias siderúrgicas.

La escoria tiene muchos usos comerciales y raramente se desecha. A menudo se vuelve a procesar para separar algún otro metal que contenga. Los restos de esta recuperación se pueden utilizar como balasto para el ferrocarril y como fertilizante. Se ha utilizado como metal para pavimentación y como una forma barata y duradera de fortalecer las paredes inclinadas de los rompeolas para frenar el movimiento de las olas.

A menudo se utiliza escoria granular de alto horno en combinación con el mortero de cemento pórtland como parte de una mezcla de cemento. Este tipo de escoria reacciona con el agua para producir propiedades cementantes. El mortero que contiene escoria granular de alto horno desarrolla una gran resistencia durante largo tiempo, ofreciendo una menor permeabilidad y mayor durabilidad. Como también se reduce la unidad de volumen de cemento pórtland, el mortero es menos vulnerable al álcali-sílice y al ataque de sulfato.

### **1.3.2. Características de la escoria.**

Las escorias reúnen una serie de cualidades muy interesantes para su empleo en las capas de la carretera. Las propiedades hidráulicas que dan rigidez a las capas de base, la forma aristada de sus elementos, su limpieza por estar exentas de materia orgánica o terrosa, su buena adhesividad a los ligantes bituminosos y la rugosidad permanente son propiedades de destacado interés en la técnica de los pavimentos.

La escoria es un material estable pero no inerte, ya que tiene propiedades hidráulicas y fragua en presencia del agua con potencial que depende de su composición química y de la finura de molido.

Siendo las escorias siderúrgicas productos resultantes de procesos de obtención del arrabio y el acero es que son consideradas una materia prima no natural de bajo costo. Las escorias se forman por la fusión de las impurezas del mineral de hierro junto con la adición de fundentes de caliza y dolomita y las cenizas de coque. El proceso lento de enfriamiento de la escoria enfriada al aire hace que sus componentes vayan formando distintas fases cristalinas y alveolares constituyendo una estructura

termodinámica más estable pero perdiendo sus propiedades de aglomerante hidráulico.

En la composición química juega un papel importante la temperatura de salida del horno; según esta sea más o menos alta, el producto metálico absorbe mayor cantidad de sílice y queda menos en la escoria.

Se han llevado a cabo investigaciones sobre las características físico-químicas de las escorias y de las propiedades hidráulicas que de ellas se derivan. Las escorias reúnen los elementos residuales del proceso industrial, es decir los desechos del hierro, cenizas del combustible y aditivos ácidos y básicos.

Existen dos tipos de escorias, la machacada y la granulada. La primera se obtiene por enfriamiento lento al aire, seguido de machaqueo y cribado. La escoria granulada resulta del enfriamiento brusco por una potente corriente de agua que divide al chorro líquido de escoria y sale del horno en pequeños gránulos que quedan en estado vítreo. El vapor que se produce al contacto del chorro caliente con el agua origina una expansión a la que se debe la estructura alveolar de la escoria beneficiosa para el desmenuzamiento que aumenta su reactividad o potencial hidráulico, así también para conservar una superficie rugosa bajo los efectos de desgaste del tráfico lo que constituye una buena cualidad para su empleo en capas de rodadura<sup>7</sup>.

La reactividad de las escorias granuladas se debe a la presencia de fases cuasi-cristalinas activas, susceptibles de ser excitadas por vía básica. El potencial reactivo depende de la composición de la colada y de la granulometría a la que se llegue en el proceso de enfriado, es decir del grado de división del material; este depende de la

---

<sup>7</sup> Llamazares Gomez Olegario, Empleo de escorias de alto horno en los firmes de carretera. Revista de obras públicas, Madrid, España.

temperatura del horno y de la presión del chorro de agua y temperatura de esta sobre la que puede actuarse para conseguir un sub-producto de la mejor calidad.

En el uso de este tipo de materiales es aconsejable mantener un acopio del mismo, en un tiempo prudencial mayor a los seis meses, para asegurar la finalización de cualquier tipo de proceso que haya quedado inconcluso, por otro lado es importante conocer químicamente los porcentajes de los elementos constitutivos con el fin de encuadrarse dentro de las normas.

#### **1.4. Descripción de las mezclas asfálticas.**

##### **1.4.1. Mezclas con emulsiones asfálticas.**

Hoy en día debido al cambiante volumen de tráfico y condiciones climáticas se ha llegado a desarrollar tres tipos de mezclas asfálticas con emulsiones estas son mezclas abiertas en frío, mezclas densas o cerradas en frío y mezclas asfálticas con arena o también llamadas lechadas asfálticas.

Se denominan mezclas abiertas en frío a la combinación de un agregado que predominantemente es grueso y de granulometría uniforme y emulsión catiónica de rompimiento medio, ambos componente en frío. Estas mezclas poseen un alto porcentaje de vacíos a través de los cuales drena el agua.

Las mezclas asfálticas sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando unas condiciones adecuadas de rodadura, cuando se emplean en capas superficiales; y como material con resistencia simplemente estructural o mecánica en las demás capas de los firmes.

Como material simplemente estructural se pueden caracterizar de varias formas. La evaluación de parte de sus propiedades por la cohesión y el rozamiento interno es comúnmente utilizada; o por un módulo de rigidez longitudinal y un módulo transversal, o incluso por un valor de estabilidad y de deformación. Como en otros materiales hay que considerar también, la resistencia a la rotura, las leyes de fatiga y las deformaciones plásticas.

El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como son el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por esta causa su caracterización y propiedades tienen que estar vinculadas a estos factores, temperatura y duración de la carga, lo que implica la necesidad del conocimiento de la reología del material.

Las cualidades funcionales del pavimento residen fundamentalmente en su superficie de su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción dependen aspectos tan interesantes y preocupantes para los usuarios como:

1. La adherencia del neumático al pavimento.
2. Las proyecciones de agua en tiempo de lluvia.
3. El desgaste de los neumáticos.
4. El ruido en el exterior y en el interior del vehículo.
5. La comodidad y estabilidad en marcha.
6. Las cargas dinámicas del tráfico.
7. La resistencia a la rodadura (consumo de carburante).
8. El envejecimiento de los vehículos.
9. Las propiedades ópticas.

Por su poco equipo necesario de planta y altos volúmenes de producción posible, estas mezclas resultan económicas cuando se requiere una mezcla de alta calidad de tráfico pesado. Las mezclas abiertas en frío han presentado una buena resistencia al ahuellamiento, a la fatiga, y a los desplazamientos, es por esto que en algunos casos las mezclas abiertas a largo plazo han sido comparables con las mezclas asfálticas en caliente.

Las mezclas densas en frío se las define como la combinación de un ligante bituminoso con agregados minerales bien gradados, con un elevado porcentaje de finos y que es posible fabricar, aplicar y compactar a temperatura ambiente. El material bituminoso será una emulsión asfáltica catiónica de ruptura lenta; los materiales gradados podrán ser desde el máximo tamaño hasta inclusive material pasante por el tamiz #200 (75  $\mu\text{m}$ ). Este tipo de mezcla puede ser utilizado para todos los tipos de aplicación de pavimentos.

Por último se define a la lechada asfáltica como la mezcla de emulsión asfáltica, agregado fino bien gradado, llenante mineral (filler) y agua. El agregado fino deberá proceder en su totalidad de la trituración de piedra de cantera o de grava natural o parcialmente de fuentes naturales de arena. La proporción de arena natural no podrá exceder el 25% de la masa total del agregado combinando<sup>8</sup>.

Para estas mezclas, las emulsiones típicamente empleadas son de rotura lenta y de rotura media de alta flotación preferentemente con grados de mayor dureza.

Sus dos principales campos de utilización son el de tratamiento de sellados y el tratamiento de antideslizantes.

---

<sup>8</sup> Montejo Alfonso, Ingeniería de pavimentos, Tomo 2, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2006, pág. 87.

### **1.4.2. Diseño de la mezcla.**

A lo largo de la historia han existido varios métodos de diseños de mezclas asfálticas, aquí se presentan los más reconocidos.

1. The Hubbard-Field (1920's). Método de diseño de mezclas asfálticas, fue uno de los primeros métodos en evaluar contenidos de vacíos en la mezcla y en el agregado mineral. Usaba una estabilidad como prueba para medir la deformación. Funcionó adecuadamente para evaluar mezclas con agregado pequeño o granulometrías finas, pero no tan bien para mezclas con granulometrías que contenían agregados grandes.
2. Método Marshall (1930's). Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado durante la 2da. Guerra Mundial y después fue adaptado para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentalmente. Excepto cambios en las especificaciones, el método no ha sufrido modificación desde 1940.
3. Método Hveem (1930's). Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado casi en el mismo tiempo que el método Marshall. Evalúa una estabilidad pseudotriaxial
4. Método de la Western Association of State Highway on Transportation Officials. WASHTO (1984). Este método de diseño de mezclas recomendó cambios en los requerimientos del material y especificaciones de diseño de mezclas para mejorar la resistencia a las roderas.
5. Método de Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. AAMAS (1987). La necesidad de cambios en el diseño de mezclas fue reconocida, tardaron 2 años para desarrollar un nuevo proyecto para el diseño de mezclas, que incluía un nuevo método de compactación en laboratorio y la evaluación de las propiedades

volumétricas, desarrollo de pruebas para identificar las deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia a las grietas a baja temperatura.

6. Método SUPERPAVE (1993) El método AAMAS, sirvió como punto de inicio del método SUPERPAVE, que contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por fatiga y grietas por baja temperatura. Los modelos de predicción de funcionamiento fueron completados satisfactoriamente hasta el año 2000. Tiene su resultado, ahora la aceptación en el control de calidad ha sido cambiada a propiedades volumétricas.

Como se puede ver no existe un método universal aceptado para el diseño de mezclas en frío sin embargo el método Marshall (ASTM D 1559 o AASHTO T 245) es un método destinado para diseño de mezclas con granulometrías abiertas.

Es muy importante preparar en el laboratorio mezclas de prueba para determinar el grado y el porcentaje de emulsión asfáltica así también como las propiedades de trabajabilidad, estabilidad y resistencia del sistema.

El método Marshall para mezclas abiertas en frío se basa en un procedimiento desarrollado por el Departamento de Transporte de Pennsylvania (Pennsylvania Department of Transportation) tratando de desarrollar un método normalizado tomando en consideración los diseños actualmente en uso, diferentes tipos de materiales como son las emulsiones y los agregados y disponibilidad de los equipos.

Para el diseño de las mezclas abiertas en frío se debe tener algunas consideraciones que tienen que ver con la estabilidad de la mezcla, resistencia a las deformaciones plásticas, durabilidad, impermeabilidad y resistencia al deslizamiento.

## **CAPITULO II**

### **REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS.**

#### **2.1. Realización de los ensayos.**

Todo material debe ser sometido a pruebas de laboratorio con el fin de conocer sus características y comprobar si las mismas se encuentran dentro de los requisitos que las especificaciones exigen. En este capítulo se expondrá los ensayos que deberán ser realizados en esta disertación así como recomendaciones generales para realizar bien estos ensayos y las normas tanto nacionales (normas MOP e INEN) como internacionales (normas ASTM y AASHTO) que van a ser la guía de esta investigación.

##### **2.1.1. Obtención de los agregados en cantera.**

Los agregados son materiales que se obtienen de la trituración o disgregación de piedra, debe cumplir con sus principales características que son dureza, durabilidad, tamaño máximo, finura, resistencia a agentes externos que se mide en el ensayo de resistencia a la acción de los sulfatos. La principal norma que deben cumplir los agregados es la de la granulometría, los valores que se presenten en este ensayo deben estar dentro de la curva de especificaciones. También es importante que las características mecánicas de los áridos sean adecuadas y que los áridos estén libres de impurezas. Los agregados naturales se clasifican en finos y gruesos los agregados finos o arenas pasan por el tamiz # 4 y el agregado grueso no atraviesa el tamiz # 4 y se conocen como gravas (ripió en nuestro medio). Los agregados gruesos

presentan mejores propiedades de adherencia con la pasta de cemento cuando son triturados, lo que les dota de aristas (los áridos con superficie redondeada tienen menor adherencia). Las principales diferencias entre el polvo de piedra y la arena, es que por trituración se obtiene material que es superior a la abertura del tamiz 200, y en estado natural se encuentra material que se considera hasta el material que pasa el tamiz 100.

Se debe realizar una inspección general de la cantera, las muestras deben ser tomadas en un lugar apropiado de manera que represente un buen muestreo. Estas muestras de preferencia deberán ser tomadas de las pilas o depósitos de las canteras, de igual manera las muestras serán tomadas en distintos intervalos de tiempo para así poder determinar variaciones en su granulometría.

Si las muestras van a ser tomadas de una tolva, esta debe hacerse de toda la sección transversal de descarga del material; cuando comienza la descarga de la tolva, se debe dejar fluir primero suficiente material antes de tomar la muestra para asegurar así su uniformidad.

Se recomienda que el muestreo de piedra triturada, grava y arena se lo haga cada 50 toneladas de material producido. La cantidad se debe determinar sobre la base del tipo y número de ensayos a realizar al igual que del uso que se va a dar al material y de las variaciones tanto de calidad como de tamaño de los agregados (Foto 7).



**Foto 7.-** Obtención de los agregados en cantera.

## **2.2. Ensayos y características de los materiales granulares.**

### **2.2.1. Granulometría.**

Este ensayo cubre el procedimiento para la determinación de la distribución de gradación de agregados finos y gruesos.

Los resultados son utilizados para determinar la conformación de la distribución del tamaño de las partículas con la aplicación de las especificaciones y proveer información para el control de producción de productos de los agregados así también como mezclas que contengan a los agregados

La determinación de curva granulométrica, es de primordial importancia para conocer la textura que tendrá la carpeta. También esta curva es dato esencial para el desarrollo de la mayoría de los métodos de diseño de mezclas bituminosas.

Las normas ASTM especifican varios rangos de curvas granulométricas. Cada rango de curva tiene propósitos específicos y diferentes. Es decir se especifican curvas para tratamientos superficiales, mezclas al lugar, mezclas en planta, etc. (Foto 8 y Foto 9).



**Foto 8.-** Granulometría agregado grueso.

**Foto 9.-** Granulometría agregado fino.

**Normas.** ASTM C 136-09, AASHTO T-27, INEN 696.

### **2.2.2. Contenido de humedad natural de los agregados.**

Este ensayo es utilizado para la determinación del porcentaje de humedad evaporable de una muestra de agregado sometido a un secado. Se lo debe realizar cada vez en el campo, ya que esta va a diferir de un día a otro (Foto 10).



**Foto 10.-** Muestras de los agregados en el horno para determinar su contenido de humedad natural.

**Normas.** ASTM C 566-09, AASHTO T-55, INEN 862.

### **2.2.3. Desgaste de los agregados gruesos en la máquina de los Ángeles.**

Este ensayo nos permite determinar la resistencia al desgaste de las piedras machacadas, escorias machacadas, gravas sin machacar y gravas machacadas.

Para su uso en mezclas asfálticas el desgaste por abrasión no deberá superar el 45% permitiendo así que la mezcla sea resistente a las sollicitaciones comunes como las de tráfico (Foto 11).



**Foto 11.-** Maquina de los Ángeles utilizada para el ensayo de desgaste.

**Normas.** ASTM C 131-09, AASHTO T-96, INEN 860-861.

#### **2.2.4. Gravedad específica de los agregados.**

Este ensayo permite determinar la densidad promedio de una cantidad de los agregados tanto grueso como fino sin incluir el volumen de vacíos entre las partículas del agregado. Dependiendo del procedimiento usado la gravedad específica (densidad relativa) puede ser expresada como seca en horno SH, saturada con superficie seca SSS, o densidad aparente. De la misma manera una cantidad adimensional es expresada como SH, SSS o como densidad relativa aparente (gravedad específica aparente). La densidad SH y la densidad SH relativa se determinan después de que el agregado se ha secado; mientras que la densidad SSS, densidad SSS relativa y la absorción son determinados después de saturar el agregado en agua por un lapso de tiempo definido.

La gravedad específica o densidad relativa es utilizada para el cálculo el volumen ocupado por el agregado en varias mezclas que contengan agregados como es el caso de mezclas con materiales bituminosos o con cemento portland. La densidad relativa también es utilizada para el cálculo de de los vacíos de los agregados según las normas ASTM C29/C29M (Foto 12 y Foto 13).



**Foto 12.-** Gravedad específica grueso.



**Foto 13.-** Gravedad específica fina

**Normas:** ASTM C127-09, AASHTO T-84, INEN 856

### **2.2.5. Durabilidad de los agregados a la acción de los sulfatos.**

En este método cubre el procedimiento a seguirse en el ensayo de agregados para determinar su resistencia a la desintegración por saturación en soluciones de sulfato de sodio o sulfato de manganeso. Proveen información que ayudan a juzgar la resistencia de los agregados sujetos a la acción climática, particularmente si no existe

información estadística de los materiales sujetos a las actuales condiciones climáticas.

Llama la atención el factor que resulta del ensayo de las sales que difieren considerablemente y se debe tener mucho cuidado en fijar límites apropiados en cualquier especificación, la cual puede incluir requerimientos para estos ensayos. Para pavimentos el desgaste de los agregados por sulfato de sodio no deberá superar el 12% (Foto 14).



**Foto 14.-** Ensayo de durabilidad de los agregados a la acción de los sulfatos.

**Normas.** ASTM C 88-09, AASHTO T-104, INEN 163.

#### **2.2.6. Contenido orgánico de la arena.**

Este método de ensayo cubre dos procedimientos para una determinación de la presencia de compuestos orgánicos perjudiciales (impurezas) en arenas naturales que vayan a emplearse en morteros, mezclas asfálticas y hormigones.

El principal valor de este método es proporcionar una advertencia de cantidades perjudiciales de impurezas orgánicas que puedan estar presentes en el agregado fino. Cuando una muestra es sometida a este ensayo produce un color más oscuro que el color normalizado es conveniente ejecutar el ensayo del efecto de impurezas orgánicas en la resistencia de morteros, mezclas asfálticas y hormigones en concordancia con el método de ensayo C-87. Este ensayo también puede ser usado para la determinación preliminar de la aceptabilidad del agregado fino con respecto a los requisitos de la especificación C-33 que relaciona las impurezas orgánicas (Foto 15).



**Foto 15.-** Contenido orgánico de la arena.

**Normas.** ASTM C 40-09, AASHTO T-21, INEN 855.

### **2.2.7. Equivalente de arena.**

En este ensayo se determina la proporción relativa del contenido de polvo fino o material arcilloso perjudicial que contiene los suelos o agregados. Este ensayo

pretende ser un método rápido en el laboratorio y en el campo (MOP E108) para investigar la presencia o ausencia de finos activos que perjudiquen el agregado dentro de una estructura de un pavimento.

El equivalente de arena se realiza en los agregados que pasan el tamiz # 4 (4.75 mm).

Los valores mínimos recomendables según la norma AASHTO T-176 y ASTM D 2419-09 son los siguientes:

	Equivalente de arena	
	Tráfico liviano y medio	Tráfico pesado
Base	35	40
Capa de rodadura	45	50

Según la norma ASTM D 4791-09 el porcentaje máximo en peso de partículas alargadas y achatadas retenidas en el tamiz # 4 cuya relación entre dimensiones máximas y mínimas sea mayor a 5, no deberá ser mayor en un 10% (Foto 16).

El máximo porcentaje de materiales deletéreos en los agregados es de 1% según la norma ASTM C 142-09. El material clase 2 deberá tener un equivalente de arena no mayor de 75 según el ensayo propuesto por la norma AASHTO T-147.



**Foto 16.-** Materiales para hacer el ensayo de equivalente de arena.

**Normas.** ASTM D 2419-09, AASHTO T-176, MOP E108.

### **2.3. Ensayos a los materiales bituminosos.**

Se estudiará a la emulsión, a sus propiedades físico-mecánicas así como sus propiedades químicas. Las emulsiones no siempre alcanzan un estado de equilibrio en corto tiempo, y como consecuencia frecuentemente experimentan alteraciones con el tiempo. En tales circunstancias se debe reconocer que las generalizaciones no son leyes rigurosas sino que se han de considerar con relación a la clase de producto que se trate.

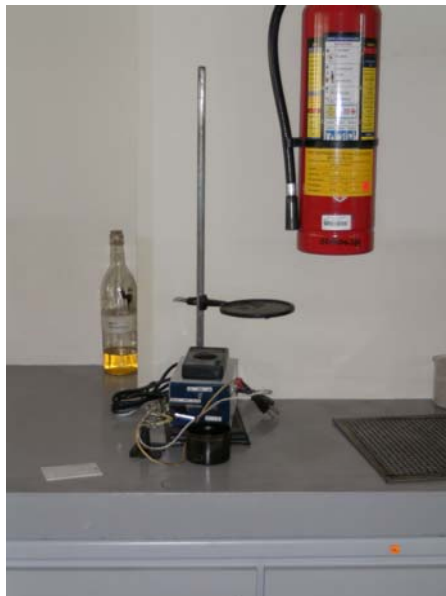
#### **2.3.1. Ensayos a la emulsión.**

Para evaluar la calidad de cualquiera de los tipos de asfalto y para realizar su clasificación se ha llegado a idear una serie de ensayos de laboratorio que hoy en día

forman parte de la práctica rutinaria cuando se trabaja con asfaltos y que a continuación se describen.

### **2.3.1.1. Carga de la partícula.**

Este ensayo permite identificar la naturaleza de la emulsión (catiónica o aniónica). Se sumerge un electrodo positivo (ánodo) y un electrodo negativo (cátodo) en una muestra de emulsión asfáltica, y se los conecta en una fuente controlada de corriente eléctrica continua. Después de 30 minutos o cuando la corriente decaiga 2 mili amperes, se examinan los 2 electros para determinar cual tiene un depósito de asfalto. Si está en el cátodo, estamos en presencia de una emulsión asfáltica catiónica y viceversa (Foto 17).



**Foto 17.-** Ensayo para determinar la carga de la partícula.

Un criterio muy útil sobre todo en el trabajo en campo cuando exista duda al respecto del tipo de emulsión que se está trabajando pero que no es estandarizado por la

ASTM es en base al tiempo de descarga que permite tener una idea del tipo de emulsión.

Este criterio se lo presenta en la tabla descrita a continuación.

<b>Tiempo (minutos)</b>	<b>Tipo de emulsión</b>
0-10	Rápida
15-35	Media
30-60	Lenta
más de 60	Superestable

**Norma.** ASTM D 244-09.

#### **2.3.1.2. Gravedad específica.**

Se entiende como gravedad específica de un material la relación de su peso a una temperatura determinada, al peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura generalmente a los 25 grados centígrados y se expresa como: Gravedad Específica a 25 grados centígrados.

La gravedad específica de los asfaltos sólidos se determina por inmersión directa en agua mientras que la de los semisólidos, líquidos y emulsificados que es nuestro caso de estudio se los determina por medio del picnómetro y desplazamiento (Foto 18).

La gravedad específica además de indicar sobre la calidad y origen del material bituminoso sirve para determinar las equivalencias de los pesos a volúmenes a la temperatura de aplicación y para algunos cálculos importantes en el diseño de mezclas bituminosas.



**Foto 18.-** Picnómetros para la determinación de la gravedad específica.

**Norma.** ASTM D 244-09.

### **2.3.1.3. Retenido en la malla # 20.**

Este ensayo es complementario al de asentamiento y sirve para detectar cuantitativamente el porcentaje de cemento asfáltico presente en las emulsiones en forma de glóbulos grandes o astillas que puedan taponar el equipo de distribución.

Una muestra de 1000 ml se lava en agua sobre el tamiz # 20 (0.84 mm) y luego se seca lo retenido para determinar el porcentaje de partículas indeseables (Foto 19).



**Foto 19.-** Proceso de lavado mediante el tamiz # 20.

**Norma.** ASTM D 244-38.

#### **2.3.1.4. Viscosidad.**

Este ensayo tiene como objetivo determinar el estado de fluidez de la emulsión en el rango de temperatura que se usan durante su aplicación. Se mide, ya sea por viscosidad cinemática o mediante viscosidad Saybolt Furol.

La viscosidad se define como la resistencia que presenta un fluido al movimiento. En el caso de las emulsiones asfálticas la prueba de viscosidad se la utiliza como una medida de consistencia y los segundos se reportan en segundos Saybolt; estas viscosidades se miden en dos diferentes rangos de temperatura de 50 y 25 grados centígrados por motivos de conveniencia y exactitud (Foto 20).



**Foto 20.-** Ensayo de viscosidad de la emulsión.

La viscosidad de las emulsiones es un parámetro muy importante para efectuar riegos de liga o adherencia y a riegos de gravilla.

La viscosidad está relacionada con diversos factores importantes en la emulsión:

- Tamaño de la partícula: El tamaño de la partícula es muy importante en la viscosidad de la emulsión, entre menor es el tamaño de la partícula mayor es la viscosidad de la emulsión.
- Naturaleza química del emulsificante: La viscosidad de la emulsión puede incrementar de acuerdo a la composición química y a la dosificación del emulsificante
- Viscosidad de la fase continua: El aumento de la viscosidad de la fase continua (agua) con diversos aditivos como gomas y celulosas aumenta la

viscosidad de la emulsión logrando así evitar un asentamiento y sin modificar las propiedades de la emulsión en cuanto a su funcionamiento en campo.

- Contenido de cemento asfáltico: A partir de los contenidos de cemento asfálticos superiores al 65% y considerando pequeños aumentos en la concentración de este último, la viscosidad de la emulsión se eleva considerablemente. Las características del cemento asfáltico utilizado también influye en este parámetro.

**Norma.** ASTM D 244-22.

#### **2.3.1.5. Residuo por evaporación.**

Este ensayo sirve para determinar la proporción relativa de cemento asfáltico y agua presentes en la emulsión asfáltica. También permite obtener información sobre la cantidad de destilado de petróleo, contenido en algunas clases de emulsiones asfálticas. Con el cemento asfáltico residual de este ensayo se pueden hacer otros ensayos adicionales como penetración, solubilidad y ductilidad que se describirán posteriormente.

Para emulsiones la temperatura final de destilación es de 260 grados centígrados y se usa un alambique de aleación de acero o aluminio y calentadores de anillo. Se calienta una muestra de emulsión de 200 gramos hasta la temperatura final, manteniéndola por quince minutos para producir un residuo suave y homogéneo (Foto 21). Cuando se trata de emulsiones asfálticas catiónicas de rotura rápida y

media que pueden incluir un destilado de petróleo, su cantidad máxima está limitada por especificaciones.

Tanto el destilado como el agua se recogen en una probeta graduada pero como ambos materiales se separan se puede determinar la cantidad de cada uno.



**Foto 21.-** Proceso para determinar el residuo por evaporación.

**Norma.** ASTM 244-29.

#### **2.3.1.6. Estabilidad a las 24 horas.**

El ensayo de estabilidad a las 24 horas permite hacer determinaciones de estabilidad en un tiempo relativamente corto ya que normalmente se realiza un ensayo de duración de 5 días. Este ensayo detecta la tendencia de los glóbulos de asfalto de una emulsión asfáltica a asentarse durante el período en que la emulsión permanezca almacenada y es una alerta sobre la posible inestabilidad de las emulsiones.

Se colocan 2 muestras de 500 ml. en probetas graduadas; se los tapa y se los deja descansar por 24 horas. Se toman muestras de 50 gr. de la parte superior e inferior de la probeta, se la colocan en frascos, se las revuelve y se las pesa. Se las mete en un horno para evaporar el agua y se pesan los residuos. Se pueden determinar entonces el porcentaje promedio de residuos en la parte superior e inferior de la muestra. La diferencia entre ambos residuos es la estabilidad a las 24 horas (Foto 22).



**Foto 22.-** Estabilidad a las 24 horas de la emulsión.

**Norma.** ASTM D 244-29.

#### **2.3.1.7. Pruebas del residuo.**

Estos ensayos son utilizados para conocer las características del ligante asfáltico que posteriormente recubrirán las partículas de los agregados. Para el análisis de estos resultados debemos tomar en cuenta las limitaciones del ensayo de

destilación que es utilizado para obtener el residuo del ligante asfáltico. Los ensayos comúnmente exigidos por las especificaciones se los detalla a continuación.

#### **2.3.1.7.1. Ensayo de penetración.**

Es una medida de la consistencia de las emulsiones asfálticas. Sobre una pasta de asfalto previamente moldeada y calentada a una temperatura uniforme de 25 grados centígrados, se coloca una aguja de acero de diámetro y dimensiones normalizadas, que soporta un peso de 100 gr. y se deja libre durante 5 segundos. La distancia que la aguja logre penetrar dentro de la pasta asfáltica dentro de estas condiciones, medida en décimas de milímetros, se denomina penetración del asfalto. Mientras mayor sea la penetración más blanda es la consistencia del cemento asfáltico (Foto 23).



**Foto 23.-** Ensayo de penetración del residuo.

**Norma.** ASTM D 15-09.

### 2.3.1.7.2. Ductilidad.

Es una propiedad que tienen los asfaltos en su gran capacidad de mantenerse coherentes bajo grandes deformaciones producidas por diversos factores como el tránsito. La ductilidad se mide en un equipo denominado ductilímetro. En el ensayo se mide la resistencia a la ruptura por medio del alargamiento de una probeta de cemento asfáltico, estirada en sus extremos a velocidad constante. Normalmente se realiza a una temperatura de 25 grados centígrados y a una velocidad de alargamiento de 5 cm. por minuto (Foto 24).



**Foto 24.-** Ensayo de ductilidad del residuo.

Los asfaltos que poseen alta ductilidad normalmente son más adhesivos que aquellos que tienen en menor grado esta característica, pero pueden variar su consistencia rápidamente al cambiar la temperatura.

**Norma.** ASTM D 113-09.

## **2.4. Ensayos a las escorias siderúrgicas.**

Al igual que los agregados pétreos y la emulsión asfáltica que se van a utilizar en la mezcla, las escorias al ser parte de esta mezcla sus propiedades y características necesitan ser estudiadas. Se estudiará solamente las cualidades físicas las escorias ya que no es necesario el estudio tanto químico como mecánico de las escorias siderúrgicas para su uso en la mezcla.

Uno de los ensayos esenciales para determinar las propiedades de las escorias siderúrgicas tiene que ver con su granulometría que es el ensayo detallado a continuación.

### **2.4.1. Granulometría de las escorias siderúrgicas.**

Este ensayo cubre el procedimiento para la determinación de la distribución de gradación de las escorias siderúrgicas.

Los resultados son utilizados para determinar la conformación de la distribución del tamaño de las partículas con la aplicación de las especificaciones y proveer información para el control de producción de productos de las escorias así también como mezclas que contengan a las escorias.

Las normas ASTM especifican varios rangos de curvas granulométricas. Cada rango de curva tiene propósitos específicos y diferentes. Es decir se especifican curvas para tratamientos superficiales, mezclas al lugar, mezclas en planta, etc.

Es necesaria la determinación de la granulometría de las escorias ya que para el diseño de la mezcla asfáltica se deberá reemplazar cierta cantidad del agregado fino por las escorias siderúrgicas (Foto 25).



**Foto 25.-** Proceso para tamizar las escorias siderúrgicas.

### **CAPITULO III**

## **DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFALTICAS CON EL METODO MARSHALL MODIFICADO.**

### **3.1. Introducción.**

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 Missisipi. 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 mm (1”) o menor, pero con ciertas adaptaciones en la metodología de la prueba se han obtenido muy buenos resultados para su uso en mezclas asfálticas en frío. El método Marshall modificado se desarrolló para tamaños máximos arriba de 38 mm (1.5”), y está pensado para diseño en laboratorio y control en campo de mezclas asfálticas en caliente, con graduación 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 estándar de 64 mm (2 ½”) de alto y 102 mm (4”) 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, y la

prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados; cabe mencionar que este proceso de diseño no tiene especificado pruebas para agregados minerales ni para cementos asfálticos (Foto 26).



**Foto 26.-** Especímenes.

En el método Marshall se elaboran tres tipos de pruebas para conocer tanto sus características volumétricas como mecánicas.

### **3.1.1. Determinación de la gravedad específica.**

La prueba de gravedad específica se la debe realizar una vez que las muestras hayan sido curadas, 24 horas en el molde al aire y 72 en un horno a 41 grados centígrados. Se debe tomar tres pesos para la determinación de la gravedad específica; peso seco al aire, peso saturado con superficie seca (SSS) y un peso sumergido. El primer peso a tomarse es el peso seco, luego de esto se debe sumergir la muestra en agua a 25 grados centígrados por 30 minutos para la determinación de los pesos restantes. Para el peso saturado con superficie seca se debe procurar eliminar el exceso de agua en la superficie de la briqueta (Foto 27 y 28).



**Foto 27.-** Especímenes secos al horno.      **Foto 28.-** Determinación de pesos.

### 3.1.2. Prueba de estabilidad y flujo.

Después de que la gravedad específica se ha determinado, se procede a la prueba de estabilidad y flujo, que consiste en sumergir el espécimen en un baño María a  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  de 30 a 40 minutos antes de la prueba (Foto 29).



**Foto 29.-** Especímenes en baño María a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Con el equipo de prueba listo se remueve el espécimen colocado en baño María y cuidadosamente se seca la superficie. Ubicando y centrando el espécimen en la

mordaza inferior, se coloca la mordaza superior y se centra completamente en el aparato de carga.

Posteriormente, se aplica la carga de prueba al espécimen a una deformación constante de 51 mm (2") por minuto, hasta la falla. El punto de falla se define por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de Newtons (lb) requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall. Mientras la prueba de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático, se deberá mantener el medidor de flujo sobre la barra guía y cuando la carga empiece a disminuir se deberá tomar la lectura, y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial, expresado en unidades de 0.25 mm (1/100"), será el valor del flujo Marshall (Foto 30).



**Foto 30.-** Ensayo de estabilidad y flujo.

### **3.1.3. Análisis de densidad y vacíos.**

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se lleva a cabo el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba. Se debe determinar la gravedad específica teórica máxima para al menos dos contenidos de asfalto,

preferentemente los que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado, se calcula de estos valores. Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado, así como el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas, la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (Va), porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA), y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

### **3.2. Diseño de mezclas asfálticas con emulsión.**

Para estar las emulsiones asfálticas constituidas por fases continua y discontinua, es indispensable conocer su comportamiento durante el tiempo y es por eso que los ensayos tendientes a medir la calidad de las emulsiones se agrupan para definir la composición, (destilación y carga de partícula), consistencia (viscosidad) y estabilidad.

Se va a utilizar el método Marshall modificado, previamente mencionado, para diseño de mezclas frías emulsificadas de asfalto-agregado. Este método esta basado en investigaciones dirigidas por la Universidad de Illinois usando una modificación del método Marshall de diseño de mezclas y el ensayo de durabilidad a la humedad. El método y los procedimientos recomendados son aplicables a la capa de rodadura para un tráfico liviano que contenga emulsiones asfálticas con un agregado mineral de grado denso con tamaño máximo de 25 mm. (1 pulg.) o menor. Este método es recomendado para mezclas en carretera o en planta a temperaturas ambientales.

Es importante el contenido óptimo de agua en la compactación ya que las propiedades de las mezclas están íntimamente relacionadas con la densidad de los

especímenes compactados. En ciertos casos es necesario incrementar el contenido de agua en la compactación para obtener las propiedades deseadas de la mezcla. Esto debe ser hecho para cada combinación de asfalto emulsificado y tipo de agregado considerado para cada proyecto.

Los procedimientos de diseño de la mezcla utilizan briquetas estándares Marshall para evaluar las propiedades de mezcla compactada. Para obtener resultados confiables, hay que triplicar las briquetas para cada porcentaje de emulsión para determinar el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica<sup>9</sup> (Foto 31).



**Foto 31.-** Mezcla fría emulsificada de asfalto–agregado.

### **3.2.1. Determinación del porcentaje de agua de mezclado o pre-envuelta.**

Este porcentaje se obtiene por tanteos; se comienza partiendo de una cantidad de agua  $H_0$  con la cual el material presenta un aspecto húmedo total pero sin tener agua libre.<sup>10</sup>

Suponiendo que el primer porcentaje de agua fue  $\%H_0$  entonces se realizarían las siguientes tentativas:

---

<sup>9</sup> Cajas Diego y Córdova Francisco, Uso de los aditivos Kling Beta II, Magnabond 2700 y Magnabond IV, en la adherencia de las mezclas agregado – asfalto, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Tesis, 2005, pág. 63.

<sup>10</sup> Rivera Gustavo, Emulsiones asfálticas, Alfaomega Grupo Editorial, Cuarta edición, México, 1998, pág. 135.

%Ho + (1% y 2%)

%Ho – (1% y 2%)

El porcentaje que se seleccione debe ser aquel con el que se tenga la mejor trabajabilidad y represente el mejor recubrimiento (Foto 32).



**Foto 32.-** Mezclado del material pétreo con el agua de pre-envuelta.

### **3.2.2. Cálculo del porcentaje óptimo teórico de emulsión en una mezcla.**

El porcentaje teórico de ligante se puede calcular de acuerdo a varios métodos, sin embargo por su exactitud y facilidad de cálculo se describirá únicamente en el método del Instituto del Asfalto en Estados Unidos.

Este método está publicado en el manual del asfalto y da directamente el porcentaje óptimo teórico de emulsión asfáltica con respecto a la mezcla total.

$$\% \text{ Asfalto} = 0.035a + 0.045b + kc + F$$

$$\% \text{ Emulsión} = \% \text{ Asf} / \% \text{ Residuo}$$

Donde:

a = Porcentaje retenido en la malla # 8.

b = Porcentaje retenido entre las mallas # 8 y # 200.

c = Porcentaje menor a la malla # 200.

k = 0,15 si c entre 11 y 15%

0,18 si c entre 6 y 10%

0,20 si c es menor a 5%

F = Puede variar de 0 a 2 según el tipo de material pétreo y su absorción.

Este resultado no debe de substituir de ninguna manera a las pruebas para obtener el porcentaje óptimo de la emulsión basado en sus valores de estabilidad, densidad, flujo y porcentajes de vacíos. Simplemente servirán como base para determinaciones más rápidas en el laboratorio partiendo de un valor sin base alguna (Foto 33).



**Foto 33.-** Porcentaje óptimo de emulsión en la mezcla de agregado pétreo.

### **3.2.3. Elaboración de los especímenes.**

La cantidad necesaria de mezcla para formar los especímenes de 6,35 cm de altura y 10,16 cm de diámetro, con un volumen teórico de 514 cm<sup>3</sup> será de 1100 gr.

Se debe colocar el agua de pre-envuelta y mezclarla bien hasta que se note una uniformidad de la mezcla. De igual manera se coloca la emulsión en la mezcla, se la amasa bien hasta verificar el recubrimiento de sus elementos.

Se preparan los moldes colocando en el fondo papel filtro; la mezcla se introduce en el molde con su collarín y se acomoda para repartirla sin que se clasifique; se coloca otro papel filtro en la parte superior antes de compactar (Foto 34).



**Foto 34.-** Preparación del molde y la mezcla.

A continuación se coloca el molde con la mezcla de prueba sobre el pedestal de compactación y se ajusta el dispositivo de este que sostiene el molde; con el pistón de compactación se aplican 50 golpes sobre la mezcla.

La altura de caída de la pesa es de 45,7 cm y debe mantenerse el eje del pistón en posición normal a la base del molde.

Una vez aplicado el número de golpes de compactación establecido, se libera el molde de sujeción y se quita el collarín; se invierte el molde conteniendo el espécimen, se vuelve a colocar el collarín y el dispositivo que sostiene al molde y enseguida se aplica en la otra cara del espécimen el mismo número de golpes que en la otra cara (Foto 35).



**Foto 35.-** Pedestal de compactación.

Compactados los especímenes se les remueve la base y todavía en el molde se los coloca a temperatura ambiente por 24 horas. Luego se extraen los especímenes del molde y se los coloca en el horno a una temperatura constante de 41 grados centígrados por 72 horas. Posteriormente se determina el peso seco al aire, peso saturado con superficie seca y peso sumergido así como su espesor. Luego de este proceso se puede se pueden realizar los ensayos requeridos (Foto 36).



**Foto 36.-** Especímenes secados al aire por 24 horas.

La prueba de compresión simple mide el esfuerzo que resiste la mezcla en determinadas condiciones de la prueba, y se define el porcentaje óptimo por usarse. Esta misma prueba combinada con la prueba de estabilidad por inmersión nos permite establecer la resistencia que tiene la emulsión que envuelve al material pétreo para retener su cubrimiento y cohesión bajo la acción del agua.

El ensayo de tracción indirecta, destaca por ser un método simple y representativo, que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible y obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de romper.

#### **3.2.4. Prueba de estabilidad Marshall.**

La prueba Marshall es muy conocida hace mucho tiempo para el diseño y control de mezclas asfálticas en caliente, y siendo una guía muy importante para determinar las características de estas, se pensó utilizarla empleando como ligante las emulsiones asfálticas modificando la metodología del desarrollo de la prueba original. El método Marshall se emplea para el proyecto y control de mezclas elaboradas utilizando materiales pétreos con tamaño máximo de 25 mm (1") y emulsiones asfálticas que satisfagan los requisitos específicos de cada caso.

El procedimiento consiste en elaborar especímenes cilíndricos a los cuales se les determina su peso específico, porcentaje de vacíos, estabilidad en sentido diametral y deformación (flujo), al alcanzarse la máxima resistencia. La velocidad de la carga que se le da a los especímenes es de 25 mm (2") por minuto. Estas dos últimas determinaciones se hacen bajo condiciones desfavorables de humedad y de temperatura (Foto 37).



**Foto 37.-** Prueba de estabilidad.

### **3.2.5. Prueba de pérdida de estabilidad por inmersión.**

Esta prueba se basa con los resultados obtenidos en la prueba de compresión simple. Conociendo el valor óptimo de asfalto con el que se trabajará se elabora una serie de seis especímenes con este contenido, de la misma forma que se indicó en la prueba de compresión simple.

Tres de los especímenes, después de secados durante 72 horas a 41 grados centígrados y fríos se los mete en el tanque de saturación durante 24 horas a 25 grados centígrados y el resto se los prueba en seco.

Se obtiene el porcentaje de pérdida de estabilidad por inmersión o el porcentaje de resistencia conservada de las muestras y se las compara con las normas nacionales e internacionales.

### **3.2.6. Prueba de tracción indirecta.**

Este ensayo consiste en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica, igual a la definida en el ensayo Marshall, aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la rotura.

Esta configuración de carga provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral.

La probeta es cargada a compresión según un plano diametral vertical de la misma. Se utilizan unas placas de apoyo curvo, con radio de curvatura igual al radio nominal del espécimen, de 12,7 o 25,4 mm de ancho, para que la distribución de tensiones no se altere significativamente y para que los cálculos del módulo de elasticidad y la relación de Poisson se faciliten manteniendo constante el ancho de carga, en lugar de un ancho de carga variable durante el ensayo, que ocurriría con una placa de carga plana.

Por la norma la velocidad de desplazamiento del sistema durante la carga será uniforme e igual a 51 mm/min, igual a la empleada por la prensa en el ensayo Marshall (Foto 38).



**Foto 38.-** Prueba de tracción indirecta.

Como la respuesta del material es altamente dependiente de la temperatura, la temperatura será una variable más para el ensayo. El ensayo de tracción indirecta tiene validez para materiales de comportamiento fundamentalmente elástico y lineal. La norma indica el uso de una temperatura de  $25\pm 1$  °C, pero permite el uso de otras temperaturas para analizar la susceptibilidad térmica de la mezcla en estudio y sugiere que no se utilicen temperaturas superiores al punto de reblandecimiento del ligante por ser predominante el carácter viscoso de las mezclas.

### **3.2.7. Prueba de tracción indirecta sumergida.**

Esta prueba se basa con los resultados obtenidos en la prueba de tracción indirecta explicada anteriormente.

Tres de los especímenes, después de secados durante 72 horas a 41 grados centígrados y fríos se los mete en el tanque de saturación durante 24 horas a 25 grados centígrados y el resto se los prueba en seco.

### **3.2.8. Ventajas del ensayo de tracción indirecta.**

Este ensayo presenta varias ventajas sobre el ensayo Marshall modificado. Como la respuesta del material es altamente dependiente de la temperatura, la temperatura será una variable más para el ensayo. El ensayo de tracción indirecta tiene validez para materiales de comportamiento fundamentalmente elástico y lineal. La norma indica el uso de una temperatura de  $25\pm 1$  °C, pero permite el uso de otras temperaturas para analizar la susceptibilidad térmica de la mezcla en estudio y sugiere que no se utilicen temperaturas superiores al punto de reblandecimiento del ligante por ser predominante el carácter viscoso de las mezclas.

Como se ha comentado anteriormente, la principal ventaja del método es la sencillez de su metodología. Este es un factor muy valorado por todas aquellas instituciones

que necesitan caracterizar de una forma rápida, fiable y económica los pavimentos que gestionan. El Departamento de carreteras del Estado de Texas impulsó unos estudios dirigidos por Tomas Kennedy de la Universidad de Austin en los cuales presentó las principales ventajas del ensayo:

- Es un ensayo relativamente sencillo.
- Presenta similitud con otro tipo de ensayos como el Marshall.
- El tipo de muestra y el equipo son los mismos que los utilizados para otro tipo de ensayos.
- La rotura no se ve afectada por las condiciones de la superficie de la probeta.
- La rotura se inicia en una región relativamente uniforme de tensiones de tracción.
- El coeficiente de variación de los resultados del ensayo es relativamente bajo comparado con otros métodos. En algunos estudios se habla de dispersiones inferiores al 10% en comparación con el de Marshall que pueden ser del 15-20%.
- El ensayo puede utilizarse bajo carga estática o dinámica, modificando la prensa en función del tipo de estudio que se realice.

El ensayo de tracción indirecta no sólo da información de la resistencia a tracción indirecta, sino que también nos informa sobre propiedades elásticas resilientes (módulo de elasticidad estático o dinámico en función del tipo de carga aplicada),

fisuración térmica, fisuración por fatiga, deformación permanente y puede utilizarse para evaluar el efecto de la humedad en mezclas bituminosas<sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup> Garrote Villar Elisabet, El ensayo de tracción indirecta, Universidad Politécnica de Cataluña, Pdf, Barcelona, España, 2008, pág. 7.

### 3.2.9. Cálculo teórico del porcentaje de emulsión asfáltica.



## PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR MEZCLA DE AGREGADOS PARA LA ELABORACIÓN DE BRIQUETAS

PROYECTO: Tesis de Grado SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
 CANTERA: Guayllabamba FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010  
 DESCRIPCIÓN: Mezcla de agregados para la elaboración de briquetas

### MEZCLAS DE AGREGADOS

Tamiz #	1	3.4	1.2	3.8	4	8	30	50	100	200	p #200
Tz mm.	25,4	19	12,5	9,5	4,75	2,36	0,6	0,3	0,15	0,075	p 0,075
mat. A	100,00	96,08	20,90	1,61	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
mat. B	100,00	100,00	100,00	86,81	13,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
mat. C	100,00	100,00	100,00	100,00	75,16	57,78	37,70	25,77	9,41	3,50	
mat. D	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
<b>mezcla</b>	<b>100,00</b>	<b>99,22</b>	<b>84,18</b>	<b>76,37</b>	<b>41,70</b>	<b>28,89</b>	<b>18,85</b>	<b>12,89</b>	<b>4,71</b>	<b>1,75</b>	
Ret.Ac.	0,00	0,78	15,82	23,64	58,30	71,11	81,15	87,12	95,30	98,25	1,75
Ret.Parc.	0,00	0,78	15,04	7,82	34,66	12,81	10,04	5,96	8,18	2,96	
peso	0,00	8,62	165,40	85,97	381,28	140,94	110,44	65,61	89,98	32,51	
p. acum.	0,00	8,62	174,02	259,99	641,27	782,21	892,65	958,27	1048,25	1080,75	1100,00
<b>Espec mín</b>	<b>100</b>	<b>90</b>	<b>---</b>	<b>56</b>	<b>35</b>	<b>23</b>	<b>---</b>	<b>5</b>	<b>---</b>	<b>2</b>	
<b>Espec máx</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>---</b>	<b>80</b>	<b>65</b>	<b>49</b>	<b>---</b>	<b>19</b>	<b>---</b>	<b>8</b>	

% DE MEZCLA		
A	0,20	20
B	0,30	30
C	0,50	50

<b>Espec mín</b>	<b>100</b>	<b>90</b>	<b>73</b>	<b>56</b>	<b>35</b>	<b>23</b>	<b>11</b>	<b>5</b>	<b>3,5</b>	<b>2</b>
<b>Espec máx</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>90</b>	<b>80</b>	<b>65</b>	<b>49</b>	<b>29</b>	<b>19</b>	<b>13,5</b>	<b>8</b>
<b>Tz mm.</b>	<b>25,4</b>	<b>19</b>	<b>12,5</b>	<b>9,5</b>	<b>4,75</b>	<b>2,36</b>	<b>0,6</b>	<b>0,3</b>	<b>0,15</b>	<b>0,075</b>

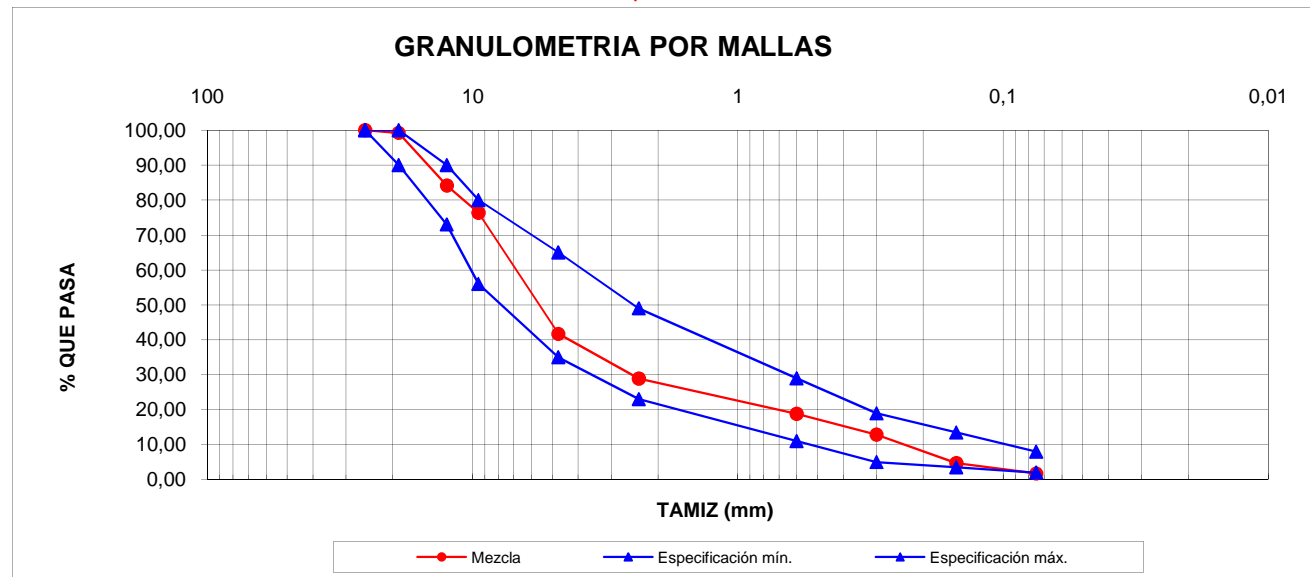
Observación: Material A = Material Grueso 3/4  
 Material B = Material Intermedio 3/8  
 Material C = Material Fino  
 Especificaciones MOP - 001 - f Tabla 405.5.1 "3/4"

**Cálculo del Porcentaje de Emulsión Asfáltica Teórica (Instituto del Asfalto)**

a(mayor #8)=	71,11	Residuo emulsión (%) =	<b>62</b>	k = c = 11 y 15%	0,15
b(#8 y #200) =	27,14			c = 6 y 10%	0,18
c(menor #200) =	1,75			c = menos 5%	0,20
				F = Varía 0 - 2	0,7

% Asfalto=  $0.035a+0.045b+kc+F$       4,76

% Emulsión= %Asf / %Residuo      **7,68**



3.2.10. Cálculo práctico de la cantidad de emulsión asfáltica.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
MEZCLAS CON 5 DIFERENTES PORCENTAJES DE EMULSIÓN ASFÁLTICA

PROYECTO: Tesis de Grado

CANTERA: Guayllabamba

DESCRIPCIÓN: Mezclas con 5 diferentes porcentajes de emulsión asfáltica

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias

FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

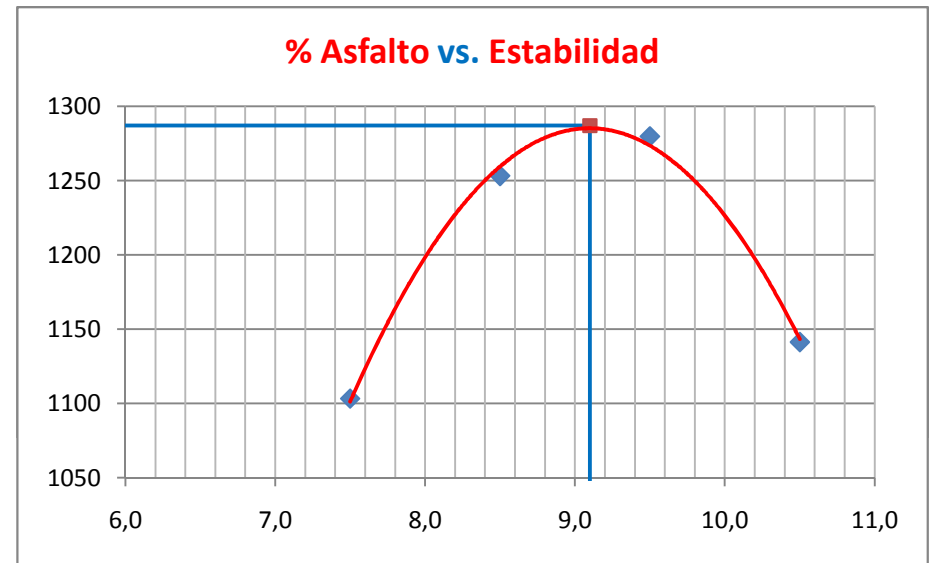
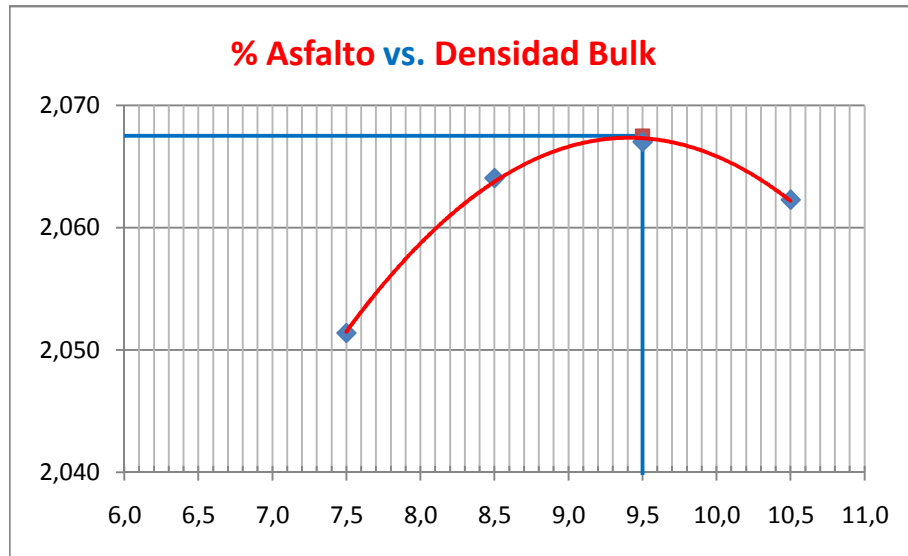
ENSAYO MARSHALL

GSb (Peso específico de agregados) = 2,405 gr/cm<sup>3</sup>

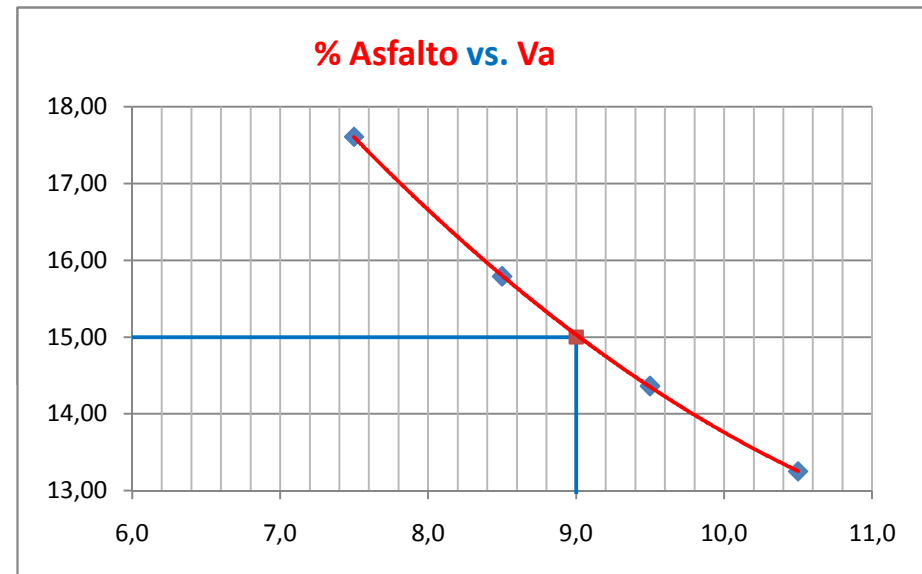
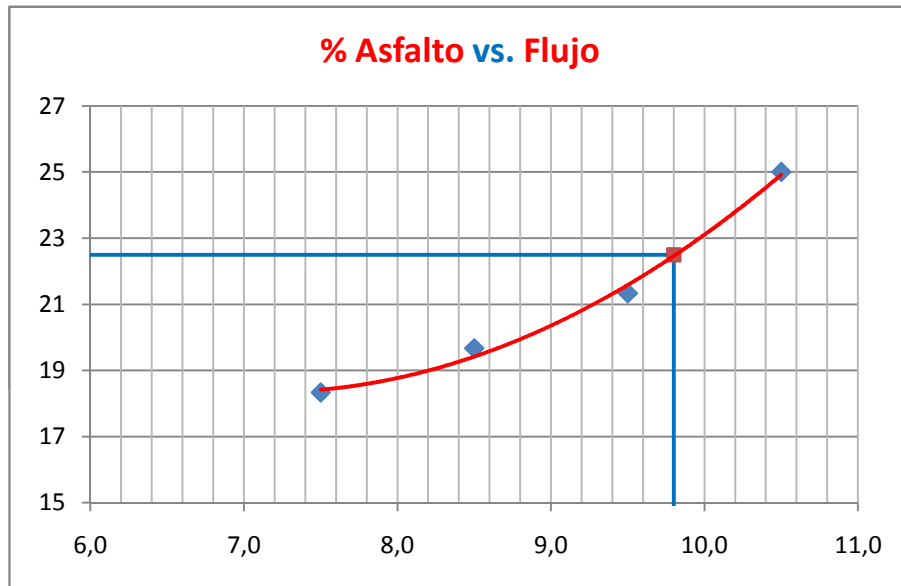
Gmm (Peso esp. Teórico máx medido) = 2,550 gr/cm<sup>3</sup>

Fecha de realización	Briqueta	Porcentaje Asfalto	Peso Aire	Peso Sat. Sup. Seca	Peso en agua	Volumen Briqueta (cm <sup>3</sup> )	D. Bulk g/cm <sup>3</sup>	Gmm (calc) g/cm <sup>3</sup>	V. a. %	V. agr. %	VAM %	VAF %	Estabilidad (lb)			Flujo 0.01"
													Medida	F Correc.	Corregida	
31/08/2010	1	6,5	1094,47	1117,39	590,87	526,52	2,079	2,530	17,82	80,8	19,18	0,07	1052	0,96	1010	18
	2	6,5	1007,71	1025,69	537,15	488,54	2,063	2,530	18,46	80,2	19,80	0,07	988	1,09	1077	16
	3	6,5	1030,13	1042,97	563,60	479,37	2,149	2,530	15,05	83,5	16,45	0,09	1032	1,14	1176	14
						PROMEDIO	2,097	2,530	17,110	81,52	18,48	0,07			1088	16
	4	7,5	966,35	979,16	516,20	462,96	2,087	2,490	16,16	80,3	19,71	0,18	1101	1,19	1310	15
	5	7,5	1107,89	1138,71	594,33	544,38	2,035	2,490	18,26	78,3	21,72	0,16	950	0,93	884	23
	6	7,5	1098,52	1129,63	588,94	540,69	2,032	2,490	18,40	78,1	21,85	0,16	1200	0,93	1116	17
						PROMEDIO	2,051	2,490	17,606	78,903	21,097	0,166			1103	18
	7	8,5	1095,41	1120,75	599,30	521,45	2,101	2,451	14,30	79,9	20,07	0,29	1430	0,96	1373	19
	8	8,5	1097,30	1118,00	586,04	531,96	2,063	2,451	15,84	78,5	21,52	0,26	1296	0,96	1244	20
	9	8,5	1126,97	1156,31	600,80	555,51	2,029	2,451	17,23	77,2	22,81	0,24	1284	0,89	1143	20
						PROMEDIO	2,064	2,451	15,790	78,532	21,468	0,265			1253	20
	10	9,5	1158,22	1180,20	618,42	561,78	2,062	2,414	14,58	77,6	22,42	0,35	1389	0,86	1195	21
	11	9,5	1118,51	1139,93	600,54	539,39	2,074	2,414	14,09	78,0	21,97	0,36	1395	0,93	1297	21
	12	9,5	1126,37	1143,53	598,25	545,28	2,066	2,414	14,42	77,7	22,27	0,35	1449	0,93	1348	22
					PROMEDIO	2,067	2,414	14,361	77,784	22,216	0,354			1280	21	
13	10,5	1114,63	1150,54	601,20	549,34	2,029	2,377	14,65	75,5	24,49	0,40	1396	0,89	1242	27	
14	10,5	1156,57	1172,20	610,31	561,89	2,058	2,377	13,42	76,6	23,40	0,43	1267	0,86	1090	24	
15	10,5	1132,89	1141,91	602,30	539,61	2,099	2,377	11,69	78,1	21,87	0,47	1174	0,93	1092	24	
					PROMEDIO	2,062	2,377	13,252	76,749	23,251	0,431			1141	25	

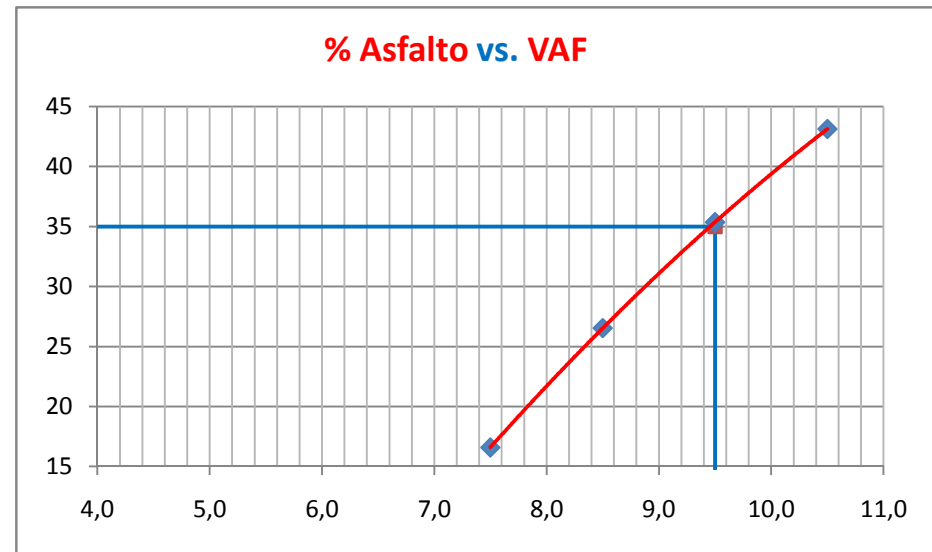
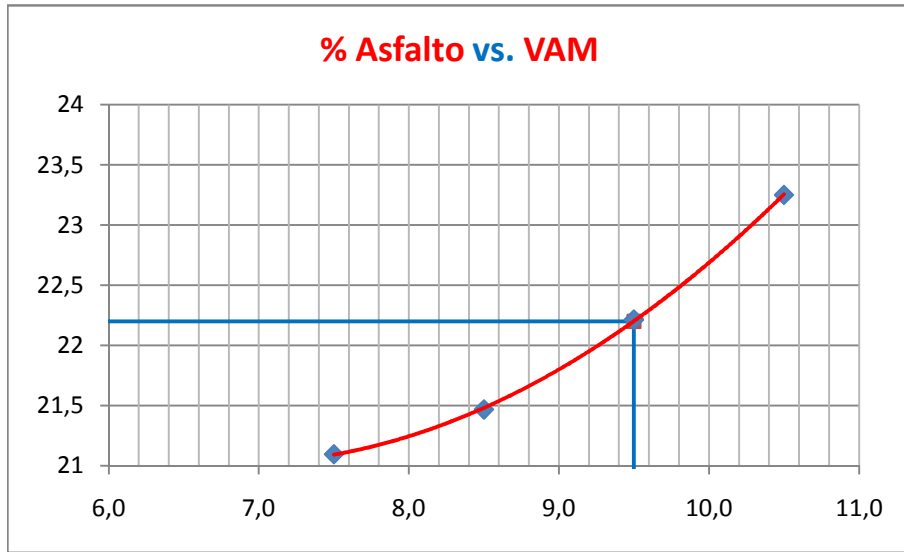
## GRÁFICOS DEL DISEÑO



## GRÁFICOS DEL DISEÑO



## GRÁFICOS DEL DISEÑO



% ASFALTO	
9,5	BULK
9,1	ESTABILIDAD
9,8	FLUJO
9	Va
9,5	VAM
9,5	VAF
<b>9,4</b>	<b>FINAL DISEÑO</b>

% de Emulsión Asfáltica a utilizarse en cada mezcla = 9.5%

3.2.11. Ensayo Marshall de la mezcla en frío con el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
ENSAYO MARSHALL DE LA MEZCLA CON EL PORCENTAJE ÓPTIMO DE EMULSIÓN

PROYECTO: Tesis de Grado

CANTERA: Guayllabamba

DESCRIPCIÓN: Ensayo Marshall de la mezcla con el porcentaje óptimo de emulsión.

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias

FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

ENSAYO MARSHALL

GSb (Peso específico de agregados) = 2,405 gr/cm<sup>3</sup>  
Gmm (Peso esp. Teórico máx medido) = 2,550 gr/cm<sup>3</sup>

Fecha de realización	Briqueta	Porcentaje Asfalto	Peso Aire	Peso Sat. Sup. Seca	Peso en agua	Volumen Briqueta (cm <sup>3</sup> )	D. Bulk g/cm <sup>3</sup>	Gmm <sup>(calc)</sup> g/cm <sup>3</sup>	V. a. %	V. agr. %	VAM %	VAF %	Estabilidad (lb)			Flujo 0.01"	
													Medida	F Correc.	Corregida		
<b>Briquetas ensayadas en seco</b>																	
31/08/2010	1	9,5	1026,10	1049,78	544,52	505,26	2,031	2,414	15,86	76,4	23,58	0,33	1923	1,04	2000	32	
	2	9,5	1072,50	1097,57	575,65	521,92	2,055	2,414	14,86	77,3	22,67	0,34	2194	1,00	2194	43	
						PROMEDIO	2,043	2,414	15,36	76,88	23,12	0,34			2097	38	
	<b>Briquetas ensayadas en agua</b>																
	3	9,5	1087,80	1124,01	584,30	539,71	2,016	2,414	16,49	75,8	24,15	0,32	1547	0,93	1439	40	
	4	9,5	1101,80	1124,81	584,54	540,27	2,039	2,414	15,51	76,7	23,26	0,33	1396	0,93	1298	47	
	5	9,5	1048,00	1071,89	552,92	518,97	2,019	2,414	16,33	76,0	24,01	0,32	1222	1,00	1222	40	
					PROMEDIO	2,025	2,414	16,112	76,194	23,806	0,323			1320	42		

### 3.2.12. Ensayos de tracción indirecta a la mezcla óptima.

#### 3.2.12.1. Resistencia conservada de las briquetas.



### PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR RESISTENCIA CONSERVADA

PROYECTO: Tesis de Grado  
CANTERA: Guayllabamba  
DESCRIPCIÓN: Resistencia conservada.

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

#### ENSAYO "TRACCION INDIRECTA"

Muestra	Espesor cm	Peso			G.Bulk g/cm <sup>3</sup>	Carga kg	Trac.Ind. kg/cm <sup>2</sup>
		Seco	S.S.S.	Agua			
1	7,18	1107,80	1133,63	585,95	2,023	1065	9,303
2	7,00	1091,20	1120,02	579,77	2,020	1135	10,170
Promedio					2,021		9,736
Muestra	Espesor cm	Peso			G.Bulk g/cm <sup>4</sup>	Carga kg	Trac.Ind. kg/cm <sup>3</sup>
		Seco	S.S.S.	Agua			
3	7,03	1062,50	1089,48	568,91	2,041	724	6,455
4	7,34	1112,00	1145,10	587,52	1,994	705	6,022
Promedio					2,018		6,238

Resistencia Conservada (%) =	64,08
------------------------------	-------

Observación: Tracción Indirecta (AASHTO T-283)  
Condición Seca Mínimo 2,5 kg/cm<sup>2</sup>  
Condición Saturada Mínimo 1,0 kg/cm<sup>2</sup>  
Temperatura de ensayo 25 °C

### 3.3. Diseño de la mezcla en frío con 5% de adición de escoria siderúrgica.

#### 3.3.1. Ensayo Marshall de la mezcla.



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
ENSAYO MARSHALL DE LA MEZCLA CON 5% DE ESCORIA**

PROYECTO: Tesis de Grado

CANTERA: Guayllabamba

DESCRIPCIÓN: Ensayo Marshall de la mezcla con 5% de escoria.

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias

FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

#### ENSAYO MARSHALL

GSb (Peso específico de agregados) = 2,405 gr/cm<sup>3</sup>  
Gmm (Peso esp. Teórico máx medido) = 2,550 gr/cm<sup>3</sup>

Fecha de realización	Briqueta	Porcentaje Asfalto	Peso Aire	Peso Sat. Sup. Seca	Peso en agua	Volumen Briqueta (cm <sup>3</sup> )	D. Bulk g/cm <sup>3</sup>	Gmm (calc) g/cm <sup>3</sup>	V. a. %	V. agr. %	VAM %	VAF %	Estabilidad (lb)			Flujo 0.01"	
													Medida	F Correc.	Corregida		
<b>Briquetas ensayadas en seco</b>																	
31/08/2010	1	9,5	1128,94	1147,78	599,80	547,98	2,060	2,414	14,64	77,5	22,47	0,35	1953	0,89	1738	35	
	2	9,5	1153,36	1178,70	616,84	561,86	2,053	2,414	14,95	77,2	22,75	0,34	1540	0,86	1324	30	
	3	9,5	1141,41	1163,14	610,55	552,59	2,066	2,414	14,42	77,7	22,27	0,35	1373	0,89	1222	40	
						PROMEDIO	2,060	2,414	14,67	77,50	22,50	0,35			1428	35	
	<b>Briquetas ensayadas en agua</b>																
	4	9,5	1128,84	1153,49	604,72	548,77	2,057	2,414	14,77	77,4	22,59	0,35	1489	0,89	1325	25	
	5	9,5	1123,31	1144,34	599,58	544,76	2,062	2,414	14,57	77,6	22,40	0,35	1356	0,93	1261	24	
	6	9,5	1115,88	1147,18	603,15	544,03	2,051	2,414	15,02	77,2	22,81	0,34	1648	0,93	1533	37	
					PROMEDIO	2,057	2,414	14,787	77,40	22,602	0,346			1373	29		

### 3.3.2. Ensayos de tracción indirecta.

#### 3.3.2.1. Resistencia conservada de las briquetas.



## PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR RESISTENCIA CONSERVADA

PROYECTO: Tesis de Grado  
CANTERA: Guaylabamba  
DESCRIPCIÓN: Resistencia conservada.

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

### ENSAYO "TRACCION INDIRECTA"

Muestra	Espesor cm	Peso			G.Bulk g/cm <sup>3</sup>	Carga kg	Trac.Ind. kg/cm <sup>2</sup>
		Seco	S.S.S.	Agua			
1	7,00	1132,96	1156,18	607,15	2,064	1121	10,033
2	7,19	1154,61	1173,11	612,73	2,060	1168	10,179
3	7,00	1142,06	1164,10	609,20	2,058	990	8,862
Promedio					2,061		9,691
Muestra	Espesor cm	Peso			G.Bulk g/cm <sup>4</sup>	Carga kg	Trac.Ind. kg/cm <sup>3</sup>
		Seco	S.S.S.	Agua			
4	6,90	1146,60	1168,57	613,42	2,065	677	6,149
5	7,14	1139,39	1160,98	606,38	2,054	967	8,485
6	7,18	1132,82	1155,66	607,58	2,067	1033	9,017
Promedio					2,062		7,884

Resistencia Conservada (%) =	81,35
------------------------------	-------

Observación: Tracción Indirecta (AASHTO T-283)  
Condición Seca Mínimo 2,5 kg/cm<sup>2</sup>  
Condición Saturada Mínimo 1,0 kg/cm<sup>2</sup>  
Temperatura de ensayo 25 °C

3.4. Diseño de la mezcla en frío con 7.5% de adición de escoria siderúrgica.

3.4.1. Ensayo Marshall de la mezcla.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
ENSAYO MARSHALL DE LA MEZCLA CON 7.5% DE ESCORIA

PROYECTO: Tesis de Grado

CANTERA: Guayllabamba

DESCRIPCIÓN: Ensayo Marshall de la mezcla con 7.5% de escoria.

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias

FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

ENSAYO MARSHALL

GSb (Peso específico de agregados) = 2,405 gr/cm<sup>3</sup>  
Gmm (Peso esp. Teórico máx medido) = 2,550 gr/cm<sup>3</sup>

Fecha de realización	Briqueta	Porcentaje Asfalto	Peso Aire	Peso Sat. Sup. Seca	Peso en agua	Volumen Briqueta (cm <sup>3</sup> )	D. Bulk g/cm <sup>3</sup>	Gmm (calc) g/cm <sup>3</sup>	V. a. %	V. agr. %	VAM %	VAF %	Estabilidad (lb)			Flujo 0.01"	
													Medida	F Correc.	Corregida		
<b>Briquetas ensayadas en seco</b>																	
31/08/2010	1	9,5	1146,90	1160,33	611,07	549,26	2,088	2,414	13,49	78,6	21,42	0,37	2852	0,89	2538	15	
	2	9,5	1144,46	1158,18	610,04	548,14	2,088	2,414	13,50	78,6	21,43	0,37	2592	0,89	2307	18	
	3	9,5	1143,02	1157,57	609,58	547,99	2,086	2,414	13,58	78,5	21,51	0,37	2415	0,89	2149	22	
						PROMEDIO	2,087	2,414	13,52	78,55	21,45	0,37			2332	18	
	<b>Briquetas ensayadas en agua</b>																
	4	9,5	1148,76	1163,53	614,44	549,09	2,092	2,414	13,32	78,7	21,27	0,37	2554	0,89	2273	32	
	5	9,5	1151,13	1166,00	632,31	533,69	2,157	2,414	10,64	81,2	18,83	0,44	2424	0,96	2327	23	
	6	9,5	1157,22	1171,89	624,35	547,54	2,113	2,414	12,44	79,5	20,47	0,39	2462	0,89	2191	26	
					PROMEDIO	2,121	2,414	12,131	79,810	20,190	0,400			2264	27		

### 3.4.2. Ensayos de tracción indirecta.

#### 3.4.2.1. Resistencia conservada de las briquetas.



### PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR RESISTENCIA CONSERVADA

PROYECTO: Tesis de Grado  
CANTERA: Guayllabamba  
DESCRIPCIÓN: Resistencia conservada.

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

#### ENSAYO "TRACCION INDIRECTA"

Muestra	Espesor cm	Peso			G.Bulk g/cm3	Carga kg	Trac.Ind. kg/cm2
		Seco	S.S.S.	Agua			
1	6,99	1158,14	1172,50	615,38	2,079	1794	16,091
2	7,01	1133,22	1144,74	601,00	2,084	1986	17,741
3	6,82	1135,58	1147,71	606,76	2,099	1897	17,427
Promedio					2,087		17,087

Muestra	Espesor cm	Peso			G.Bulk g/cm4	Carga kg	Trac.Ind. kg/cm3
		Seco	S.S.S.	Agua			
4	6,92	1137,00	1154,66	637,83	2,200	1649	14,933
5	6,97	1153,46	1166,61	649,37	2,230	1747	15,702
6	6,96	1151,32	1164,78	634,43	2,171	1719	15,474
Promedio					2,200		15,370

Resistencia Conservada (%) =	89,95
------------------------------	-------

Observación: Tracción Indirecta (AASHTO T-283)  
Condición Seca Mínimo 2,5 kg/cm<sup>2</sup>  
Condición Saturada Mínimo 1,0 kg/cm<sup>2</sup>  
Temperatura de ensayo 25 °C

3.5. Diseño de la mezcla en frío con 10% de adición de escoria siderúrgica.

3.5.1. Ensayo Marshall de la mezcla.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
ENSAYO MARSHALL DE LA MEZCLA CON 10% DE ESCORIA

PROYECTO: Tesis de Grado

CANTERA: Guayllabamba

DESCRIPCIÓN: Ensayo Marshall de la mezcla con 10% de escoria.

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias

FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

ENSAYO MARSHALL

GSb (Peso específico de agregados) = 2,405 gr/cm<sup>3</sup>

Gmm (Peso esp. Teórico máx medido) = 2,550 gr/cm<sup>3</sup>

Fecha de realización	Briqueta	Porcentaje Asfalto	Peso Aire	Peso Sat. Sup. Seca	Peso en agua	Volumen Briqueta (cm <sup>3</sup> )	D. Bulk g/cm <sup>3</sup>	Gmm (calc) g/cm <sup>3</sup>	V. a. %	V. agr. %	VAM %	VAF %	Estabilidad (lb)			Flujo 0.01"	
													Medida	F Correc.	Corregida		
<b>Briquetas ensayadas en seco</b>																	
31/08/2010	1	9,5	1143,87	1161,59	614,01	547,58	2,089	2,414	13,45	78,6	21,39	0,37	2431	0,89	2164	24	
	2	9,5	1143,46	1158,42	617,12	541,30	2,112	2,414	12,48	79,5	20,51	0,39	2689	0,93	2501	14	
	3	9,5	1160,84	1173,48	624,37	549,11	2,114	2,414	12,41	79,6	20,45	0,39	2732	0,89	2431	18	
						PROMEDIO	2,105	2,414	12,78	79,22	20,78	0,39			2365	19	
	<b>Briquetas ensayadas en agua</b>																
	4	9,5	1149,49	1162,28	620,93	541,35	2,123	2,414	12,03	79,9	20,09	0,40	2324	0,93	2161	21	
	5	9,5	1143,28	1158,21	619,00	539,21	2,120	2,414	12,15	79,8	20,21	0,40	2419	0,93	2250	30	
	6	9,5	1128,22	1145,49	608,92	536,57	2,103	2,414	12,88	79,1	20,87	0,38	2607	0,93	2425	37	
					PROMEDIO	2,115	2,414	12,355	79,607	20,393	0,394			2279	29		

### 3.5.2. Ensayos de tracción indirecta.

#### 3.5.2.1. Resistencia conservada de las briquetas.



## PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR RESISTENCIA CONSERVADA

PROYECTO: Tesis de Grado  
 CANTERA: Guaylabamba  
 DESCRIPCIÓN: Resistencia conservada.

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
 FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

### ENSAYO "TRACCION INDIRECTA"

Muestra	Espesor cm	Peso			G.Bulk g/cm3	Carga kg	Trac.Ind. kg/cm2
		Seco	S.S.S.	Agua			
1	6,86	1125,99	1141,45	606,55	2,105	1972	18,003
2	6,83	1130,07	1147,77	607,33	2,091	1682	15,441
3	6,83	1143,79	1157,21	618,85	2,125	2074	19,042
Promedio					2,107		17,495
Muestra	Espesor cm	Peso			G.Bulk g/cm4	Carga kg	Trac.Ind. kg/cm3
		Seco	S.S.S.	Agua			
4	6,82	1117,78	1135,97	600,14	2,086	1472	13,519
5	6,84	1138,44	1152,82	615,42	2,118	1719	15,752
6	7,01	1151,67	1163,96	617,22	2,106	1691	15,117
Promedio					2,104		14,796

Resistencia Conservada (%) =	84,57
------------------------------	-------

Observación: Tracción Indirecta (AASHTO T-283)  
 Condición Seca Mínimo 2,5 kg/cm2  
 Condición Saturada Mínimo 1,0 kg/cm2  
 Temperatura de ensayo 25 °C

3.6. Diseño de la mezcla en frío con 12.5% de adición de escoria siderúrgica.

3.6.1. Ensayo Marshall de la mezcla.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
ENSAYO MARSHALL DE LA MEZCLA CON 12.5% DE ESCORIA

PROYECTO: Tesis de Grado

CANTERA: Guayllabamba

DESCRIPCIÓN: Ensayo Marshall de la mezcla con 12.5% de escoria.

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias

FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

ENSAYO MARSHALL

GSb (Peso específico de agregados) = 2,405 gr/cm<sup>3</sup>

Gmm (Peso esp. Teórico máx medido) = 2,550 gr/cm<sup>3</sup>

Fecha de realización	Briqueta	Porcentaje Asfalto	Peso Aire	Peso Sat. Sup. Seca	Peso en agua	Volumen Briqueta (cm <sup>3</sup> )	D. Bulk g/cm <sup>3</sup>	Gmm (calc) g/cm <sup>3</sup>	V. a. %	V. agr. %	VAM %	VAF %	Estabilidad (lb)			Flujo 0.01"	
													Medida	F Correc.	Corregida		
<b>Briquetas ensayadas en seco</b>																	
31/08/2010	1	9,5	1136,25	1145,71	618,00	527,71	2,153	2,414	10,79	81,0	18,97	0,43	2945	0,96	2827	17	
	2	9,5	1141,61	1152,98	619,82	533,16	2,141	2,414	11,29	80,6	19,42	0,42	2571	0,96	2468	16	
	3	9,5	1140,49	1153,56	616,28	537,28	2,123	2,414	12,05	79,9	20,12	0,40	2422	0,93	2252	19	
						PROMEDIO	2,139	2,414	11,38	80,49	19,51	0,42			2516	17	
	<b>Briquetas ensayadas en agua</b>																
	4	9,5	1146,17	1163,77	624,13	539,64	2,124	2,414	12,00	79,9	20,07	0,40	2184	0,93	2031	22	
	5	9,5	1150,56	1160,41	626,32	534,09	2,154	2,414	10,75	81,1	18,93	0,43	2364	0,96	2269	21	
	6	9,5	1134,99	1149,74	621,38	528,36	2,148	2,414	11,00	80,8	19,16	0,43	2274	0,96	2183	20	
					PROMEDIO	2,142	2,414	11,250	80,611	19,389	0,420			2161	21		

### 3.6.2. Ensayos de tracción indirecta.

#### 3.6.2.1. Resistencia conservada de las briquetas.



## PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR RESISTENCIA CONSERVADA

PROYECTO: Tesis de Grado  
 CANTERA: Guaylabamba  
 DESCRIPCIÓN: Resistencia conservada.

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
 FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

### ENSAYO "TRACCION INDIRECTA"

Muestra	Espesor cm	Peso			G.Bulk g/cm3	Carga kg	Trac.Ind. kg/cm2
		Seco	S.S.S.	Agua			
1	6,70	1154,93	1168,10	625,79	2,130	1986	18,559
2	6,65	1131,19	1147,55	618,53	2,138	2186	20,608
3	6,76	1138,74	1152,28	619,32	2,137	2102	19,485
Promedio					2,135		19,551
Muestra	Espesor cm	Peso			G.Bulk g/cm4	Carga kg	Trac.Ind. kg/cm3
		Seco	S.S.S.	Agua			
4	6,75	1143,15	1158,25	624,12	2,140	1724	16,008
5	6,76	1142,24	1156,48	622,94	2,141	1490	13,819
6	6,81	1158,06	1170,13	625,31	2,126	1687	15,521
Promedio					2,136		15,116

Resistencia Conservada (%) =	77,32
------------------------------	-------

Observación: Tracción Indirecta (AASHTO T-283)  
 Condición Seca Mínimo 2,5 kg/cm2  
 Condición Saturada Mínimo 1,0 kg/cm2  
 Temperatura de ensayo 25 °C

3.7. Diseño de la mezcla en frío con 15% de adición de escoria siderúrgica.

3.7.1. Ensayo Marshall de la mezcla.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
ENSAYO MARSHALL DE LA MEZCLA CON 15% DE ESCORIA

PROYECTO: Tesis de Grado

CANTERA: Guayllabamba

DESCRIPCIÓN: Ensayo Marshall de la mezcla con 15% de escoria.

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias

FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

ENSAYO MARSHALL

GSb (Peso específico de agregados) = 2,405 gr/cm<sup>3</sup>  
Gmm (Peso esp. Teórico máx medido) = 2,550 gr/cm<sup>3</sup>

Fecha de realización	Briqueta	Porcentaje Asfalto	Peso Aire	Peso Sat. Sup. Seca	Peso en agua	Volumen Briqueta (cm <sup>3</sup> )	D. Bulk g/cm <sup>3</sup>	Gmm (calc) g/cm <sup>3</sup>	V. a. %	V. agr. %	VAM %	VAF %	Estabilidad (lb)			Flujo 0.01"	
													Medida	F Correc.	Corregida		
<b>Briquetas ensayadas en seco</b>																	
31/08/2010	1	9,5	1141,60	1152,32	623,30	529,02	2,158	2,414	10,59	81,2	18,79	0,44	2533	0,96	2432	17	
	2	9,5	1149,94	1158,67	628,45	530,22	2,169	2,414	10,14	81,6	18,39	0,45	2356	0,96	2262	14	
	3	9,5	1147,05	1160,89	629,30	531,59	2,158	2,414	10,60	81,2	18,80	0,44	2410	0,96	2314	18	
						PROMEDIO	2,162	2,414	10,45	81,34	18,66	0,44			2336	16	
	<b>Briquetas ensayadas en agua</b>																
	4	9,5	1128,19	1145,68	625,25	520,43	2,168	2,414	10,19	81,6	18,42	0,45	1987	1,00	1987	24	
	5	9,5	1151,80	1167,80	633,34	534,46	2,155	2,414	10,71	81,1	18,90	0,43	2174	0,96	2087	23	
6	9,5	1137,28	1148,03	619,95	528,08	2,154	2,414	10,77	81,0	18,96	0,43	2290	0,96	2198	19		
					PROMEDIO	2,159	2,414	10,557	81,240	18,760	0,437			2091	22		

### 3.7.2. Ensayos de tracción indirecta.

#### 3.7.2.1. Resistencia conservada de las briquetas.



## PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR RESISTENCIA CONSERVADA

PROYECTO: Tesis de Grado  
 CANTERA: Guaylabamba  
 DESCRIPCIÓN: Resistencia conservada.

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
 FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

### ENSAYO "TRACCION INDIRECTA"

Muestra	Espesor cm	Peso			G.Bulk g/cm3	Carga kg	Trac.Ind. kg/cm2
		Seco	S.S.S.	Agua			
1	6,61	1141,26	1153,88	623,15	2,150	1659	15,722
2	6,65	1143,82	1153,00	622,63	2,157	1771	16,684
3	6,67	1135,27	1148,33	620,03	2,149	1873	17,600
<b>Promedio</b>					<b>2,152</b>		<b>16,669</b>
Muestra	Espesor cm	Peso			G.Bulk g/cm4	Carga kg	Trac.Ind. kg/cm3
		Seco	S.S.S.	Agua			
4	6,64	1142,09	1152,35	623,61	2,160	1444	13,623
5	6,70	1139,47	1155,11	626,04	2,154	1402	13,106
6	6,57	1149,76	1163,26	629,08	2,152	1360	12,966
<b>Promedio</b>					<b>2,155</b>		<b>13,232</b>

Resistencia Conservada (%) =	<b>79,38</b>
------------------------------	--------------

**Observación:** Tracción Indirecta (AASHTO T-283)  
 Condición Seca Mínimo 2,5 kg/cm2  
 Condición Saturada Mínimo 1,0 kg/cm2  
 Temperatura de ensayo 25 °C

### 3.8. Cuadro comparativo de resultados de las mezclas.



## PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR CONTROL DE CALIDAD DE LA MEZCLA DE EMULSIÓN ASFÁLTICA Y ESCORIA

PROYECTO: Tesis de Grado  
 CANTERA: Guayllabamba  
 DESCRIPCIÓN: Control de calidad de la mezcla de emulsión asfáltica y escoria.

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
 FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

	Resultados obtenidos en laboratorio						Normas MOP-001-F-2002 (Tráfico medio)	Diseño Marshall Modificado, Método Illinois	Asphalt Institute
	0% escoria	5% escoria	7.5% escoria	10% escoria	12.5% escoria	15% escoria			
Estabilidad, (lb) al aire	2097	1428	2332	2365	2516	2336	1200	min 750	min 2224
Estabilidad, (lb) saturado	1320	1373	2264	2279	2161	2091	1200	min 750	-----
Estabilidad perdida, %	37	4	3	4	14	10	-----	máx 50%	máx 50%
Resistencia conservada, %	64	81	90	85	77	79	min 50%	min 50%	min 50%
Cubrimiento del agregado, %	100	100	100	100	100	100	-----	min 95%	min 50%
Flujo, al aire	38	35	18	19	17	16	min 8 máx 18	min 8 máx 18	-----
Flujo, saturado	42	29	27	29	21	22	min 8 máx 18	min 8 máx 18	-----
Vacios totales, % al aire	15	15	14	13	11	10	-----	min 3 máx 18	-----
Vacios totales, % saturado	16	15	12	12	11	11	-----	min 3 máx 18	-----
% Vacíos con aire, % al aire	3	3	4	4	4	4	min 3 máx 5	min 3 máx 5	-----
% Vacíos con aire, % saturado	3	3	4	4	4	4	min 3 máx 5	min 3 máx 5	-----

Tabla 5.- Tabla de control de calidad de las mezclas con emulsión asfáltica y escoria

## **CAPITULO IV**

### **EVALUACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA.**

#### **4.1. Introducción.**

Luego de haber realizado todos los diferentes ensayos a las mezclas elaboradas con los diferentes porcentajes de escorias y haber obtenido los resultados de las mismas se ha llegado a determinar el porcentaje óptimo de escoria para mezclas asfálticas en frío el cual ha elevado las propiedades mecánicas de la mezcla incrementando su estabilidad tanto al aire como saturada sus vacíos. Con este porcentaje óptimo de escoria (11.7%) se procederá a realizar 12 briquetas más con el fin de confirmar las propiedades mecánicas de la mezcla son las mejores y han aumentado con respecto a las mezclas testigo sin adición de escoria siderúrgica.

En este capítulo se procederán a realizar los ensayos de Marshall modificado, tracción indirecta y ensayo de peladura por el método del hervido.

Finalmente se procederá a realizar un cuadro de análisis comparativo con normas tanto nacionales como internacionales para determinar la validez teórica de la mezcla óptima.

#### **4.2. Ensayo de Marshall Modificado.**

El método Marshall se emplea para el proyecto y control de mezclas elaboradas utilizando materiales pétreos con tamaño máximo de 25 mm (1”) y emulsiones asfálticas que satisfagan los requisitos específicos de cada caso.

El procedimiento consiste en elaborar especímenes cilíndricos a los cuales se les determina su peso específico, porcentaje de vacíos, estabilidad en sentido diametral y deformación (flujo), al alcanzarse la máxima resistencia. La velocidad de la carga que se le da a los especímenes es de 25 mm (2") por minuto.

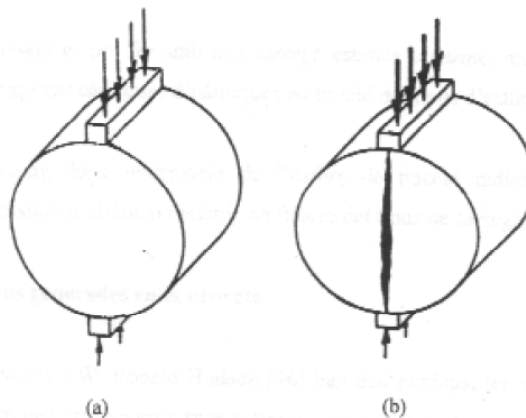
El ensayo se lo realizará de la misma manera que fue explicada en el capítulo anterior.

#### **4.3. Ensayo de tracción indirecta.**

El ensayo de tracción indirecta, destaca por ser un método simple y representativo, que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible y obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de romper.

En este ensayo se somete a compresión diametral una probeta cilíndrica, igual a la definida en el ensayo Marshall, aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la rotura.

Esta configuración de carga provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral (Figura 39).



**Figura 39.-** Probeta sometida al ensayo de tracción indirecta.

El procedimiento de este ensayo es el mismo especificado en el capítulo anterior así como sus cálculos, interpretación y resultados.

#### **4.4. Ensayo de peladura por el Método del Hervido.**

La adherencia del asfalto hacia los agregados es un factor que determina la vida de las mezclas asfálticas, sin embargo la evaluación visual de adherencia no permite una comparación objetiva de los asfaltos con respecto a la adherencia.

Un método cualitativo para la determinación de la adherencia de los componentes de la mezcla asfáltica se basa en la habilidad del asfalto de ser retenido en la superficie de los agregados luego de que la mezcla asfáltica sea hervida en agua. La adherencia es evaluada de acuerdo a al asfalto residual que se encuentra en el agregado luego de que este haya sido hervido.

Esta práctica es útil como indicador de la susceptibilidad relativa del agregado bituminoso-revestido al agua, pero no se debe utilizar como medida del funcionamiento del campo porque tal correlación no se ha establecido. Si existe pérdida de adherencia debido al agua, se debe realizar otras pruebas por otros procedimientos para evaluar más lejos la mezcla.

Esta práctica cubre un procedimiento rápido para visualmente determinar la pérdida de adherencia en las mezclas bituminosas revestidas no compactadas debido a la acción del agua hirviendo.

El ensayo consiste en despedazar la briqueta ensayada en trozos pequeños que estén totalmente cubiertos de asfalto. Luego se pone a calentar agua hasta que esta hierva y se coloca el material dentro del agua por un lapso de 10 minutos (Foto 40).



**Foto 40.-** Ensayo de peladura por el Método del Hervido.

Transcurrido dicho tiempo se procede a sacar el material del agua y dejarlo secar sobre una manta con el fin de poder visualizar la adherencia que tiene el asfalto con el agregado (Foto 41).



**Foto 41.-** Agregado con 100% de adherencia del asfalto.

Si el recubrimiento de asfalto esta desprendido a no muy bien pegado se entiende que la adherencia del agregado es mala, por el contrario si no existe desprendimiento de asfalto en el agregado y está muy bien pegado se dice tienen una gran adherencia el asfalto con el agregado.

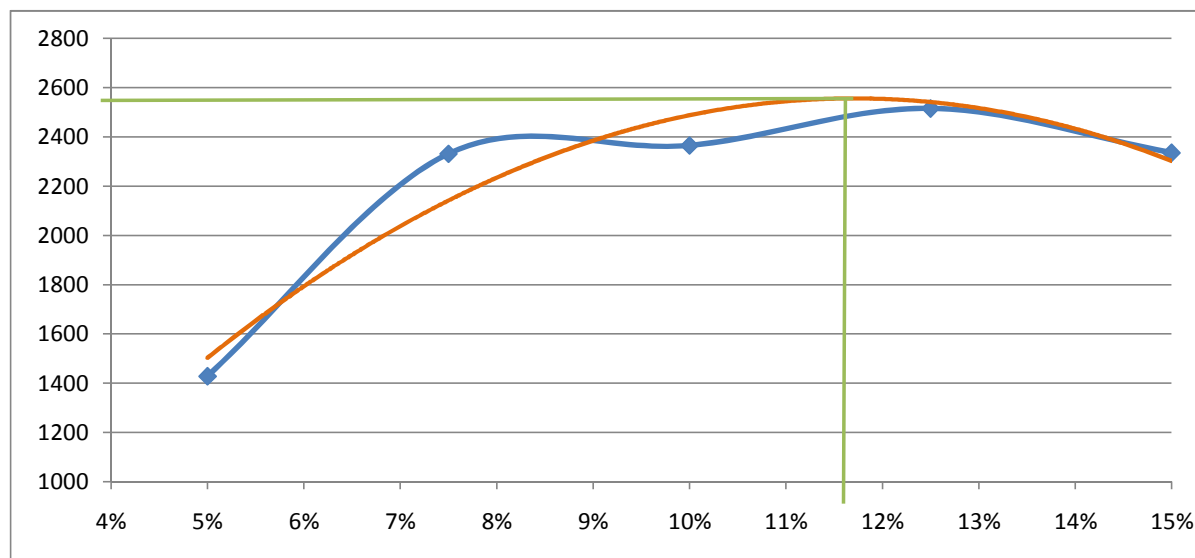


PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
GRAFICO PARA DETERMINAR EL PORCENTAJE ÓPTIMO DE ESCORIA

PROYECTO: Tesis de Grado  
CANTERA: Guayllabamba  
DESCRIPCIÓN: Grafico para determinar el porcentaje óptimo de escoria

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

% de escoria	Estabilidad al aire (lb)
5%	1428
7,50%	2332
10%	2365
12,50%	2516
15%	2336



% óptimo de escoria = 11,70%

4.6. Diseño de la mezcla en frío con 15% de adición de escoria siderúrgica.

4.6.1. Ensayo Marshall de la mezcla.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
ENSAYO MARSHALL DE LA MEZCLA CON 11.7% DE ESCORIA

PROYECTO: Tesis de Grado

CANTERA: Guayllabamba

DESCRIPCIÓN: Ensayo Marshall de la mezcla con 11.7% de escoria.

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias

FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

ENSAYO MARSHALL

GSb (Peso específico de agregados) = 2,405 gr/cm<sup>3</sup>  
Gmm (Peso esp. Teórico máx medido) = 2,550 gr/cm<sup>3</sup>

Fecha de realización	Briqueta	Porcentaje Asfalto	Peso Aire	Peso Sat. Sup. Seca	Peso en agua	Volumen Briqueta (cm <sup>3</sup> )	D. Bulk g/cm <sup>3</sup>	Gmm (calc) g/cm <sup>3</sup>	V. a. %	V. agr. %	VAM %	VAF %	Estabilidad (lb)			Flujo 0.01"	
													Medida	F Correc.	Corregida		
<b>Briquetas ensayadas en seco</b>																	
31/08/2010	1	9,5	1145,11	1155,91	621,45	534,46	2,143	2,414	11,23	80,6	19,37	0,42	2780	0,96	2669	15	
	2	9,5	1158,87	1167,38	622,87	544,51	2,128	2,414	11,82	80,1	19,91	0,41	2941	0,93	2735	15	
	3	9,5	1144,48	1158,70	623,76	534,94	2,139	2,414	11,36	80,5	19,49	0,42	2917	0,96	2800	14	
						PROMEDIO	2,137	2,414	11,47	80,41	19,59	0,41			2735	15	
	<b>Briquetas ensayadas en agua</b>																
	4	9,5	1144,65	1158,39	624,76	533,63	2,145	2,414	11,13	80,7	19,28	0,42	2831	0,96	2718	17	
	5	9,5	1160,97	1172,23	635,21	537,02	2,162	2,414	10,43	81,4	18,65	0,44	2780	0,93	2585	18	
6	9,5	1156,71	1170,30	630,00	540,30	2,141	2,414	11,30	80,6	19,44	0,42	2863	0,93	2663	18		
					PROMEDIO	2,149	2,414	10,954	80,879	19,121	0,427			2655	18		

#### 4.6.2. Ensayos de tracción indirecta.

##### 4.6.2.1. Resistencia conservada de las briquetas.



### PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR RESISTENCIA CONSERVADA

PROYECTO: Tesis de Grado  
 CANTERA: Guaylabamba  
 DESCRIPCIÓN: Resistencia conservada.

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
 FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

#### ENSAYO "TRACCION INDIRECTA"

Muestra	Espesor cm	Peso			G.Bulk g/cm3	Carga kg	Trac.Ind. kg/cm2
		Seco	S.S.S.	Agua			
1	6,81	1160,88	1168,90	620,40	2,116	2579	23,729
2	6,82	1154,93	1165,02	621,75	2,126	2359	21,693
3	6,96	1161,66	1174,30	622,35	2,105	2205	19,853
Promedio					2,116		21,758
Muestra	Espesor cm	Peso			G.Bulk g/cm4	Carga kg	Trac.Ind. kg/cm3
		Seco	S.S.S.	Agua			
4	6,97	1157,61	1169,78	620,51	2,108	2182	19,628
5	6,90	1122,92	1139,79	605,67	2,102	2168	19,686
6	6,85	1151,62	1159,39	616,33	2,121	2196	20,086
Promedio					2,110		19,800

Resistencia Conservada (%) =	91,00
------------------------------	-------

Observación: Tracción Indirecta (AASHTO T-283)  
 Condición Seca Mínimo 2,5 kg/cm2  
 Condición Saturada Mínimo 1,0 kg/cm2  
 Temperatura de ensayo 25 °C

#### 4.7. Ensayo de peladura por el Método del Hervido.



### PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR ENSAYO DE PELADURA POR EL MÉTODO DEL HERVIDO

PROYECTO: Tesis de Grado  
CANTERA: Guayllabamba  
DESCRIPCIÓN: Ensayo de peladura por el Método del Hervido

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

El porcentaje de cobertura es superior al 95%

Se determina que no hubo pérdida de adhesión por efecto del agua



## **CAPÍTULO V**

### **RESULTADOS DE LA MEZCLA ASFALTICA EN FRIO CON LA UTILIZACION DE ESCORIAS SIDERURGICAS**

#### **5.1 Análisis comparativo entre mezclas en frio y mezclas en frio con la utilización de escorias siderúrgicas.**

Al realizar y comparar los resultados obtenidos entre la mezcla óptima sin escorias siderúrgicas y la óptima con escorias siderúrgicas en un porcentaje de 11.7% se ha podido observar mediante el cuadro comparativo adjunto a continuación los siguientes resultados que serán analizados en el capítulo VI.

5.1.1. Cuadro comparativo de resultados de las mezclas.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
CONTROL DE CALIDAD DE LA MEZCLA DE EMULSIÓN ASFÁLTICA Y ESCORIA ÓPTIMO

PROYECTO: Tesis de Grado  
CANTERA: Guayllabamba  
DESCRIPCIÓN: Control de calidad de la mezcla de emulsión asfáltica y escoria óptimo.

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

	Resultados obtenidos en laboratorio		Normas MOP-001-F-2002 (Tráfico medio)	Diseño Marshall Modificado, Método Illinois	Asphalt Institute
	0% escoria	11.7% escoria			
Estabilidad, (lb) al aire	2097	2735	1200	min 750	min 2224
Estabilidad, (lb) saturado	1320	2655	1200	min 750	-----
Estabilidad perdida, %	37	3	-----	máx 50%	máx 50%
Resistencia conservada, %	64	91	min 50%	min 50%	min 50%
Cubrimiento del agregado, %	100	100	-----	min 95%	min 50%
Flujo, al aire	38	15	min 8 máx 18	min 8 máx 18	-----
Flujo, saturado	42	18	min 8 máx 18	min 8 máx 18	-----
Vacios totales, % al aire	15	11	-----	min 3 máx 18	-----
Vacios totales, % saturado	16	11	-----	min 3 máx 18	-----
% Vacios con aire, % al aire	3	4	min 3 máx 5	min 3 máx 5	-----
% Vacios con aire, % saturado	3	4	min 3 máx 5	min 3 máx 5	-----

Tabla 6.- Tabla de control de calidad de las mezclas con emulsión asfáltica y escoria óptima

## **5.2. Análisis de costos comparativos entre mezclas en frío y mezclas en frío con la utilización de escorias siderúrgicas.**

Una parte fundamental dentro de la implementación y auge de nuevas tecnologías constructivas depende en gran medida de la relación costo-beneficio que este nuevo producto pueda tener en su aplicación.

Debido a esto hemos realizado un análisis de costos comparativos entre una vía realizada con una mezcla asfáltica en frío con el porcentaje óptimo de emulsión sin la utilización de escoria siderúrgica y una vía construida con una mezcla asfáltica con el porcentaje óptimo de emulsión y escoria siderúrgica encontrados anteriormente en el laboratorio.

Para este ejemplo vamos a suponer un tramo de vía a construirse de 100 m de longitud con una capa de rodadura de 7.50 cm y de dos carriles cuyo ancho va a ser de 6.10 m. No se incluye mano de obra ni equipos en el análisis de costos ya que sería constante para ambos casos. Se considera que la vía a construirse está dentro de un radio de 10 a 15 km de la planta de donde proviene la escoria siderúrgica.

Los precios consultados han sido proporcionados y actualizados hasta julio del 2010 por:

- Material pétreo: Mina de Guayllabamba.
- Agua: EMMAP-Q.
- Emulsión asfáltica: Chova del Ecuador.
- Escoria siderúrgica: Acería del Ecuador S.A.

A continuación presentamos el cuadro de costos comparativo.



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
CUADRO COMPARATIVO DE COSTOS**

**PROYECTO:** Tesis de Grado  
**CANTERA:** Guayllabamba  
**DESCRIPCIÓN:** Cuadro comparativo de costos.

**SOLICITADO POR:** Cajas-Iglesias  
**FECHA DE EMISIÓN:** 31/08/2010

Mezcla sin adición de escoria siderúrgica				
Item	Descripción	Cantidad (A)	Precio unitario (B)	Costo parcial (A*B)
Mezcla de agregados	Incluye transporte	45,75 m <sup>3</sup>	10 USD/m <sup>3</sup>	457,50
Agua de preenvuelta	4 % del peso de los agregados	1,83 m <sup>3</sup>	0,50 USD/m <sup>3</sup>	0,92
Emulsión asfáltica	9.5% del peso de los agregados	4,35 m <sup>3</sup>	380 USD/m <sup>3</sup>	1651,58
<b>Costo total en USD =</b>				<b>2109,99</b>

Mezcla con adición del 11.7% de escoria siderúrgica				
Item	Descripción	Cantidad (A)	Precio unitario (B)	Costo parcial (A*B)
Mezcla de agregados	Incluye transporte	45,75 m <sup>3</sup>	10 USD/m <sup>3</sup>	457,50
Agua de preenvuelta	4 % del peso de los agregados	1,83 m <sup>3</sup>	0,50 USD/m <sup>3</sup>	0,92
Emulsión asfáltica	9.5% del peso de los agregados	4,35 m <sup>3</sup>	380 USD/m <sup>3</sup>	1651,58
Escoria siderúrgica	11.7% de peso de los agregados. Incluye transporte	5,35 m <sup>3</sup>	8 USD/m <sup>3</sup>	42,82
<b>Costo total en USD =</b>				<b>2152,81</b>

**Incremento en porcentaje de precio de la via= 1,99**

**Nota:** Se considerará una capa de rodadura de 20 cm de espesor en una via de 6.10 m de ancho y una longitud de via de 100 m de 2 vías y se considerará que el transporte de la escoria será de máximo de 10 a 15 km.

Tabla 7.- Cuadro comparativo de costos

## **CAPÍTULO VI**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

Una vez realizadas las diferentes mezclas asfálticas en frío con y sin adición de escorias siderúrgicas se ha podido establecer diferentes conclusiones y recomendaciones acordes a los diferentes ensayos realizados para este estudio. Para estas conclusiones y recomendaciones se evaluarán los ensayos y los resultados más representativos de este estudio. Se referenciará con normas tanto nacionales como internacionales.

#### **6.1. Conclusiones.**

- Luego de haber realizado los diferentes ensayos para el control de calidad de los materiales pétreos tanto fino como grueso se puede concluir que la mina de Guayllabamba cumple con todas las especificaciones técnicas tanto bajo normas ecuatorianas (MOP-001-F-2002) como normas internacionales (ASTM y Asphalt Institute). Estos resultados se pueden observar en el CAPÍTULO II, tabla 2 y tabla 3 en donde se muestran los ensayos de las propiedades del agregado fino y grueso como granulometría, gravedad específica, equivalente de arena, contenido orgánico, durabilidad a la acción de los sulfatos y abrasión.
- La emulsión asfáltica utilizada en las diferentes mezclas realizadas cumple con todas las especificaciones técnicas tanto bajo normas ecuatorianas (MOP-001-F-2002) como normas internacionales (ASTM y Asphalt Institute). Las

propiedades analizadas de esta emulsión fueron: carga de la partícula, gravedad específica, porcentaje retenido en la malla #20, viscosidad Saybolt-Furol, estabilidad a las 24 horas, residuo por evaporación; así también como ensayos del residuo tales como penetración y ductilidad. Los resultados de estos ensayos se podrán observar en el CAPÍTULO II, Tabla 4.

- Se determinó que para realizar mezclas asfálticas en frío con los tres tipos de material extraídos de la mina de Guayllabamba se debe combinarlos en diferentes porcentajes para que cumplan con normas MOP-001-F-2002 siendo esos porcentajes los siguientes: 20% del material A (Grueso 3/4”), 30% del material B (Intermedio 3/8”) y 50% de material C (Finos o filler).
- Para determinar el porcentaje óptimo de emulsión a utilizarse en la mezcla asfáltica se realizó 15 briquetas, 3 por cada porcentaje de emulsión utilizada y se determinó mediante 6 parámetros (Gravedad Bulk, Estabilidad al aire, Flujo al aire y 3 parámetros de volumen de vacíos) que el porcentaje óptimo de la mezcla asfáltica para los agregados a utilizarse debe ser de 9.5%.
- Terminado los ensayos a las mezclas asfálticas con los diferentes porcentajes de escoria siderúrgica añadida (0%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5% y 15%) se puede ver en el cuadro comparativo (Ver Tabla 5 página 97) que las mezclas asfálticas cumplen con los parámetros más representativos de análisis tanto con normas nacionales (MOP-001-F-2002) e internacionales (Asphalt Institute y Diseño Marshall Modificado Método Illinois).

- Se puede observar en la Tabla 5 (página 97) que la estabilidad al aire del primer porcentaje con escoria siderúrgica (5%) baja considerablemente con respecto a la estabilidad de la mezcla sin escoria siderúrgica (0%) por lo que podemos concluir que al introducir porcentajes bajos de escoria siderúrgica (menores al 6%) esta no funciona como llenante de la mezcla y no puede ser sustituida como arena.
- Después de haber ensayado las diferentes briquetas con los porcentajes de escoria y sin ella tanto al aire como saturada sus vacíos con agua se puede ver que el porcentaje de estabilidad perdida baja con las muestras que poseen escoria comparada con las muestras sin escoria siderúrgica (Ver Tabla 5 página 97) y que cumplen en todos los casos con normas internacionales (Asphalt Institute y Diseño Marshall Modificado Método Illinois). Como conclusión se puede decir que la utilización de escoria siderúrgica llena la mayoría de los vacíos de la mezcla asfáltica produciendo así mayor resistencia bajo condiciones de humedad.
- Al realizar las diferentes mezclas asfálticas con los diferentes porcentajes de escoria siderúrgica (5%, 7.5%, 10%, 12.5% y 15%) se pudo determinar mediante un gráfico (Ver gráfico página 103) que el porcentaje de escoria óptimo para obtener los mejores resultados es del 11.7% de la mezcla. Para la determinación del porcentaje óptimo de escoria se basó solamente en la estabilidad de las muestras al aire al ser la de mayor importancia en la determinación de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica.

- Luego de haber finalizado el análisis entre los resultados obtenidos entre las mezclas asfálticas sin contenido de escoria siderúrgica y las mezclas en frío con la adición del porcentaje óptimo (11.7%) de escoria siderúrgica podemos observar (Tabla 6 página 110) que las propiedades mecánicas de la mezcla mejoran en aproximadamente un 25% como podemos comparar con la estabilidad al aire de las mezclas. De igual manera el flujo de estas mejora considerablemente al igual que su resistencia conservada y la estabilidad perdida de las mismas por lo que podemos concluir que la adición de escorias siderúrgicas en mezclas asfáltica en frío mejora las características mecánicas de la misma pudiendo ser aprovechada para lugares donde se tenga mayores cargas debido a un tráfico más pesado que las vías convencionales.
- Al haber finalizado el análisis de costos entre la mezcla asfáltica sin adición de escoria y la mezcla asfáltica con adición de escoria óptima para una vía se puede decir que el costo de adición de escoria siderúrgica en la mezcla asfáltica en frío varía en 1.99% de su costo (Tabla 7 página 112), por lo que es recomendable la utilización de este material en la mezcla asfáltica para mejorar ostensiblemente sus propiedades mecánicas, en especial su estabilidad al aire y su estabilidad saturada los vacíos. Se puede concluir además que la adición de escoria siderúrgica no representa ningún cambio significativo en el proceso constructivo de una vía.

## 6.2. Recomendaciones.

- El contenido de agua de pre-envuelta se lo determina mediante tanteo sin embargo varios estudios han determinado que esta agua se encuentra dentro de un rango del 3% al 8%. En nuestro caso se utilizó un 4% de agua de pre-envuelta para poder lograr una buena trabajabilidad de la muestra. Se recomienda realizar un estudio para encontrar el porcentaje óptimo de agua de pre-envuelta para que así la mezcla no tenga un alto o bajo contenido de humedad ya que podría causar separación o debilidad de la unión entre el agregado y el asfalto residual de la emulsión. Por otro lado se debe mezclar únicamente lo suficiente para poder distribuir la emulsión uniformemente en la mezcla ya que un exceso de mezclado conllevaría a la rotura de la emulsión o a un desprendimiento del asfalto del agregado.
- El proceso de secado de las briquetas a ensayarse es un proceso de mucho cuidado ya que determina la resistencia que estas puedan tener frente a sollicitaciones externas y representan las cargas que una vía soporta durante su vida útil. Se recomienda tener especial cuidado y seguimiento con el proceso de secado en horno de las briquetas y nunca sobrepasarse de los días recomendados por ASTM o Asphalt Institute ya que podría conllevar a errores graves de apreciación de su resistencia así como otros aspectos de análisis de las mezclas.
- Se recomienda tener muy en cuenta el valor de la estabilidad perdida que es solo normada por el Asphalt Institute ya que en normas nacionales no se lo

encuentra y es un factor fundamental el cual no debe ser excesivo al ensayar muestras en seco y saturadas sus vacíos porque una alta pérdida indica que las muestras tienen una alta susceptibilidad a la humedad y puede producir desintegración bajo condiciones extremas de humedad o lluvias. También se recomienda este parámetro en normas nacionales debido a su gran aporte para la selección de briquetas.

- Si se llega a implementar estas mezclas en frío con la adición de escorias siderúrgicas se recomienda llevar a cabo una evaluación y seguimiento sobre el comportamiento de las obras de pavimentación con dichas mezclas, debido a que constituyen una nueva experiencia, la cual permitirá tomar decisiones acertadas en la ejecución de diferentes obras viales.
- Si esta nueva técnica constructiva llega a utilizarse dentro de nuestro país en la construcción de capas de rodadura se recomienda que exista un estudio a profundidad acerca de las propiedades tanto físicas como químicas de la escoria siderúrgica a utilizarse al igual que las estas propiedades dentro de una mezcla asfáltica en frío ya que puede existir el caso de incompatibilidad de propiedades entre la mezcla y la escoria siderúrgica que pueda llevar a problemas serios de resistencia a futuro de pavimentos hechos con estos materiales.
- Debido al alto costo que conlleva la movilización de la escoria siderúrgica de la planta de producción de esta hasta el sitio de construcción de la carretera, se recomienda que se analicen los costos que conllevaría la implementación

de esta tecnología en una vía nueva en construcción así también como los beneficios potenciales que estas pueden traer dentro de una vía. Analizando el cuadro de costos de la implementación de escorias siderúrgicas en una vía se puede recomendar que el radio máximo de construcción de una vía nueva sea de 10 a 15 kilómetros teniendo como centro la fábrica de producción de escoria siderúrgica.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- RIVERA Gustavo, Emulsiones asfálticas, Alfaomega Grupo Editorial, Cuarta edición, México, 1998.
- MONTEJO Alfonso, Ingeniería de pavimentos, Tomo I y II, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2006.
- CHOVA DEL ECUADOR, Bitumix, Boletín técnico, 2007.
- BEDÓN Roberto, Diseño de mezclas asfálticas en frío con emulsión y adición de polímeros, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador, Tesis, 2009.
- LLAMAZARES GOMEZ Olegario, Empleo de escorias de alto horno en los firmes de carretera, Revista de Obras Públicas, Madrid, España, 1996.
- CAJAS Diego y CÓRDOVA Francisco, Uso de los aditivos Kling Beta II, Magnabond 2700 y Magnabond IV, en la adherencia de las mezclas agregado – asfalto, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Tesis, 2005.
- GARROTE VILLAR Elisabet, El ensayo de tracción indirecta, Universidad Politécnica de Cataluña, Pdf, Barcelona, España, 2008.
- ASTM. Annual Book of ASTM Standards. Section four. Construction, Volume 04.03. Road and Paving Materials, Vehicle - Pavement Systems, 2002, Baltimore, USA.
- LARA Lauro, Manual visualizado de ensayos para materiales de construcción, Universidad Católica del Ecuador, Quito, 1980.
- MOP, Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes, MOP – 001 – F – 2002, Tomos I y II.

- PORTILLA Washington, Mezclas en frío, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Tesis.
- ASPHALT INSTITUTE, Manual básico de emulsiones asfálticas, 19, USA, 2005.
- FIGUEROA Juan Sebastián y ÁVALOS Boris Estuardo, Utilización de escorias siderúrgicas para el mejoramiento de materiales utilizados en sub-bases para la conformación de vías, Tesis, 2007.
- YANEZ Gustavo, Manual visual, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador.

# ANEXOS

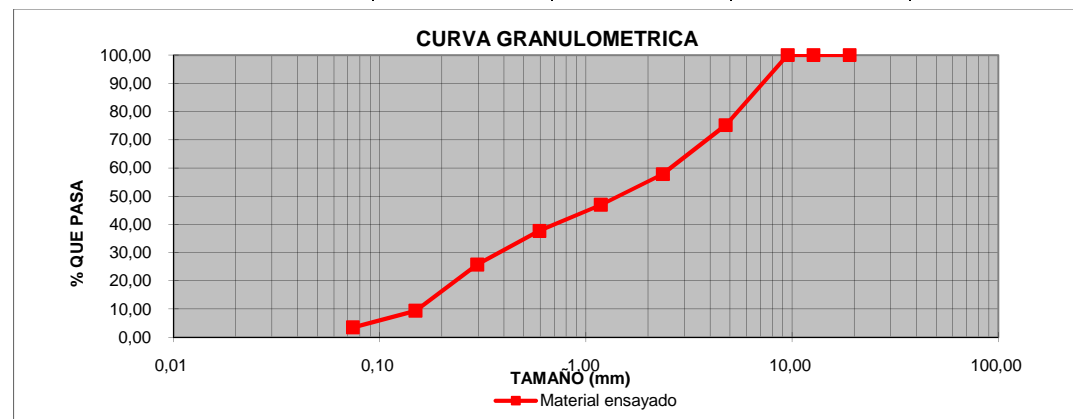


**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
GRANULOMETRÍA POR MALLAS (AGREGADO FINOS)**

PROYECTO: Tesis de Grado  
 NORMA ENSAYO: ASTM C 136  
 CANTERA: Guayllabamba  
 DESCRIPCIÓN: Granulometría del agregado fino

ENSAYADO: Cajas-Iglesias  
 FECHA: 31/08/2010

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL	MASA RETENIDA ACUMULADA	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,70	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,51	0,00	0,00	0,00	100,00
No.4	4,76	308,28	308,28	24,84	75,16
No.8	2,36	215,75	524,03	42,22	57,78
No.16	1,18	134,27	658,30	53,03	46,97
No.30	0,60	115,08	773,38	62,30	37,70
No.50	0,30	148,07	921,45	74,23	25,77
No.100	0,15	202,99	1124,44	90,59	9,41
No.200	0,07	73,45	1197,89	96,50	3,50
Pasa No. 200		43,41	43,41		
	SUMA	1241,30	1241,30		





**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
GRANULOMETRÍA POR MALLAS (AGREGADO GRUESO)**

PROYECTO: Tesis de Grado

NORMA ENSAYO: ASTM C 136

CANTERA: Guayllabamba

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DEL AGREGADO:

3/4 plg

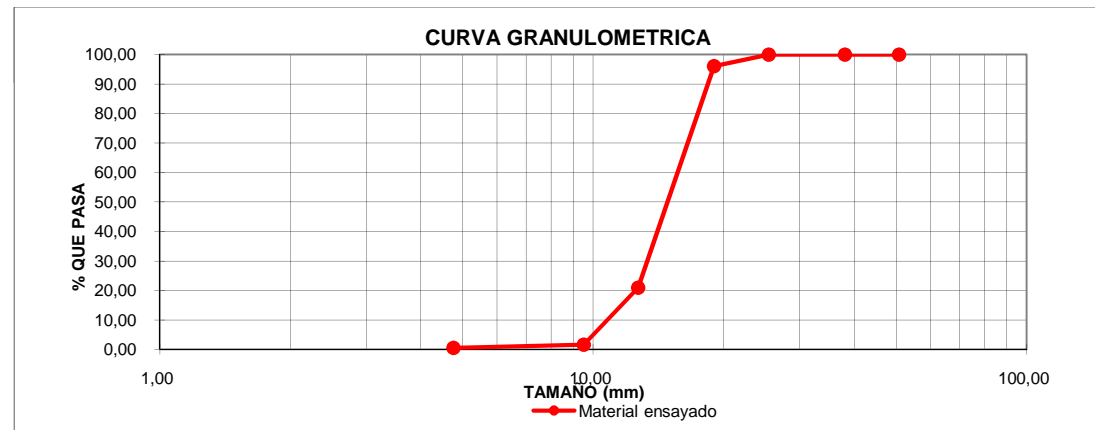
TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO:

1 plg

ENSAYADO: Cajas-Iglesias

FECHA: 31/08/2010

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL	MASA RETENIDA ACUMULADA	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
2"	50,80	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	38,10	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	471,28	471,28	3,92	96,08
1/2"	12,70	9044,00	9515,28	79,10	20,90
3/8"	9,51	2321,30	11836,58	98,39	1,61
No.4	4,76	129,73	11966,31	99,47	0,53
Pasa No. 4		63,69	63,69		
SUMA		12030,00	12030,00		



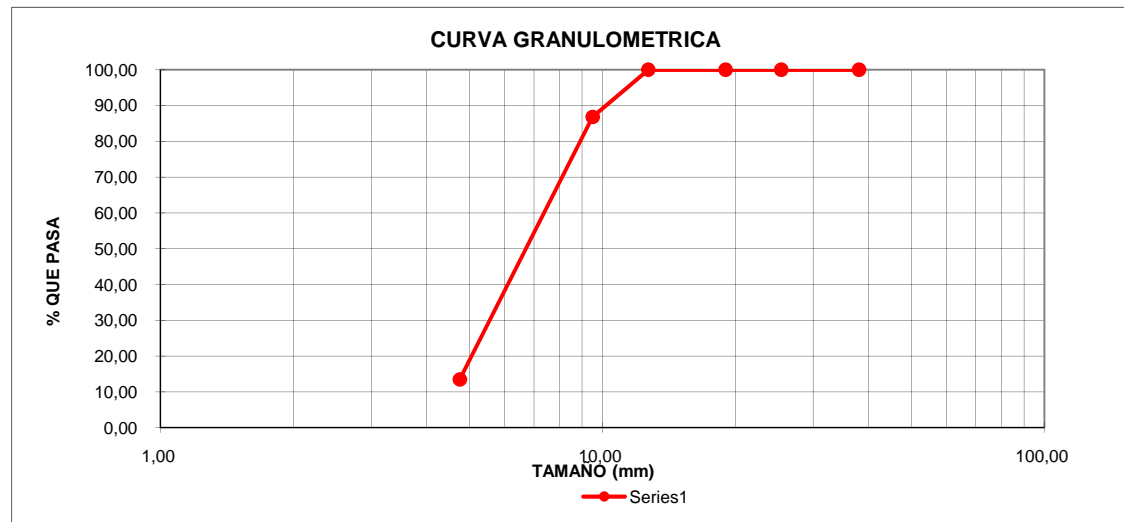


**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
GRANULOMETRÍA POR MALLAS (AGREGADO GRUESO)**

**PROYECTO:** Tesis de Grado  
**NORMA ENSAYO:** ASTM C 136  
**CANTERA:** Guayllabamba  
**DESCRIPCIÓN:** Granulometría del agregado de 3/8"  
**TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DEL AGREGADO:** 3/8"  
**TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO:** 1/2"

**ENSAYADO:** Cajas-Iglesias  
**FECHA:** 31/08/2010

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL	MASA RETENIDA ACUMULADA	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
1 1/2"	38,10	0,00	0,00	0,0	100,00
1"	25,40	0,00	0,00	0,0	100,00
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,0	100,00
1/2"	12,70	0,00	0,00	0,0	100,00
3/8"	9,51	1109,20	1109,20	13,2	86,81
No.4	4,76	6166,00	7275,20	86,5	13,49
Pasa No. 4		1134,80	1134,80		
SUMA		8410,00	8410,00		



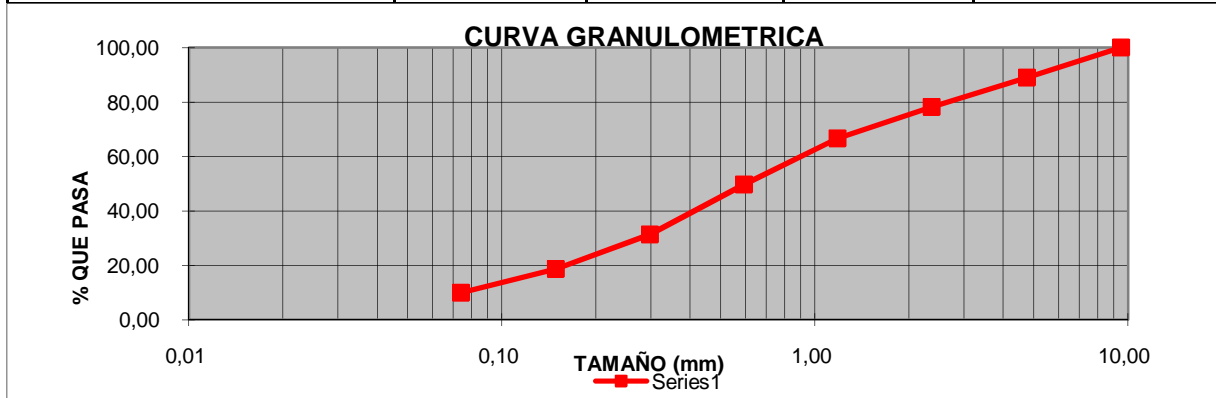


**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
GRANULOMETRIA (ESCORIAS SIDERÚRGICAS)**

**PROYECTO:** Tesis de Grado  
**NORMA ENSAYO:** ASTM C 136  
**CANTERA:** Guayllabamba  
**DESCRIPCIÓN:** Granulometría de las escorias siderúrgicas

**ENSAYADO:** Cajas-Iglesias  
**FECHA:** 31/08/2010

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL	MASA RETENIDA ACUMULADA	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
3/8"	9,51	0,00	0,00	0,00	100,00
No.4	4,76	162,07	162,07	10,94	89,06
No.8	2,36	160,86	322,93	21,80	78,20
No.16	1,18	172,38	495,31	33,44	66,56
No.30	0,60	251,04	746,35	50,38	49,62
No.50	0,30	269,03	1015,38	68,55	31,45
No.100	0,15	190,49	1205,87	81,41	18,59
No.200	0,07	128,81	1334,68	90,10	9,90
Pasa No. 200		146,62	146,62		
SUMA		1481,30	1481,30		





PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL AGREGADO GRUESO

PROYECTO: Tesis de Grado  
NORMA ENSAYO: ASTM C 127  
CANTERA: Guayllabamba  
DESCRIPCIÓN: Gravedad específica del agregado grueso

ENSAYADO: Cajas-Iglesias  
FECHA: 31/08/2010

$$\text{Gravedad específica seca} = A / (B - C)$$

$$\text{Gravedad específica saturada con superficie seca} = B / (B - C)$$

$$\text{Gravedad específica aparente} = A / (A - C)$$

MASA DE LA MUESTRA SECA	A =	2458,00	gr
MASA DE LA MUESTRA SATURADA CON SUPERFICIE SECA	B =	2530,00	gr
MASA APARENTE DE LA MUESTRA SATURADA CON SUPERFICIE SECA	C =	1513,00	gr
GRAVEDAD ESPECIFICA SECA	Ge =	2,42	
GRAVEDAD ESPECIFICA SATURADA CON SUPERFICIE SECA	Ges =	2,49	
GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE	Gea =	2,60	
PORCENTAJE DE ABSORCION	Ab =	2,93	%



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL AGREGADO GRUESO

PROYECTO: Tesis de Grado  
NORMA ENSAYO: ASTM C 127  
CANTERA: Guayllabamba  
DESCRIPCIÓN: Gravedad específica del agregado grueso

ENSAYADO: Cajas-Iglesias  
FECHA: 31/08/2010

$$\text{Gravedad específica seca} = A / (B - C)$$

$$\text{Gravedad específica saturada con superficie seca} = B / (B - C)$$

$$\text{Gravedad específica aparente} = A / (A - C)$$

MASA DE LA MUESTRA SECA	2838,00	gr
MASA DE LA MUESTRA SATURADA CON SUPERFICIE SECA	2890,00	gr
MASA APARENTE DE LA MUESTRA SATURADA CON SUPERFICIE SECA	1735,00	gr
GRAVEDAD ESPECIFICA SECA	2,46	
GRAVEDAD ESPECIFICA SATURADA CON SUPERFICIE SECA	2,50	
GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE	2,57	
PORCENTAJE DE ABSORCION	1,83	%



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
CONTENIDO ORGANICO DE ARENA

PROYECTO:  
NORMA ENSAYO:  
CANTERA:  
DESCRIPCIÓN:

Tesis de Grado  
ASTM C 40  
Guayllabamba  
Contenido orgánico de la arena

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

CONTENIDO ORGÁNICO ACEPTABLE

SI

NO

VALOR EN LA ESCALA

N°



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
EQUIVALENTE DE ARENA

PROYECTO: Tesis de Grado  
NORMA ENSAYO: ASTM D 2419  
CANTERA: Guayllabamba  
DESCRIPCIÓN: Equivalente de arena

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

$$C = ( B / A ) * 100$$

		Muestra 1
A	LECTURA INICIAL (plg)	3,2
B	LECTURA FINAL (plg)	3,0
C	EQUIVALENTE DE ARENA (%)	93,75



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
HUMEDAD NATURAL DEL AGREGADO FINO

PROYECTO: Tesis de Grado  
NORMA ENSAYO: ASTM C 566  
CANTERA: Guayllabamba  
DESCRIPCIÓN: Humedad natural del agregado fino

ENSAYADO: Cajas-Iglesias  
FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

$$C = ((A-B)/B) * 100$$

		Muestra 1
A	Peso de la muestra húmeda	1021,1
B	Peso de la muestra seca	988,6
C	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	3,29



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
HUMEDAD NATURAL DEL AGREGADO GRUESO

PROYECTO:

Tesis de Grado

ENSAYADO: Cajas-Iglesias

NORMA ENSAYO:

ASTM C 566

FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

CANTERA:

Guayllabamba

DESCRIPCIÓN:

Humedad natural del agregado grueso de 3/4"

$$C = ((A-B)/B) * 100$$

		Muestra 1
A	Peso de la muestra húmeda	1515,8
B	Peso de la muestra seca	1503,3
C	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	0,83



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
HUMEDAD NATURAL DEL AGREGADO GRUESO

PROYECTO: Tesis de Grado  
NORMA ENSAYO: ASTM C 566  
CANTERA: Guayllabamba  
DESCRIPCIÓN: Humedad natural del agregado grueso de 3/8"

ENSAYADO: Cajas-Iglesias  
FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

$$C = ((A-B)/B) * 100$$

		Muestra 1
A	Peso de la muestra húmeda	2389,6
B	Peso de la muestra seca	2368,9
C	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	0,87



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
ABRASIÓN

PROYECTO: Tesis de Grado  
NORMA ENSAYO: ASTM C 131  
CANTERA: Guayllabamba  
DESCRIPCIÓN: Abrasión

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

$$\text{Porcentaje de desgaste} = (C / A) * 100$$

$$\text{Masa que pasa el tamiz No. 12} = (A - B)$$

TIPO DE GRADACION: B

MASA INICIAL DE LA MUESTRA	A=	5348 gr
MASA RETENIDA EN EL TAMIZ No 12 DESPUES DE 500 REVOLUCIONES	B=	4082 gr
MASA QUE PASA EL TAMIZ N° 12	C=	1266 gr
PORCENTAJE DE DESGASTE	D=	23,67 %



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**  
**DURABILIDAD A LA ACCIÓN DE LOS SULFATOS**

**PROYECTO:** Tesis de Grado  
**NORMA ENSAYO:** ASTM C 88  
**CANTERA:** Guayllabamba  
**DESCRIPCIÓN:** Durabilidad del agregado fino a la acción de los sulfatos

**ENSAYADO:** Cajas-Iglesias  
**FECHA:** 31/08/2010

SOLUCION DE SULFATO DE MAGNESIO

N° DEL TAMIZ		% RETENIDO PARCIAL DEL AGREGADO	MASA DE LAS FRACCIONES ANTES DEL ENSAYO	MASA DE LAS FRACCIONES DES- PUES DEL ENSAYO	% QUE PASA DESPUES DEL ENSAYO	% DE DESGASTE PARCIAL
PASA	RETIENE					
	N°4	24,84	134,84	129,16	4,21	1,05
N°4	N°8	17,38	134,71	123,58	8,26	1,44
N°8	N°16	10,81	134,27	126,62	5,70	0,62
N°16	N°30	9,27	115,08	106,18	7,73	0,72
N°30	N°50	11,93	146,34	137,26	6,20	0,74
PORCENTAJE TOTAL DE DESGASTE						<b>4,56</b>



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**  
**DURABILIDAD A LA ACCIÓN DE LOS SULFATOS**

**PROYECTO:** Tesis de Grado  
**NORMA ENSAYO:** ASTM C 88  
**CANTERA:** Guayllabamba  
**DESCRIPCIÓN:** Durabilidad del agregado grueso de 3/8" a la acción de los sulfatos

**SOLICITADO POR:** Cajas-Iglesias  
**FECHA DE EMISIÓN:** 31/08/2010

SOLUCION DE SULFATO DE MAGNESIO

N° DEL TAMIZ		% RETENIDO PARCIAL DEL AGREGADO	MASA DE LAS FRACCIONES ANTES DEL ENSAYO	MASA DE LAS FRACCIONES DES- PUES DEL ENSAYO	% QUE PASA DESPUES DEL ENSAYO	% DE DESGASTE PARCIAL
PASA	RETIENE					
	3/8"	13,12	347,15	334,73	3,58	0,47
3/8"	N°4	73,30	330,48	312,83	5,34	3,91
PORCENTAJE TOTAL DE DESGASTE						4,38



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**  
**DURABILIDAD A LA ACCIÓN DE LOS SULFATOS**

**PROYECTO:** Tesis de Grado  
**NORMA ENSAYO:** ASTM C 88  
**CANTERA:** Guayllabamba  
**DESCRIPCIÓN:** Durabilidad del agregado grueso de 3/4" a la acción de los sulfatos

**SOLICITADO POR:** Cajas-Iglesias  
**FECHA DE EMISIÓN:** 31/08/2010

SOLUCION DE SULFATO DE MAGNESIO

N° DEL TAMIZ		% RETENIDO PARCIAL DEL AGREGADO	MASA DE LAS FRACCIONES ANTES DEL ENSAYO	MASA DE LAS FRACCIONES DES- PUES DEL ENSAYO	% QUE PASA DESPUES DEL ENSAYO	% DE DESGASTE PARCIAL
PASA	RETIENE					
	1/2"	75,18	692,30	683,50	1,27	0,96
1/2"	3/8"	19,29	332,86	328,54	1,30	0,25
PORCENTAJE TOTAL DE DESGASTE						1,21



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
CARGA DE LA PARTÍCULA

PROYECTO: Tesis de Grado  
NORMA ENSAYO: ASTM D 244  
CANTERA: Guayllabamba  
DESCRIPCIÓN: Carga de la partícula

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

Tipo de carga

Muestra 1

Cátodo

TIPO DE CARGA

POSITIVO



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
ENSAYO DEL TAMIZ # 20

PROYECTO: Tesis de Grado  
NORMA ENSAYO: ASTM D 244-38  
CANTERA: Guayllabamba  
DESCRIPCIÓN: Ensayo del tamiz # 20

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

Ensayo #	Peso tamiz + bandeja "a"	Peso del tamiz + bandeja (después) "b"	Ensayo Tamiz #20 "c = b-a"	Ensayo del Tamiz # 20 (%) "d = c/10"
1	860	860,77	0,77	0,077
		TOTAL =	0,77	0,077

PROMEDIO RETENIDO MALLA # 20= 0,08



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LA EMULSIÓN

PROYECTO: Tesis de Grado  
NORMA ENSAYO: ASTM D 244-09  
CANTERA: Guayllabamba  
DESCRIPCIÓN: Gravedad específica de la emulsión

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

Ensayo #	Peso del picnómetro "a"	Peso picnómetro + agua destilada "b"	Peso picnómetro + asfalto "c"	Gravedad específica $GE=(c-a)/(b-a)$
1	38,58	62,72	61,56	0,952
2	40,26	63,85	62,65	0,949
PROMEDIO =				0,951

GRAVEDAD ESPECÍFICA= 0,95



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
VISCOSIDAD "SAYBOLT FUROL"

PROYECTO: Tesis de Grado  
NORMA ENSAYO: ASTM D 244-22  
CANTERA: Guayllabamba  
DESCRIPCIÓN: Viscosidad de la emulsión

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

$C = (\text{PROMEDIO } A+B) \text{ a un } T = 25 \text{ C}^\circ$

Lectura 1	A=	23,70	segundos
Lectura 2	B=	23,6	segundos
VISCOSIDAD DE LA EMULSIÓN	C=	23,65	Centipoises



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
ESTABILIDAD A LAS 24 HORAS

PROYECTO: Tesis de Grado  
NORMA ENSAYO: ASTM D 244-29  
CANTERA: Guayllabamba  
DESCRIPCIÓN: Estabilidad a las 24 horas

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

% de Asentamiento= B-A

		Muestra 1	Muestra 2
Residuo en la parte de arriba (%)	A	62,27%	62,06%
Residuo en la parte de abajo (%)	B	62,93%	62,79%
ESTABILIDAD A LAS 24 HORAS	% ASENTAMIENTO	0,66%	0,73%
PROMEDIO ESTABILIDAD	% ASENTAMIENTO	0,70%	



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
RESIDUO POR EVAPORACIÓN

PROYECTO: Tesis de Grado  
NORMA ENSAYO: ASTM D 244-29  
CANTERA: Guayllabamba  
DESCRIPCIÓN: Residuo por evaporación

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

Ensayo #	Peso del Recipiente "B"	Peso del Recipien. + Emulsión(después)"A"	Residuo
1	159,25	190,25	62,00
2	160,77	191,95	62,36
PROMEDIO =			62,18

Residuo (%) =  $2 (A - B)$

donde: A = peso del recipiente + residuo  
B = peso del recipiente



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
DUCTILIDAD DEL RESIDUO

PROYECTO: Tesis de Grado  
NORMA ENSAYO: ASTM D 113  
CANTERA: Guayllabamba  
DESCRIPCIÓN: Ductilidad del residuo

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

	Muestra	Alargamiento (cm)
	1	56
	2	54
Promedio		55

DUCTILIDAD DEL RESIDUO= 55



## PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR PENETRACIÓN DEL RESIDUO

PROYECTO: Tesis de  
Grado  
NORMA ENSAYO: ASTM D 15  
CANTERA: Guayllabamba  
DESCRIPCIÓN: Penetración del residuo

SOLICITADO POR: Cajas-Iglesias  
FECHA DE EMISIÓN: 31/08/2010

	Punto #	Penetración
	1	75
	2	78
	3	76
	4	77
	5	77
Promedio		76,60

PENETRACIÓN DEL RESIDUO= 77