



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**AUTORES: CEDEÑO PÉREZ, FREDDY ALEJANDRO.**

**ESPÍN IÑIGUEZ, PATRICIO ISRAEL.**

**TEMA: DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE MODIFICADAS  
CON TETRA PAK, ALAMBRE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO Y  
LIMADURA METÁLICA RECICLADOS CON LIGANTE ASFÁLTICO AC-20.**

**DIRECTOR: ING. ROMERO FLORES, PATRICIO Msc.**

**CODIRECTOR: ING. BONIFAZ GARCÍA, HUGO**

**SANGOLQUÍ, SEPTIEMBRE 2014**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE****INGENIERÍA CIVIL****CERTIFICADO**

Ing. Patricio Romero Flores Msc. e Ing. Hugo Bonifaz García

Certifican que el presente trabajo titulado “**DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE MODIFICADAS CON TETRA PAK, ALAMBRE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO Y LIMADURA METÁLICA RECICLADOS CON LIGANTE ASFÁLTICO AC-20**”, realizado por los Señores Freddy Alejandro Cedeño Pérez y Patricio Israel Espín Íñiguez, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas. El mencionado trabajo consta de un documento empastado y un disco compacto el cual contiene los archivos en formato (PDF).

Autorizan a los Señores Freddy Alejandro Cedeño Pérez y Patricio Israel Espín Íñiguez que lo entreguen al Ing. Pablo Caiza PhD. en su calidad de Director de la Carrera.

Sangolquí, Septiembre 2014

ING. PATRICIO ROMERO FLORES Msc.

DIRECTOR

ING. HUGO BONIFAZ GARCÍA

CODIRECTOR

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE****INGENIERÍA CIVIL****AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, Freddy Alejandro Cedeño Pérez y Patricio Israel Espín Íñiguez, certificamos que la presente investigación denominada **“DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE MODIFICADAS CON TETRA PAK, ALAMBRE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO Y LIMADURA METÁLICA RECICLADOS CON LIGANTE ASFÁLTICO AC-20.”**, es resultado de un arduo trabajo de investigación desarrollado en su totalidad por nosotros, respetando derechos de autor debidamente indicados en citas bibliográficas a lo largo de la presente publicación, sin constituir en ningún caso copia o plagio de algún trabajo existente, razón por la cual declaramos que es un trabajo de nuestra exclusiva autoría.

Sangolquí, Septiembre 2014

**LOS AUTORES**

**FREDDY A. CEDEÑO PÉREZ.**

**PATRICIO I. ESPÍN IÑIGUEZ.**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE****INGENIERÍA CIVIL****AUTORIZACIÓN**

Nosotros, Freddy Alejandro Cedeño Pérez y Patricio Israel Espín Íñiguez, autorizamos la publicación en la biblioteca virtual de la institución del proyecto titulado: **“DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE MODIFICADAS CON TETRA PAK, ALAMBRE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO Y LIMADURA METÁLICA RECICLADOS CON LIGANTE ASFÁLTICO AC-20”**, la cual es de nuestra propia autoría y responsabilidad.

Sangolquí, Septiembre 2014.

**LOS AUTORES**

FREDDY A. CEDEÑO PÉREZ.

PATRICIO I. ESPÍN IÑIGUEZ.

## DEDICATORIA

Exclusivamente al Ing. Alfredo Cedeño, mi padre....

Sé lo importante que es para ti que haya culminado una etapa más en mi vida y en nuestros sueños de alcanzar algo mejor, distinto para muchos pero especial para los dos.

Todos estos años me apoyaste y creíste en mí, me levantaste cuando lo necesitaba, me corregiste... cuando no pude ver lo que tus ojos y tu experiencia harían de mí una persona que no se doblega tan fácilmente por la adversidad, que lucha incansablemente por cumplir objetivos y que insiste en amarte y respetarte profundamente.

No hay duda que un corazón valiente y noble como el tuyo, hará que muchas personas aprendan y conozcan el verdadero valor de un padre.

Tú hijo que te admira,

**Freddy**

## **DEDICATORIA**

A mis padres Fanny Iñiguez y Víctor Espín, por haberme brindado la oportunidad de desarrollar mis estudios y progresar en la vida, por el tiempo y sacrificio que han invertido para llegar a este objetivo, y en especial por la paciencia que han tenido para soportar todas y cada una de las circunstancias que se han presentado durante mi periodo de estudios, por los consejos y apoyo brindados en los momentos difíciles que me recordaban día a día el objetivo mediante el cual se ha culminado con este logro.

A mi hermana que con su corta edad supo comprenderme, soportarme y brindarme su apoyo en todo momento, compartiendo en cada momento alegrías, tristezas penas e inquietudes.

**PATRICIO ISRAEL ESPÍN IÑIGUEZ**

## AGRADECIMIENTO

Al único que nunca me falló, que todo el tiempo está a mi lado y que me da ímpetu de conseguir algo *mucho* mejor.

Al único Constructor de mi vida, al Magnífico Creador, que supera todo límite... que supera al amor...

**JEHOVÁ.** Mi Padre, mi Amigo y mi Dios.

**Freddy**

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres por todo el apoyo y amor incondicional brindado en cada momento, a mi hermana por toda la confianza, apoyo y amor depositados en mí.

Mi agradecimiento a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, por brindarme la oportunidad de desarrollar mis estudios de la mejor manera, a todos mis profesores que a lo largo de mis estudios me brindaron su apoyo y conocimiento para ser cada día más grande.

A mis verdaderos amigos y compañeros que me apoyaron siempre en los momentos difíciles dentro de la institución y compartieron conmigo alegrías, tristezas penas y sinsabores, que son el puente para pasar cada día hacia un mejor futuro.

**PATRICIO ISRAEL ESPÍN IÑIGUEZ**



**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

<b>CERTIFICADO .....</b>	<b>I</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....</b>	<b>II</b>
<b>AUTORIZACIÓN.....</b>	<b>III</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>IV</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>V</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>VI</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>XVI</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>XIX</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XX</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>

1.	ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO .....	1
1.1.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.3.1.	LIMADURA METÁLICA. ....	2
1.3.1.	FIBRA METÁLICA DE NEUMÁTICO FUERA DE USO (N.F.U). ....	3
1.1.3.	TETRA PAK.....	6
1.2.	JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA .....	8
1.3.	OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	11
1.3.1.	OBJETIVO GENERAL.....	11
1.3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	11
1.4.	METODOLOGÍA.....	12
 <b>CAPÍTULO II .....</b>		<b>15</b>
2.	RECICLAJE Y REUTILIZACIÓN DE LIMADURA METÁLICA .....	15
2.1.	JUSTIFICACIÓN DEL RECICLAJE .....	15
2.2.	PRODUCCIÓN DE LIMADURA METÁLICA INDUSTRIAL.....	17
2.3.	COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LIMADURA METÁLICA ....	20
2.3.1.	PROCESOS DE RECICLAJE.....	21
2.3.2.	TIPOS DE METALES RECICLADOS .....	23
2.3.3.	PROPIEDADES DEL MATERIAL RECICLADO .....	24
 <b>CAPÍTULO III.....</b>		<b>27</b>
3	RECICLAJE Y REUTILIZACIÓN DE ALAMBRE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO .....	27
3.1	JUSTIFICACIÓN DEL RECICLAJE .....	27
3.2	COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS ALAMBRES DE NEUMÁTICOS. ....	29
3.2.1	COMPOSICIÓN DE LOS ALAMBRES DE NEUMÁTICOS.....	29
3.2.2	CARACTERÍSTICAS DE LOS ALAMBRES PARA CEJA DE NEUMÁTICOS. ....	30
3.3	DISPOSICIÓN ARTESANAL.....	32
3.4	DISPOSICIÓN INDUSTRIAL (ESPOL, 2013).....	35
3.4.1	FASES DEL RECICLAJE.....	35
3.4.2	MAQUINARIAS PARA LA EXTRACCIÓN Y SEPARACIÓN DEL ALAMBRE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO.....	36

3.5	CARACTERÍSTICAS DE LA FIBRA DE LLANTA QUE HA DE TOMARSE EN CUENTA PARA DECIDIR QUE FORMEN PARTE DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA. ....	40
<b>CAPÍTULO IV .....</b>		<b>42</b>
	RECICLAJE Y DISPOSICION DE TETRA PAK. ....	42
4.1	JUSTIFICACIÓN DEL RECICLAJE .....	42
4.2	COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA ENVOLTURA TETRA PAK. ....	44
4.2.1	COMPOSICIÓN DE LAS ENVOLTURAS TETRA PAK. ....	44
4.2.2	CARACATERÍSTICAS DE LAS ENVOLTURAS TETRA PAK.....	46
4.3	DISPOSICIÓN INDUSTRIAL.....	48
4.3.1	PROCESO DE RECICLAJE.....	48
4.3.2	REUTILIZACIÓN DE ENVASES TETRA PAK.....	49
<b>CAPÍTULO V.....</b>		<b>53</b>
	DESCRIPCIÓN Y COMPOSICIÓN DE MEZCLAS.....	53
5.1	AGREGADOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	53
5.1.1	DEFINICIÓN.....	53
5.1.2	CLASIFICACIÓN .....	54
5.1.3	PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS (Padilla, UPCommons, 2007).....	56
5.1.4	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN.....	62
5.2	LIGANTES EN MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	85
5.2.1.	GENERALIDADES .....	85
5.2.2.	DEFINICIÓN DE ASFALTO (Trinidad, 2011).....	86
5.2.3.	CLASIFICACIÓN DEL LIGANTE ASFÁLTICO (Padilla, Materiales Básicos, 2004) .....	86
5.2.4.	PROPIEDADES DEL LIGANTE ASFÁLTICO .....	88
5.2.5.	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE ASFÁLTICO.....	91
<b>CAPÍTULO VI.....</b>		<b>104</b>
6.	DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE.....	104
6.1.	INTRODUCCIÓN. ....	104
6.1.1.	Método Marshall.....	104

6.2.	DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TRADICIONAL UTILIZANDO EL METODO MARSHALL. ....	105
6.2.1.	Equipos Requeridos por el Método Marshall. ....	105
6.2.2.	Procedimientos Requeridos por el Método Marshall. ....	110
6.3.	DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA UTILIZANDO EL MÉTODO MARSHALL ADICIONANDO ÚNICAMENTE LIMADURA METÁLICA.....	143
6.4.	DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA UTILIZANDO EL MÉTODO MARSHALL ADICIONANDO ÚNICAMENTE ALAMBRE METÁLICO DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO.....	150
6.5.	DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA UTILIZANDO EL MÉTODO MARSHALL ADICIONANDO ÚNICAMENTE TETRA PAK.....	156
6.6.	ENSAYO DE CHOQUE TÉRMICO EN MEZCLA ASFÁLTICA. ....	162
<b>CAPÍTULO VII .....</b>		<b>167</b>
7.	ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS. ....	167
7.1.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS DISEÑADAS POR EL METODO MARSHALL TRADICIONAL, Y USANDO MATERIALES RECICLADOS. ....	167
7.1.1.	Mezcla asfáltica diseñada únicamente con limadura metálica. ....	173
7.1.2.	Mezcla asfáltica diseñada únicamente con alambre de neumáticos fuera de uso. ....	178
7.1.3.	Mezcla asfáltica diseñada únicamente con tetra pak. ....	184
7.2.	ANÁLISIS DE COSTOS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS DISEÑADAS.....	191
7.2.1.	Análisis de costo de la mezcla asfáltica tradicional.....	193
7.2.2.	Análisis de costo de la mezcla asfáltica adicionada con limadura metálica. ....	197
7.2.3.	Análisis de costo de la mezcla asfáltica adicionada con fibras metálicas de Neumáticos fuera de uso.....	200
7.2.4.	Análisis de costo de la mezcla asfáltica adicionada con tetra pak.....	203
7.3.	COMPARACIÓN DE COSTOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DISEÑADAS CON REFERENCIA AL COSTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TRADICIONALES EN EL MERCADO. ....	206
7.4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE CHOQUE TÉRMICO.....	208
	Análisis de la estabilidad en las mezclas asfálticas sometidas a choque térmico con respecto a las ensayadas a temperatura constante.....	209

Análisis del flujo en las mezclas asfálticas sometidas a choque térmico con respecto a las ensayadas a temperatura constante. ....	210
<b>CAPÍTULO VIII</b> .....	<b>211</b>
8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	211
8.1 ANTECEDENTES DE CONCLUSIONES.....	211
8.2 CONCLUSIONES .....	212
8.3 RECOMENDACIONES.....	215
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>218</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Fig. 1:</b> Limadura metálica reciclada.....	17
<b>Fig. 2:</b> Llantas quemadas.....	29
<b>Fig. 3:</b> Alambres de llanta durante su producción.....	30
<b>Fig. 4:</b> Estructura de una llanta.....	31
<b>Fig. 5:</b> Recolección de NFU-Galápagos.....	35
<b>Fig. 6:</b> Destalonadora.....	37
<b>Fig. 7:</b> Trituradora primaria.....	37
<b>Fig. 8:</b> Trituradora secundaria.....	38
<b>Fig. 9:</b> Granulador primario.....	38
<b>Fig. 10:</b> Separador magnético.....	39
<b>Fig. 11:</b> Granulador secundario.....	40
<b>Fig. 12:</b> Alambre de llanta.....	41
<b>Fig. 13:</b> Poli-aluminio de envases Tetra Pak.....	42
<b>Fig. 14:</b> Reciclaje del envase Tetra Pak.....	44
<b>Fig. 15:</b> Polietileno.....	45
<b>Fig. 16:</b> Aluminio de la envoltura Tetra Pak.....	46
<b>Fig. 17:</b> Capas del envase Tetra Pak.....	47
<b>Fig. 18:</b> Diferentes procesos de recolección.....	48
<b>Fig. 19:</b> Pulpeo (Proceso de separación).....	49
<b>Fig. 20:</b> Marquesina con reciclados de Tetra Pak.....	51
<b>Fig. 21:</b> Techo de poli-aluminio.....	52
<b>Fig. 22:</b> Agregado fino y grueso.....	63
<b>Fig. 23:</b> Curva granulométrica (GRAVA).....	65
<b>Fig. 24:</b> Curva granulométrica (ARENA).....	66
<b>Fig. 25:</b> Canasta con agregado grueso sumergido en agua.....	68
<b>Fig. 26:</b> Lavado y secado del agregado grueso.....	68
<b>Fig. 27:</b> Muestra sumergida en agua.....	69
<b>Fig. 28:</b> Agregado fino sumergido en agua.....	73
<b>Fig. 29:</b> Peso del picnómetro sin agua destilada.....	74
<b>Fig. 30:</b> Peso del picnómetro con agua hasta la marca.....	74
<b>Fig. 31:</b> Picnómetro con muestra de árido fino.....	74
<b>Fig. 32:</b> Picnómetro con muestra de árido fino y agua destilada hasta la marca.....	75
<b>Fig. 33:</b> Extrayendo burbujas de aire del picnómetro con la muestra.....	75
<b>Fig. 34:</b> Máquina de los Ángeles.....	77
<b>Fig. 35:</b> Bolas de acero.....	78
<b>Fig. 36:</b> Máquina de los ángeles con el material y las esferas.....	79
<b>Fig. 37:</b> Equipos de ensayo para Equivalente de Arena.....	82
<b>Fig. 38:</b> Muestra en reposo.....	84

<b>Fig. 39:</b> Llenado del ligante asfáltico en los anillos. ....	93
<b>Fig. 40:</b> Estabilización de la temperatura del agua. ....	94
<b>Fig. 41:</b> Incremento de la temperatura del agua a razón de 5°C/min. ....	94
<b>Fig. 42:</b> Esfera rodeada de betún toca la placa soporte. ....	95
<b>Fig. 43:</b> Recipientes sumergidos en Baño María. ....	98
<b>Fig. 44:</b> Penetrómetro con muestra ensayada. ....	98
<b>Fig. 45:</b> Penetración de la aguja en la superficie de la muestra. ....	99
<b>Fig. 46:</b> Muestra caliente fluida. ....	102
<b>Fig. 47:</b> Picnómetro con muestra. ....	102
<b>Fig. 48:</b> Picnómetro en la bandeja con agua. ....	103
<b>Fig. 49:</b> Granulometría definida para mezcla asfáltica. ....	115
<b>Fig. 50:</b> Briqueta para ensayo Marshall. ....	117
<b>Fig. 51:</b> Control de temperaturas de mezcla. ....	118
<b>Fig. 52:</b> Mezcla de agregados con ligante asfáltico. ....	118
<b>Fig. 53:</b> Moldes precalentados en horno. ....	119
<b>Fig. 54:</b> Aplicación de golpes a la mezcla asfáltica. ....	120
<b>Fig. 55:</b> Compactación de briquetas Marshall. ....	122
<b>Fig. 56:</b> Extractor de muestras Marshall. ....	122
<b>Fig. 57:</b> Briqueta sumergida en agua a 25 °C. ....	123
<b>Fig. 58:</b> Briqueta superficialmente seca. ....	124
<b>Fig. 59:</b> Extracción del aire de la mezcla asfáltica en el ensayo RICE. ....	127
<b>Fig. 60:</b> Briqueta sumergida a 60°C. ....	138
<b>Fig. 61:</b> Ensayo Marshall de estabilidad – flujo. ....	139
<b>Fig. 62:</b> Curvas Marshall para determinación de parámetros óptimos. ....	142
<b>Fig. 63:</b> Limadura metálica adicionada al mix de agregados. ....	144
<b>Fig. 64:</b> Control de temperaturas de mezcla adicionando limadura metálica. ....	145
<b>Fig. 65:</b> Alambre metálico de neumáticos fuera de uso adicionada al mix de agregados. ....	151
<b>Fig. 66:</b> Fibras tetra pak adicionada al mix de agregados. ....	157
<b>Fig. 67:</b> Briqueta pesada en el aire, saturada superficie seca y sumergida. ....	163
<b>Fig. 68:</b> Briquetas sometidas en baño maría a 60 °C durante 10 minutos. ....	165
<b>Fig. 69:</b> Briquetas sometidas en agua a 0 °C durante 10 minutos. ....	165
<b>Fig. 70:</b> Curvas para diseño de mezcla marshall tradicional. ....	169
<b>Fig. 71:</b> Curvas para diseño de mezcla marshall con limadura metálica. ....	174
<b>Fig. 72:</b> Curvas para diseño de mezcla marshall adicionada alambre de neumáticos fuera de uso. ....	180
<b>Fig. 73:</b> Curvas para diseño de mezcla marshall adicionada con fibras tetra pak. ....	186
<b>Fig. 74:</b> Tolvas metálicas. ....	191
<b>Fig. 75:</b> Bandas transportadoras y tambor secador de áridos. ....	192

<b>Fig. 76:</b> Distribuidor de mezcla asfáltica.....	192
<b>Fig. 77:</b> Comparación de estabilidad vs. material reciclado modificador usado en la mezcla asfáltica.....	209
<b>Fig. 78:</b> Comparación de flujo vs. material reciclado modificador usado en la mezcla asfáltica.....	210
<b>Fig. 79:</b> Valores de estabilidad en las diferentes mezclas realizadas.....	213
<b>Fig. 80:</b> Valores de flujo en las diferentes mezclas realizadas.....	214



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla No. 1:</b> Normas y Ensayos de aplicación. ....	13
<b>Tabla No. 2:</b> Tamaño de los agregados gruesos .....	55
<b>Tabla No. 3:</b> Malla de los tamices (grava).....	55
<b>Tabla No. 4:</b> Tamaño de los agregados finos.....	56
<b>Tabla No. 5:</b> Malla de los tamices (arena) .....	56
<b>Tabla No. 6:</b> Peso aproximado en función del tamaño máximo nominal.....	63
<b>Tabla No. 7:</b> Resultados obtenidos del ensayo de granulometría (grava). ....	64
<b>Tabla No. 8:</b> Resultados obtenidos del ensayo de granulometría (arena).....	65
<b>Tabla No. 9:</b> Resultados obtenidos del ensayo para peso específico (grava). ....	71
<b>Tabla No. 10:</b> Resultados obtenidos del ensayo para peso específico (grava). ....	76
<b>Tabla No. 11:</b> Selección de esferas de acuerdo a la graduación. ....	78
<b>Tabla No. 12:</b> Peso del agregado según su graduación.....	79
<b>Tabla No. 13:</b> Resultados obtenidos del ensayo de abrasión para la grava. ....	80
<b>Tabla No. 14:</b> Resultados obtenidos del ensayo equivalente de arena. ....	84
<b>Tabla No. 15:</b> Resultados obtenidos del ensayo (ASTM D-95). ....	95
<b>Tabla No. 16:</b> Resultados obtenidos del ensayo (ASTM D-5). ....	99
<b>Tabla No. 17:</b> Especificaciones para cementos asfálticos. Equivalencias entre grado de penetración y grado de viscosidad.....	100
<b>Tabla No. 18:</b> Resultados obtenidos del ensayo ASTM D70-76.....	103
<b>Tabla No. 19:</b> Husos Granulométricos MAC .....	111
<b>Tabla No. 20:</b> Estabilización Granulométrica inicial (no entra en huso).....	112
<b>Tabla No. 21:</b> Porcentajes Iniciales para Mezcla Asfáltica. ....	113
<b>Tabla No. 22:</b> Estabilización granulométrica para diseño MAC-2.....	114
<b>Tabla No. 23:</b> Pesos y porcentajes iniciales para mezcla asfáltica. ....	114
<b>Tabla No. 24:</b> Pesos de ligante asfáltico evaluados en mezcla asfáltica.....	117
<b>Tabla No. 25:</b> Criterios Marshall (NEVI-12 T. C., 2013). ....	121
<b>Tabla No. 26:</b> Pesos de la muestra para ensayo Rice. (ASTM D-2041 , 1996).....	126
<b>Tabla No. 27:</b> Pesos registrados por cada briqueta.....	134
<b>Tabla No. 28:</b> Densidad Máxima Teórica Rice “Gmm”.....	135
<b>Tabla No. 29:</b> Propiedades volumétricas de las mezclas Marshall tradicional elaboradas.....	136
<b>Tabla No. 30:</b> Tabla de factores de correlación de estabilidad (the asphalt institute, TABLE III-1-STABILITY CORRELATION RATIOS, 1974).....	140
<b>Tabla No. 31:</b> Valores de estabilidad – flujo en mezcla Marshall tradicional.....	141
<b>Tabla No. 32:</b> Valores de densidad máxima teórica Rice para mezcla adicionada con limadura metálica. ....	146
<b>Tabla No. 33:</b> Pesos de las briquetas evaluadas adicionando limadura metálica. ....	147

<b>Tabla No. 34:</b> Propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas evaluadas adicionando limadura metálica.....	148
<b>Tabla No. 35:</b> Valores de estabilidad – flujo en mezcla asfáltica adicionada con limadura metálica. ....	149
<b>Tabla No. 36:</b> Valores de densidad máxima teórica Rice para mezcla adicionada con alambre de neumáticos fuera de uso.....	152
<b>Tabla No. 37:</b> Pesos de las briquetas elaboradas adicionando alambre de neumáticos fuera de uso. ....	153
<b>Tabla No. 38:</b> Propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas evaluadas adicionando alambre de neumáticos fuera de uso. ....	154
<b>Tabla No. 39:</b> Valores de estabilidad – flujo en mezcla asfáltica adicionando alambre de neumáticos fuera de uso.....	155
<b>Tabla No. 40:</b> Valores de densidad máxima teórica Rice para mezcla adicionada con fibras tetra pak. ....	158
<b>Tabla No. 41:</b> Pesos de las mezclas evaluadas adicionando fibras tetra pak.....	159
<b>Tabla No. 42:</b> Propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas evaluadas adicionando fibras tetra pak. ....	160
<b>Tabla No. 43:</b> Valores de estabilidad – flujo en mezcla asfáltica adicionando fibras tetra pak. ....	161
<b>Tabla No. 44:</b> Pesos de las briquetas para ensayo de choque térmico.....	163
<b>Tabla No. 45:</b> Propiedades volumétricas de las briquetas elaboradas para ensayo de choque térmico. ....	164
<b>Tabla No. 46:</b> Parámetros de estabilidad-flujo de las briquetas ensayados por choque térmico.....	166
<b>Tabla No. 47:</b> Condición de aceptación de acuerdo a las gravedades específicas (the asphalt institute, mix design methods for asphalt concrete, 1974). ....	168
<b>Tabla No. 48:</b> Criterios Marshall para VMA (NEVI-12 T. 8.-4., 2013).....	171
<b>Tabla No. 49:</b> Pesos y proporciones exactas para mezcla Marshall tradicional diseñada. ....	172
<b>Tabla No. 50:</b> Pesos y proporciones exactas para mezcla adicionada con limadura metálica diseñada. ....	177
<b>Tabla No. 51:</b> Pesos y proporciones exactas para mezcla adicionada con alambre de neumáticos fuera de uso diseñada. ....	183
<b>Tabla No. 52:</b> Pesos y proporciones exactas para mezcla adicionada con fibras tetra pak diseñada. ....	189
<b>Tabla No. 53:</b> Resumen de resultados en mezclas asfálticas diseñadas. ....	190
<b>Tabla No. 54:</b> Precios unitarios de materiales en mezcla asfáltica tradicional (CONSTRUARENAS y Vinueza., 2014). ....	193

<b>Tabla No. 55:</b> Pesos específicos de los materiales presentes en la mezcla asfáltica tradicional.....	194
<b>Tabla No. 56:</b> Volúmenes presentes en 1 m <sup>3</sup> de mezcla asfáltica tradicional.....	195
<b>Tabla No. 57:</b> A.P.U. de mezcla asfáltica Marshall tradicional.....	196
<b>Tabla No. 58:</b> Precios unitarios de materiales en mezcla asfáltica adicionada con limadura metálica (CONSTRUARENAS, Vinueza y Diario El Tiempo, 2013).....	197
<b>Tabla No. 59:</b> Volúmenes presentes en 1 m <sup>3</sup> de mezcla asfáltica adicionada con limadura metálica. ....	198
<b>Tabla No. 60:</b> A.P.U. de mezcla asfáltica adicionada con limadura metálica. ....	199
<b>Tabla No. 61:</b> Precios unitarios de materiales en mezcla asfáltica adicionada con fibras metálicas de N.F.U. (CONSTRUARENAS, Vinueza y Diario El Tiempo, 2013). ....	200
<b>Tabla No. 62:</b> Volúmenes presentes en 1 m <sup>3</sup> de mezcla asfáltica adicionada con fibras metálicas de N.F.U. ....	201
<b>Tabla No. 63:</b> A.P.U. de mezcla asfáltica con fibras metálicas de N.F.U. ....	202
<b>Tabla No. 64:</b> Precios unitarios de materiales en mezcla asfáltica adicionada con fibras tetra pak (CONSTRUARENAS, Vinueza y Diario El Tiempo, 2013).....	203
<b>Tabla No. 65:</b> Volúmenes presentes en 1 m <sup>3</sup> de mezcla asfáltica adicionada con fibras tetra pak. ....	204
<b>Tabla No. 66:</b> A.P.U. de mezcla asfáltica adicionada con fibras tetra pak.....	205
<b>Tabla No. 67:</b> Costo unitario de mezclas asfálticas. ....	206
<b>Tabla No. 68:</b> Diferencia en porcentaje de mezclas asfálticas diseñadas con relación al precio del mercado.....	207
<b>Tabla No. 69:</b> Resultados de los parámetros evaluados en las muestras ensayadas por choque térmico.....	208
<b>Tabla No. 70:</b> Resultados de los parámetros analizados en las muestras diseñadas en el capítulo VI. ....	209

## RESUMEN

El proyecto de tesis **“DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE MODIFICADAS CON TETRA PAK, ALAMBRE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO Y LIMADURA METÁLICA RECICLADOS CON LIGANTE ASFÁLTICO AC-20”**, tiene como finalidad brindar una alternativa al uso de materiales reciclados al ser utilizados como material constitutivo de mezclas asfálticas, detallando su composición, dosificación, ventajas y desventajas de su adición en mezclas asfálticas en caliente frente a otros polímeros existentes en el mercado. Para el desarrollo de esta investigación se han utilizado agregados provenientes de la planta de CONSTRUARENAS, ubicada en el sector de Palugo, Quito-Ecuador, y el cemento o ligante asfáltico proveniente de la planta de la empresa CHOVA del Ecuador ubicada en el sector de Cashapamba, Rumiñahui-Ecuador.

**PALABRAS CLAVES:** Mezcla Asfáltica, Tetra Pak, Fibras Metálicas, Limadura Metálica, Ligante Asfáltico.

## **ABSTRACT**

The thesis project "**DESIGN OF HOT ASPHALT MIXTURES MODIFIED WITH TETRA PAK, WIRE TYRE FROM OUT OF USE AND METAL FILING RECYCLED WITH ASPHALT BINDER AC-20**", aims to provide an alternative to the use of recycled materials as being elapsed constituent material of asphalt mixtures, detailing its composition, dosage, advantages and disadvantages of its addition in hot mix asphalt over other polymers on the market. For the development of this research has been used aggregates from the plant CONSTRUARENAS located in Palugo, Quito-Ecuador, and cement or asphalt binder from CHOVA company's plant of Ecuador located in Cashapamba, Rumiñahui-Ecuador.

**KEYWORDS: Mix Asphalt, Tetra Pak, Metal Fibers, Metal Filing, Asphalt Binder.**

## **CAPÍTULO I**

### **1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

#### **1.1. INTRODUCCIÓN**

Sin duda la magnitud de desarrollo vial de una nación evidencia el nivel de desarrollo socio-económico de la misma, basados en esto, el Ecuador en los últimos años ha venido mostrando un gran desarrollo en este aspecto a través de la construcción de vías de comunicación de primer orden, es decir que cumplan con los estándares de calidad, durabilidad y seguridad.

Para lograr estos objetivos se han desarrollado asfaltos modificados a base de polímeros los cuales mejoran la eficiencia del material, pero no representan una alternativa ecológica en beneficio del medio ambiente.

Debido a la necesidad de mitigar el daño ambiental, se debe insistir en la reutilización y canalización de elementos reciclados para mejorar las mezclas asfálticas existentes en la actualidad, y que estos pasen a formar parte de la estructura de las mezclas asfálticas desarrollando así un material con mejores características.

Actualmente una de las principales medidas a tomarse en cuenta por la población mundial es reducir los índices de contaminación, razón por la cual a nivel mundial se están desarrollando proyectos que impulsan y promueven el reciclaje, tratamiento y reutilización de desechos; en este proyecto se analiza el uso de 3 tipos de desechos generados tanto por el sector industrial, así como también a nivel doméstico, estos son los desechos generados por los vehículos, cómo los neumáticos o llantas (alambre o fibra metálica que estos poseen), la limadura metálica producida como desperdicio en talleres

mecánicos, metalmecánicos y corte de acero en general, y los desechos de tetra pak que se usan en los envases de productos alimenticios los mismos que no son biodegradables y por ende entran dentro del contexto de materiales a reutilizarse en pro del cuidado al medio ambiente.

Para comprender mejor estos materiales y su impacto con respecto al medio ambiente, es necesario realizar una breve descripción de sus características, así tenemos:

### **1.3.1. LIMADURA METÁLICA.**

Las limaduras, también conocidas como: Torneaduras, virutas, o esquirlas provenientes del amolado, aserrado, limado, y recortes de estampado o de corte de piezas metálicas, forman parte de la chatarra o desperdicios y desechos de fundición de hierro o acero.

La chatarra en sí de la cual forma parte la limadura metálica, representa un desecho cotidiano en la industria ecuatoriana y la limadura específicamente en aquellas dedicadas al moldeo de piezas de acero, “en el país según el Ministerio de Industrias y productividad se recuperan anualmente unas 390 mil toneladas de metal, una parte la utiliza la industria local como una alternativa ante los elevados costos de la materia prima virgen; la otra parte se exporta”. (Vistazo, 2014)

Al conocer que el reciclaje de metal es un proceso cíclico es decir se puede reciclar de forma indefinida de diferentes maneras y dando paso a su uso como materia prima en múltiples productos, hace prácticamente innecesaria la explotación minera o por lo menos la reduce de manera considerable ya que se puede ahorrar un 80% del costo de productos

de acero partiendo de material reciclado como materia prima frente a este mismo proceso partiendo de la fuente mineral, mitigando en cierta manera la contaminación que produce la minería (Vistazo, 2014).

En el país además se están promoviendo la reutilización de desechos metálicos a través de la premiación a aquellas entidades que dinamicen el reciclaje y acopio de residuos sólidos, proyectos como el que implementa “El MINISTERIO DEL AMBIENTE ECUADOR (MAE), a través del Programa Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (PNGIDS), está promoviendo los procesos de recolección, aprovechamiento y disposición final de estos desechos, que se producen en los hogares e industrias ecuatorianas, es a partir de este punto que el ministerio otorgó reconocimientos a los GADS (Gobiernos autónomos descentralizados), que están implementado las mejores prácticas en sus jurisdicciones, realizando la tecnificación del reciclaje y separación de desechos” (MAE, 2013), entre los cuales tenemos a la limadura metálica, la cual será utilizada en el presente proyecto.

### **1.3.1. FIBRA METÁLICA DE NEUMÁTICO FUERA DE USO (N.F.U).**

Las fibras metálicas de Neumáticos Fuera de Uso (N.F.U), se encuentran presentes en todos los neumáticos específicamente en el área del talón, estos en realidad forman un aro de alambres recubiertos de cobre para evitar la corrosión de los mismos debido a la humedad y separados entre ellos por caucho, su función es unir al conjunto en sí de la llanta.



En el Ecuador el reciclaje de este material esta un tanto relegado debido principalmente a su nivel de demanda, y en cierto modo aunque a un nivel bajo a la dificultad de su extracción ya que se necesita de un extractor mecánico para separarlo del conjunto de caucho elastómero, a pesar de esto en la Ciudad de Quito se realiza este proceso de manera artesanal. Como producto de esta investigación de darse los resultados, se podría potenciar el uso de este material dando lugar a una opción empresarial para el reciclaje en masa de este producto, el cual al no ser tratado tiene como destino final generalmente los botaderos a cielo abierto produciendo un alto nivel contaminante conjuntamente con el resto de los N.F.U.

Según datos del MAE, “en nuestro país se desechan anualmente millones de neumáticos de diferentes dimensiones, de estos solo un porcentaje de ellos son reutilizados en procesos de reencauchado y otros en elaboración artesanal de refacciones vehiculares, pero la mayor parte es incinerada o depositada en rellenos sanitarios al aire libre, generando daños ambientales a través de emisiones de gases que contienen partículas nocivas para el entorno, en otros casos se ha tomado como opción el almacenamiento de estos neumáticos usados, sin tomar en cuenta que producen problemas de estabilidad por la degradación química parcial que éstos, las montañas de neumáticos forman arrecifes donde se proliferan roedores, insectos y otros animales dañinos.” (MAE, 2013).

Uno de los procesos más seguros y no contaminantes para la reutilización de los elementos de llanta reciclado es la extracción mecánica que permite obtener el material (fibra metálica de N.F.U.) como materia prima, por ser un proceso puramente mecánico los productos resultantes son de alta calidad, limpios de todo tipo de impurezas, lo que

facilita la utilización de estos materiales en nuevos procesos y aplicaciones, ayudando de esta manera al medio ambiente a través de:

- Recuperación de materias primas: trozos y granulados de goma, polvillo de carbón, negro de humo, fibras metálicas (alambres), telas y telas pulverizadas.
- Eliminación de un desecho no biodegradable y no compactable de difícil manipulación y de compleja disposición final, ya que es común que los neumáticos vuelvan a aparecer en la superficie luego de enterrados.
- Reducción de la contaminación de cursos de agua, calles, caminos, terrenos baldíos y campos.
- Reducción de la posibilidad de que se produzcan incendios con la consiguiente contaminación del aire, suelo y cursos de agua si los hubiere.
- Reducción de la posibilidad de agua estancada, evitando la proliferación de insectos transmisores de distintas enfermedades.
- Ahorro en la extracción de piedras y otros materiales inertes de las canteras, cavas y ríos, para la construcción capas asfálticas
- Mejoramiento en el precio y calidad de los asfaltos.
- Reducir las operaciones de mantenimiento de carreteras.

En el año 2012 en Lima-Perú se utilizó concreto adicionado con fibras metálicas en un planta, ubicada en la zona industrial de Lurín la cual utilizará el gas natural como principal fuente energética.

Es un proyecto especial, dado que se trata de una planta completamente robotizada. Por ello requiere de una superficie de alta planimetría, sin juntas, lo cual conlleva a una calidad del concreto con una mezcla especial, de baja contracción y temperatura controlada.

La fibra de acero se adicionó en obra ya que para tener un buen resultado el concreto debe mantener ciertas características. La idea de añadir la fibra en la obra responde a la necesidad de controlar la exacta dosificación según los requerimientos del cliente.

“Se inició los trabajos de vaciado el lunes 6 de febrero del 2012 con un promedio de 800 m<sup>2</sup>/día, llegando a ejecutar hasta 1200 m<sup>2</sup>/día. El volumen promedio diario de concreto utilizado fue de 128 m<sup>3</sup>, abastecidos en 4 horas, alcanzando a vaciar mixers de 8m<sup>3</sup> hasta en 4 minutos, haciendo que el vaciado de losa sea fluido, permitiendo que no haya problemas en el acabado de losa que requería el cliente.” (UNICON, 2012).

### **1.1.3. TETRA PAK**

El envase tetra pak, consiste de un envase formado por 4 capas, como lo son cartón, papel, una capa de polietileno y otra de aluminio cada una de estas capas tiene sus propias características y funciones dentro del conjunto como producto final, como por ejemplo el cartón y el papel que tiene un origen vegetal y cuya función es dar una estructura sostenible al envase y a su vez hacerlo liviano, por otra parte tenemos al polietileno que es un plástico, y cuya función es la de confinar y sellar a los líquidos aislándolos del exterior, y por último el aluminio que es un metal, y cuya función es la de preservar a los

productos frente al oxígeno presente en el exterior y mantenerlos en buen estado sin la necesidad de refrigeración.

A nivel de reciclaje, el envase tetra pak, está formado por material biodegradable y biodegradable en proporciones definidas, por tanto de no ser reciclado la parte no biodegradable tardaría años en descomponerse. En la actualidad, existen métodos de reciclaje para dicho envase los cuales permiten reutilizar en un alto porcentaje los materiales de los que está compuesta.

En el año 2012 se inició un proyecto de investigación denominado GREENROAD en el que participan el Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (Giteco), la Universidad de Cantabria, el Ayuntamiento de Santander que tiene como objetivo mejorar la sostenibilidad en la construcción de infraestructuras viales mediante la puesta en práctica de iniciativas sostenibles, en este caso concreto, de asfalto ecológico fabricado a partir de productos reciclados. Fruto de estas investigaciones llevadas a cabo dentro de este proyecto, se iniciaron los primeros trabajos de aplicación y extendido en la Avenida del Faro de Santander – España de un asfalto cuya composición contiene más de un 90% de productos reciclados (Sanchez, 2012).

Se han desarrollado y validado varios tipos de mezclas asfálticas que contienen elementos de deshecho como escoria negra procedente de la fabricación de acero, residuos del fresado de las propias carreteras y asfalto modificado con neumáticos fuera de uso (N.F.U.) (Sanchez, 2012).

## 1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Un objetivo de este tipo de investigaciones es la reutilización de desechos, conservación del medio ambiente, y el ahorro de energía aprovechándolos como materia prima para nuevos productos, por estos motivos se vuelve esencial la investigación de diferentes mecanismos que de cierta manera ayuden a mitigar los impactos ambientales ocasionados por desechos no biodegradables en este caso limadura metálica, alambre de neumáticos fuera de uso, y tetra pak.

Estos desechos contaminan el medio ambiente en cualquier área del planeta, ya sea las calles o las aceras, siendo expulsados al aire (quema de llantas), o simplemente desechados en un relleno sanitario esperando que el tiempo haga efecto sobre ellos, produciendo daños al planeta.

“Un informe preliminar del Ministerio de Industrias y Productividad (Mipro) estima que en Ecuador se recuperan anualmente 390 mil toneladas de metal, 135 mil de cartón, 45 mil de papel, 60 mil de plástico y 10 mil de vidrio. Una parte la utiliza la industria local como una alternativa ante los elevados costos de la materia prima virgen; la otra parte se exporta” (Vistazo, 2014).

Ante estos datos y usos que se les está dando a estos desechos reciclados podemos definir una alternativa de uso a los materiales metálicos y de cartón incluyéndolos como parte estructural de mezclas asfálticas para luego analizar, interpretar, evaluar los resultados y mediante ellos brindar una opción eficiente y económica al mercado de este producto.

Por otra parte ante la necesidad de rehabilitar las condiciones actuales que presentan algunas capas de rodadura en las carreteras y caminos de la red vial como lo son la presencia de fallas como por ejemplo las fisuras, cuando los esfuerzos o deformaciones exceden valores de fatiga entre otras razones por el endurecimiento del asfalto lo cual incrementa la rigidez de la superficie asfáltica y se torna frágil y propensa a fisurarse bajo esfuerzos por tensión ocasionados por el tránsito estas fisuras en el pavimento constituyen el inicio del deterioro de la carpeta asfáltica, debido a que a través de ellas se produce infiltración de aguas superficiales, la cual provoca deformaciones de la sub estructura y a mayor tiempo afectará a la estructura total del pavimento, además las quejas y críticas por parte de los usuarios que hacen uso de las vías y que corresponden a muchos sectores de la sociedad no se hacen esperar provocando malestar para ellos y la necesidad de proporcionar una solución a los mismos por parte de las autoridades y los profesionales del país, ya que se trata del medio de comunicación, transporte y comercio existente para productos y peatones los cuales promueven el desarrollo de la nación. Se han desarrollado polímeros que adicionados al asfalto mejoran las características de adhesión entre partículas, pero que a su vez producen una mayor inversión para el constructor.

Para dar una solución a estos problemas se inicia la búsqueda de nuevas metodologías que incluyan nuevos materiales brindando la posibilidad de tener mejores pavimentos de gran calidad y bajo costo.

De acuerdo a estas necesidades el presente proyecto se vuelve de gran importancia como una alternativa a la reutilización de desechos, de igual manera observando los exitosos trabajos llevados a cabo en diferentes partes del mundo y con el objetivo de

encontrar el mejor resultado para la reutilización de diversos materiales (limadura metálica, fibras metálicas, y tetra pack) reciclados se obtengan mejores o los mismos resultados de los trabajos antecesores donde involucraban otros materiales o la combinación de varios de ellos.

Con la adición de productos industrializados como el metal y el tetra pack se pretende contribuir a la mejora de la calidad de las mezclas asfálticas mediante la obtención de nuevos materiales por incorporación de residuos de insumos empleados en la fabricación de neumáticos, partes motrices, y envases desechables.

Además, el proyecto se prevee de incluir residuos de metal y cartón en el mezclas asfálticas los cuales ayudarán a reducir los niveles de estos materiales en el ambiente por otra parte ayudarán a mejorar las propiedades y reducir los costos en la construcción de mezclas asfálticas, también servirán como promotores del desarrollo de empresas que dediquen su reciclado a convertirlos en materia prima para su uso en vialidad.

Este proyecto cumple con el séptimo objetivo del Programa de Gobierno 2013-2017 Buen Vivir, el cual es: “Garantizar los derechos de la naturaleza y promover la sostenibilidad ambiental, territorial y global” en el apartado Revolución Ecológica, apuesta por la transformación productiva bajo un modelo eco eficiente con mayor valor económico, social y ambiental ( Secretaria Nacional de Planificación y desarrollo, 2013).

En este objetivo, se plantea como prioridad el control y la mitigación de la contaminación y la producción, el consumo y el pos consumo sustentables.

### **1.3. OBJETIVOS DEL PROYECTO**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Diseñar una mezcla asfáltica en caliente, para su uso en tráfico pesado que incluya en su constitución materiales reciclados como: 1) limadura metálica, 2) alambre de neumáticos fuera de uso, 3) fibras de tetra pack recicladas, analizando las propiedades principalmente de estabilidad y en las mezclas determinar la de mejor condición para su uso y producción.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Presentar información acerca de la composición y disposición del reciclaje y reutilización de fibras de tetra pack, fibras metálicas de neumáticos fuera de uso, y limadura metálica reciclada.
- ✓ Diseñar una mezcla asfáltica usando en cada diseño los procedimientos del método Marshall adicionando 1) limadura metálica, 2) fibras metálicas de neumáticos fuera de uso, y 3) fibras de tetra pack.
- ✓ Caracterizar los agregados y el asfalto utilizado en la mezcla asfáltica.
- ✓ Comparar y Analizar los resultados obtenidos de las 3 mezclas, las desarrolladas con: 1) limadura metálica 2) fibras metálicas de neumáticos fuera de uso, 3) fibras tetra pack, y en base a estos determinar la mezcla asfáltica que brinde los mejores resultados en comparación con las mezclas asfálticas diseñadas tradicionalmente.



#### **1.4. METODOLOGÍA**

Para el desarrollo del proyecto se ha procedido conforme al método analítico-práctico, el cual consiste en descomponer el objeto de estudio separando cada una de las partes del tema general para estudiarlas en forma individual con el fin de llegar a un resultado común y coherente en base al análisis de los resultados presentados mediante la investigación.

Con esta premisa procedemos a detallar los pasos que se aplicaron para el desarrollo del proyecto:

1. Poner en práctica los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de Ingeniería Civil, específicamente los adquiridos en el área vial.
2. Recolectar y compilar toda la información disponible y aplicable al proyecto a desarrollarse a través de diferentes fuentes como lo son textos físicos y digitales, información en internet, artículos y boletines técnicos, notas de clase, entre otros.
3. Usar y aplicar los contenidos existentes en los textos de control de calidad del asfalto (Normas de ensayos de laboratorio ASTM (American Society for Testing Materials) y Normas del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOB)). De acuerdo a esto, los ensayos aplicables para el proyecto son los siguientes:

**Tabla No. 1** Normas y Ensayos de aplicación.

<b>PARÁMETRO</b>	<b>ENSAYO</b>	<b>NORMA ASTM</b>
<b>CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS</b>	Muestreo de Áridos	D75
	Reducción de muestras a tamaño de ensayo	C702
	Granulometría de Agregados	C136-03
	Gravedad específica de Ag. Grueso	C127-04
	Gravedad específica de Ag. Fino	C128-04
	Degradación o Abrasión de Ag. Grueso	C131
	Equivalente de arena	D2419
<b>ANÁLISIS VOLUMÉTRICO DEL ESPECIMEN</b>	Gravedad específica bulk	D2726
	Densidad Máxima Teórica (RICE)	D2041
<b>CARACTERIZACIÓN DEL C.A.</b>	Penetración	D5
	Punto de ablandamiento	D95
<b>INNOVACIÓN</b>	Ensayo de choque térmico	-

En la tabla No. 1, se observan los diferentes ensayos que se aplican tanto a los agregados, al ligante asfáltico, y a la misma mezcla de acuerdo a las normas ASTM.

Se aplica un ensayo de choque térmico a cada mezcla elaborada con el porcentaje óptimo de material modificador, para analizar los resultados cuando son sometidas a cambios bruscos de temperatura.

Este ensayo es aplicado para tener un parámetro de evaluación de la mezcla asfáltica frente a los cambios de temperatura que se producen en pavimentos ecuatorianos, ya que tenemos zonas que llegan a los 0°C y durante el día elevan su temperatura, con el objetivo de tener una mejor representación de la acción del cambio de temperatura en mezclas asfálticas tomando como referencia al ensayo de peladura (ASTM D-3625 , 1996) (CARLOS CURCO, BYRON LEÓN, 2013).

En esta ocasión se evalúa el efecto del cambio brusco de temperatura (choque térmico) sobre la estabilidad y flujo de la mezcla compactada, elaborándose para ello 2 mezclas compactadas con los porcentajes óptimos de asfalto obtenidos, de acuerdo a los ensayos realizados, y sometiendo estas a lapsos de 10 minutos de cambio de temperatura (frío a 0 °C, caliente a 60 °C) antes de su ensayo final en la prensa Marshall, se anotan y observan los efectos sobre la superficie de cobertura con asfalto sobre los agregados.

## **CAPÍTULO II**

### **2. RECICLAJE Y REUTILIZACIÓN DE LIMADURA METÁLICA**

#### **2.1. JUSTIFICACIÓN DEL RECICLAJE**

El reciclaje hoy en día se ha vuelto un tema muy difundido y comentado a nivel mundial, la razón principal de este es priorizar el cuidado del medio ambiente el cual se ve afectado a diario debido a la contaminación generada por la población a nivel mundial, de diversas maneras que van desde la producción de desechos en el hogar a la producción de desechos tóxicos y contaminantes a nivel industrial, estos desechos pueden ser de diversos materiales los cuales en ausencia de una cultura de reciclaje pasan a formar parte de los desechos no biodegradables que van a ser depositados finalmente en rellenos sanitarios a cielo abierto, contaminando el suelo.

Uno de estos desechos de los que hablamos anteriormente es el metal, que luego de ser industrializado y utilizado como materia prima de diversos objetos usados por el hombre, al cumplir su vida útil en dicho elemento pasa a ser desechado, y si este no es correctamente tratado pasa a formar parte del proceso descrito anteriormente, además de esto la falta de reciclaje de este elemento da lugar a la necesidad de conseguir nueva materia prima.

Para obtener este material el hombre ha recurrido como siempre a la naturaleza, a través de yacimientos los cuales están siendo poco a poco agotados debido a esto se hace necesaria una inversión mayor en cuanto a su explotación ya que la inversión sube, además estos depósitos se encuentran más adentrados en la corteza terrestre haciéndose necesarios métodos de explotación más tecnificados y contaminantes por la utilización de

maquinarias para la excavación de estos yacimientos, sin hablar del impacto ambiental que estos producen (Vistazo, 2014).

Para dar una salida comercial a estos desechos metálicos existen varias empresas las cuales han visto en el reciclaje de este material una oportunidad de negocios, ya que si hablamos de un material que debe ser explotado y posteriormente transportado desde su lugar de origen hasta las plantas de fabricación y procesamiento de materiales metálicas y posteriormente exportados a los países en donde sea necesario su uso en sus distintos tipos, formas y consistencias, el reciclaje de estos materiales para su reutilización se torna un proceso rentable ya que provoca una disminución de la importación de estos materiales y por ende un ahorro en la economía productiva, es así que en varios países se ha desarrollado líneas de reciclaje y procesado de estos materiales desechados, tratando de mitigar por una parte el daño al medio ambiente y por otro generar ahorro a la economía del país, además de la generación de frentes de trabajo, es decir empleo en este sector productivo.

España a través de máquinas fragmentadoras recicla alrededor “1.2 millones de toneladas de acero y otros metales lo cual contribuye a la conservación del medio ambiente reduciendo en un 80% las emisiones de gases de efecto invernadero a las atmósfera, favoreciendo el cumplimiento de las directrices establecidas en el Protocolo de Kyoto para el horizonte 2010” (INTEREMPRESAS, 2008).

En el Ecuador tenemos a la empresa RECICLAMETAL, la cual se dedica al reciclaje de metales y materiales electrónicos desechados para luego ser tratados por métodos destructivos siendo así reducidos a tamaños manejables y sobre todo compactables, con el fin de ser almacenados hasta su comercialización (RECICLAMETAL, 2011).

La empresa de acero ADELCA, ha creado y patrocinado centros de acopio para el manejo seguro y garantizado de la chatarra en el Ecuador, recibiendo en ellas todo tipo de metales (ADELCA, 2011).

A partir de todos estos datos podemos darnos cuenta que el reciclaje se torna un proceso esencial para la sociedad en el cual todos y cada uno de nosotros debemos colaborar en pro del medio ambiente formando parte del proceso activo de reciclaje, así como también formando una cultura de reciclaje, tomando conciencia de los danos que estamos generando hacia nuestra propia especie.

## **2.2. PRODUCCIÓN DE LIMADURA METÁLICA INDUSTRIAL**

La limadura metálica o limadura férrica no es más que el residuo de corte, molienda o simplemente trozos de acero u otros materiales metálicos generados como desecho por la industria del acero.



**Fig. 1:** Limadura metálica reciclada.

Debido a esto su historia se remonta en gran medida al desarrollo del hierro. En su mayor parte, han sido un producto de desecho de las acerías.

La siderurgia es denominada así por la técnica mediante la cual el hierro como un mineral es tratado y transformado para obtener de estos diferentes tipos del mismo o de sus aleaciones, iniciándose este desde su extracción hasta su producto final.

“El hierro se encuentra presente en la naturaleza en forma de óxidos, hidróxidos, carbonatos, silicatos y sulfuros. Los más utilizados por la siderurgia son los óxidos, hidróxidos y carbonatos” (WIKIPEDIA, 2013).

El hierro al ser extraído debe pasar por diferentes procesos de separación de ya que este se encuentra fusionado a elementos que deben ser desechados para lo cual son sometidas a procesos de separación ya sea por imantación o inmersión (densidad), existiendo inconvenientes en el uso de cada uno de ellos como lo son la pérdida de materiales no magnéticos en el primer método y la humectación del material en el segundo

“Una vez realizada la separación, el mineral de hierro es llevado a la planta siderúrgica donde será procesado para convertirlo primeramente en arrabio y posteriormente en acero”.

Para aclarar el aspecto de la producción de limadura metálica debemos enfocarnos en las acerías, que en realidad son las que producen este material, al hablar de siderurgia estamos hablando de una empresa que se enfoca en la extracción y fabricación de materiales metálicas desde el mineral mismo, a diferencia de las Acerías las cuales se dedican a producir o elaborar acero a partir de otro acero o hierro.

Para el presente trabajo se enfoca el uso del material desechado de esta empresa, ya que en los procesos de corte o molienda de materiales metálicos se producen limaduras las cuales al no tener un alto valor comercial o simplemente son basura por lo general son desechados.

Este material lo podemos encontrar tanto a gran escala como en pequeñas industrias dedicadas a la venta y comercialización de productos de acero, a gran escala y mediante procesos sistemáticos y de control de calidad lo podemos encontrar en ADELCA Acería del Ecuador, en la cual mediante procesos realizados en hornos de arco eléctrico se producen polvos y escorias de acería.

También podemos encontrar este material en las pequeñas empresas las cuales dedican su actividad al corte de aceros y otros materiales que sirven como materia prima para otros productos más elaborados de acero, como lo son partes automotrices, de maquinaria de construcción, de maquinarias industriales, cerrajería en general, etc.

Para el presente proyecto se realiza el reciclaje, recolección y muestreo de este material en micro empresas, pero según los resultados que se obtengan se determina si es necesario realizar una recolección a gran escala de este material para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente, además esto también dependerá de las dimensiones y demanda del material de acuerdo a la magnitud de la obra a desarrollarse.

La limadura metálica es además utilizada en otros productos o usos ajenos al sector de la construcción como lo son las demostraciones de magnetismo, como núcleos de transformadores eléctricos, como ferro fluidos en el campo de la informática, y hasta en medicina “durante el siglo XIX se empleaban para preparar sustancias que se empleaban



como medicamentos reconstituyentes por sus propiedades anti anémicas” (WIKIPEDIA, 2013).

### 2.3. COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LIMADURA METÁLICA

La limadura metálica es un material heterogéneo en cuanto a sus componentes, es decir al ser un desecho del corte del acero u otros materiales metálicos, presenta diversos tipos o variantes de este mineral en su composición, es decir tenemos desechos como los citados a continuación (WIKIPEDIA, 2013):

- **Acero:** es una aleación de hierro con carbono el cual no debe ser superior al 2% en peso de su composición.
- **Cobre:** es un metal de transición el cual debido a su alta conductividad maleabilidad y ductilidad se ha convertido en la materia prima de los cables eléctricos.
- **Bronce:** es una aleación de cobre y estaño en proporciones no mayores al 20 %, fue de uso frecuente en la orfebrería, y en la actualidad su resistencia al roce y a la corrosión le da un gran uso en partes mecánicas y motrices.
- **Aluminio:** Es un metal no ferromagnético, el cual debido a su polivalente modo de uso es utilizado en diversos materiales y elementos en la actualidad como lo son los espejos, el papel aluminio, latas, aleado con otros metales, se utiliza para la creación de estructuras portantes y para fabricar piezas industriales de todo tipo de vehículos y calderería.
- **Estaño:** es un metal maleable resistente a la corrosión, es decir no se oxida con facilidad, usado como protector del cobre y del hierro en diversos productos.

Debido a esta presencia de diversos materiales en su composición la limadura metálica presenta en general las mismas propiedades y características de los metales como lo son (WIKIPEDIA Metal, 2014):

- **Tenacidad:** los metales son resistentes a las fuerzas de impacto como los golpes ya que presenta resistencia a fracturarse.
- **Apariencia:** Presentan un color opaco o de brillo metálico característico de su traslape entre la banda de valencia y de conducción en su estructura electrónica.
- **Conducción:** Son buenos conductores del calor, así como también de la electricidad.
- **Consistencia:** Son sólidas en condiciones ambientales normales, su punto de fusión es alto, sus fragmentos son duros debido a su tenacidad, y tienen una densidad alta, además también pueden ser dúctiles y maleables.

### 2.3.1. PROCESOS DE RECICLAJE

La limadura metálica al ser un producto de la molienda o corte de acero puede encontrarse de diferentes maneras.

Si esta requiere ser procesada a partir de la chatarra sigue los mismos procesos de reciclaje que el acero que ha cumplido su ciclo de vida útil, procediendo así de la siguiente manera:

- Se separan la chatarra en materiales simples y materiales complejos, los materiales simples son aquellos que no requieren ser desarmados o procesados para su clasificación, como pueden ser recipientes metálicos, canecas metálicas, tanques metálicos, etc.

El material compuesto en cambio es aquel que debe ser desarmado antes de ser clasificado en forma definitiva como lo son equipos y maquinarias obsoletas, en este proceso se involucra ciertos equipos que ayudan a desarmar este tipo de chatarra de la cual al involucrar proceso de corte del acero, produciendo limadura metálica durante el proceso entre estos equipos tenemos (RECICLAMETAL, 2011):

- **Equipo de Plasma:** Este equipo funciona a base de electricidad y aire comprimido produciendo un arco eléctrico que no produce oxidación en el material.
- **Equipo Oxicorte:** se utiliza cuando se trata de maquinarias obsoletas excesivamente grandes usa una combinación de gas propano y oxígenos los cuales llevan al material a su punto de fusión cortándolo de esta manera.
- **Equipo de peladora de cables:** Se utiliza para poder extraer el cobre y el aluminio de los cables obsoletos, separando el cable de su recubrimiento plástico y cortándolo en dimensiones apropiadas.
- **Equipo de corte con sierra circular:** Se utiliza para cortar de forma manual o mecánica los materiales metálicos desechados ya sea en planta o in situ.

En las acerías se procede al reciclaje de este tipo de materiales en forma de escorias y polvo de acero, a través de procesos automatizados y químicos aplicados a los hornos de arco eléctrico los cuales usan el mismo proceso del plasma descrito anteriormente para obtener los productos antes mencionados.

En el caso de las empresas dedicadas al corte de productos de acero la limadura se produce directamente de este proceso es decir debido a la fricción generada entre la sierra y el metal produce trozos ínfimos de material y polvo resultante del mismo proceso el cual

se recoge y almacena hasta su uso en diversos ámbitos ya sea de la construcción como en general.

Este tipo de desechos serán utilizados en el presente trabajo de investigación, priorizando al sector micro empresarial, ya que este es el sector que no tiene una cultura de reciclaje definida para sus desechos, los cuales queremos mitigar mediante la reutilización de los mismos.

### **2.3.2. TIPOS DE METALES RECICLADOS**

Los metales reciclados corresponden a diversos tipos o aleaciones del hierro, ya que provienen de diversas fuentes que recogen materiales que han cumplido su ciclo productivo útil, entre los materiales principales tenemos los siguientes (WIKIPEDIA, 2013):

- **Acero:** Presente en piezas mecánicas de uso automotriz o industrial, como por ejemplo motores fuera de uso ya sean de automóviles, motores industriales, cajas de cambios, partes de transmisión, etc. Estas serán tratadas de acuerdo a los procesos de reciclaje mencionados anteriormente, o en su defecto destinado a fundición.
- **Cobre:** Presente en los cables eléctricos desechados, los cuales por su alta conductividad eléctrica también se encuentran presentes en otros elementos que usan esta fuente para su servicio, debiendo ser correctamente separados de su protección aislante de caucho o plástico.
- **Bronce:** Presente en varias piezas de uso automotriz o industrial las cuales debido a su alta resistencia al desgaste son de uso general en aquellos elementos que requieren trabajar a fricción, como lo son bocines, copas de ensamblaje, topes mecánicos, etc.

Generalmente este material así como también el acero se vende en barras cilíndricas de diversos diámetros las cuales son usadas para la elaboración de las piezas anteriormente mencionadas, produciéndose en su corte la limadura de estos materiales.

- **Aluminio:** Presente en diversos tipos de marcos estructurales generalmente de vidriería o de soporte (estanterías), los cuales para ser ensamblados necesitan ser cortados, produciéndose así la limadura de este material.
- **Estaño:** Presente como agente protector del cobre en los alambres y cables eléctricos obsoletos y desechados, los cuales al pasar por una peladora de cables mecánicos producen su limadura.

*En la presente investigación se usa un material heterogéneo producto del corte de diversos materiales y su mezcla como material reciclado.*

### **2.3.3. PROPIEDADES DEL MATERIAL RECICLADO**

La limadura metálica conserva en gran parte las propiedades de los metales que forman parte de su composición, como la conductividad eléctrica, tenacidad y sus colores grises y brillantes, es decir que la limadura metálica trabajara en la mezcla asfáltica como un relleno férreo que se espera aumente su estabilidad, y dependiendo de los resultados mediante análisis detallado del resto de variables conserve o mejore las propiedades de la mezcla original tales como el porcentaje de vacíos de aire, el flujo, el porcentaje de asfalto absorbido, los cuales además depende de otras variables, como lo son los pesos específicos de agregados, el peso específico del asfalto, densidad máxima teórica, etc.

De esta manera tenemos las siguientes propiedades para este material (Instituto de Investigaciones Oceanológicas de Mexico, 2007):

- **Estado físico:** presenta un estado físico sólido, a temperatura ambiente.
- **Apariencia:** tiene una apariencia de color gris oscuro con tintes brillantes.
- **Olor:** este material no presenta olor alguno.
- **Solubilidad:** el material es insoluble al agua.
- **Ebullición:** presenta una temperatura de ebullición de 2872 °C
- **Fusión:** presenta una temperatura de fusión de 1535 °C.

Efectos de sobreexposición:

- **Inhalación:** el inhalar este material puede causar posibles irritaciones en el tracto respiratorio, tos y dificultad respiratoria.
- **Contacto con la piel:** El contacto directo de este material con la piel durante periodos extensos, puede causar irritaciones en la misma.
- **Contacto con los ojos:** el contacto de este material con los ojos puede causar Posibles irritaciones, conjuntivitis, declaración de la córnea.
- **Ingestión:** La ingestión de este material en altas dosis pueden causar disturbios gastrointestinales, dolor abdominal, náuseas, vómitos, acidosis y diarrea, decoloración de la piel, irritaciones en el tracto digestivo, daño al hígado.
- **Otros efectos:** Además las exposición excesiva a este material puede causar daños como: Bronquitis, neumoconiosis por Hierro (Siderosis), daño al hígado, diabetes, y anormalidades cardíacas.

**Riesgo de Incendio:**

- **Condición de Inflamabilidad:** Este material es ligeramente combustible.
- **Producto de combustión:** El agente de combustión presente en este material son los Óxidos de hierro.

## **CAPÍTULO III**

### **3 RECICLAJE Y REUTILIZACIÓN DE ALAMBRE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO**

#### **3.1 JUSTIFICACIÓN DEL RECICLAJE**

Como se sabe, el desarrollo ha cambiado las condiciones ambientales de la Tierra, produciendo entre otras cosas una masa amplia y a menudo incontables residuos sólidos. La protección del medio ambiente es por ahora un tema social con responsabilidad civil y legal.

El neumático usado es uno de los graves problemas a resolver, ya que es un material difícil de tratar, en particular, por sus características elastoméricas que son difíciles de recuperar si no se adoptan los procesos de trabajo adecuados.

La llanta está compuesta principalmente de caucho y otros componentes, esta se demora en degradarse más de 500 millones de años, por lo que nos obliga a nosotros como seres humanos, quienes somos los principales beneficiarios de este producto, a buscar métodos de reutilización, para poder así aprovechar este recurso y evitar más contaminación. (GIC CUENCA, 2011)

En nuestro país, solo en la ciudad de Cuenca se recolecta un aproximado de 18 toneladas de llantas mensuales según una encuesta realizada a la Empresa Municipal de Aseo (EMAC). La contextura del neumático ocupa demasiado espacio en el relleno sanitario y se convierte en uno de los desperdicios más difíciles de manejar, razón por la cual al término de su vida útil son eliminadas. El primer inconveniente que representan



las llantas fuera de uso es que ocupan mucho espacio, por lo que las personas las botan para evitarse molestias.

En el Ecuador, sólo 30% de los municipios tienen rellenos sanitarios, de los cuales no muchos tienen un lugar adecuado para la disposición de dichos desperdicios y, lo que es peor, no saben qué hacer con estos para evitar que se sigan acumulando. (Bustamante, 2011)

El Ministerio del Ambiente no tiene un protocolo establecido para que los municipios realicen el manejo de llantas en sus botaderos. Sin embargo esta entidad se encarga de controlar que los proyectos presentados por los gobiernos locales para la creación de rellenos sanitarios se cumplan. La acumulación de neumáticos a la intemperie representa un importante inconveniente para la salud, ya que en su interior se acumula agua proveniente de la lluvia, lo que se convierte en un foco de reproducción de mosquitos que pueden causar enfermedades.

Otra repercusión del inadecuado desecho de estos elementos es que existen personas que compran las llantas usadas para el comercio del reencauche, pero hay quienes para evitar la acumulación de esta basura prefieren quemarlas, con lo cual polucionan el aire.

Este proyecto de investigación particulariza el aprovechamiento de reciclado de los neumáticos fuera de uso, utilizando los alambres de ceja de llanta para adicionar a la mezcla asfáltica.



**Fig. 2:** Lantas quemadas.

**Fuente:** (GIC CUENCA, 2011)

## **3.2 COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS ALAMBRES DE NEUMÁTICOS.**

### **3.2.1 COMPOSICIÓN DE LOS ALAMBRES DE NEUMÁTICOS**

A continuación se describe la composición de los alambres de ceja para llantas o neumáticos. (EMCOCABLES, 2014)

**Masa de bronce.** Existen dos clases de alambres, los cuales se clasifican así:

- Normal: 0.3 a 0.7 ( g bronce / kg de alambre)
- Alta resistencia: 0.6 a 1.0 (g bronce / kg de alambre)

**Dimensión y tolerancia:**

- Diámetro: 0.94 mm
- Tolerancia: +0.05
- Redondez: 0.03 mm

**Adherencia del alambre bronceado del caucho:**

- Normal Tipo 1: 334 ( g bronce / kg de alambre)
- Normal Tipo 2: 380 ( g bronce / kg de alambre)
- Alta resistencia: 535 (g bronce / kg de alambre)



**Fig. 3:** Alambres de llanta durante su producción.  
**Fuente:** (EMCOCABLES, 2014)

### 3.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS ALAMBRES PARA CEJA DE NEUMÁTICOS.

Si se mira la sección de una llanta, se puede apreciar que en el interior de cada filo de la llanta, hay un atado de alambres de acero bañado en bronce. Sus características son las siguientes:

- **Acabado**

“El alambre debe presentar un terminado brillante y libre de contaminación, corrosión, defectos superficiales y su color debe ser uniforme en toda su longitud” (Norma Mexicana, 2004, párr.22).

- **Soldadura (uniones)**

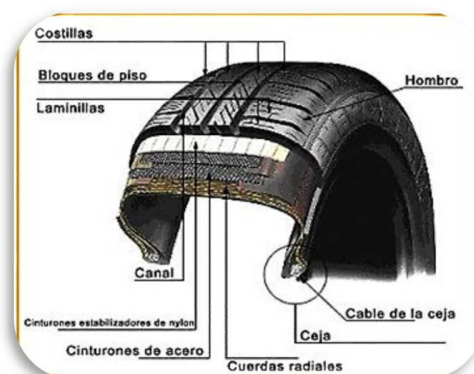
“El número de soldaduras o uniones permisibles en el alambre debe ser un máximo de 2 por carreta o bobina. Estas se hacen antes del bronceado y deben quedar lisas y uniformes, de manera que no aumenten el diámetro del alambre” (Norma Mexicana, 2004, párr.22).

- **Resina protectora (antioxidante)**

“El alambre debe tener un revestimiento de resina de 0,10 g/kg de alambre, para mejorar la resistencia a la corrosión” (Norma Mexicana, 2004, párr.24).

- **Adhesión**

“Las propiedades de adhesión del alambre dependen de las características intrínsecas de los diferentes compuestos utilizados, por lo que la especificación debe fijarse entre fabricante y consumidor” (Norma Mexicana, 2004, párr.24)



**Fig. 4:** Estructura de una llanta.  
**Fuente:** (Algosa full tires, 2014)

### 3.3 DISPOSICIÓN ARTESANAL

En Ecuador gran parte de las llantas luego de su uso, son almacenadas en depósitos clandestinos, techos o patios de casas de vivienda y en espacios públicos (lagos, ríos, calles y parques) con graves consecuencias en términos ambientales, económicos y sanitarios.

Las llantas usadas se convierten en el hábitat ideal para vectores como las ratas y mosquitos, que transmiten enfermedades como el dengue, la fiebre amarilla y la encefalitis equina.

Cuando las llantas usadas se disponen en botaderos a cielo abierto, contaminan el suelo, los recursos naturales renovables y afectan el paisaje. Adicionalmente, generan dificultades en la operación en los rellenos sanitarios.

Algunos subsectores utilizan las llantas usadas como combustible en sus procesos productivos en forma inadecuada.

El Ministerio de Salud (MSP), entregó aproximadamente 5000 neumáticos usados a más de 20 familias pertenecientes al gremio de gestores artesanales del sector Narancay bajo, ubicado en la Panamericana sur Km1, del cantón Cuenca, Provincia del Azuay con el objetivo de fabricar distintos productos, como:

- Planchas para revestimientos y baldosas.
- Productos moldeados y bandejas.
- Guardabarros de vehículos.
- Aislantes para cables.
- Cintas transportadoras y componentes reparadores.

- Juntas de expansión.
- Tuberías porosas de irrigación.
- Superficies no deslizantes, y cubiertas de barcos.
- Cintas de carga y descarga.
- Revestimientos para suelos de hospitales y pisos industriales.

También existen avances en el desarrollo de productos plásticos a partir de triturado de caucho, con adición de ligantes de tipo termoplástico o de ligantes tipo poliuretano pueden fabricarse diferentes materiales y objetos como suelas de zapatos, carcasas, láminas aislantes, respaldos, cascos de motorista, etc. (MAE, 2013)

La finalidad del Plan es movilizar las llantas usadas recolectadas en las diferentes provincias para que sean tratadas por gestores artesanales, quienes son beneficiados con esta labor que se convierte en una valiosa fuente de ingresos.

De esta manera, se promueve el derecho a tener un ambiente sano y equilibrado y se fomenta el reciclaje como una actividad económica rentable y amigable con el planeta. Así, el desarrollo social y ambiental avanza de manera integral y se encaminan hacia el Buen Vivir.

El Ministerio del Ambiente (MAE) busca soluciones integrales a la problemática de desechos en el país. Para lo cual se estructura un cronograma de actividades del Plan Nacional de Movilización de Neumáticos Usados, dando prioridad a zonas en las cuales se ha identificado la incidencia de dengue. En ese sentido, se ejecutan acciones multisectoriales para prevenir los riesgos en el ambiente y en la salud.

Las llantas tratadas técnica y ecológicamente por artesanos, son transformadas y utilizadas como materia prima para diferentes sectores como el de construcción, el automotriz y el artesanal.

Los resultados de la aplicación de este Plan se reflejan en la recolección y movilización de 42800 neumáticos usados del Archipiélago Galápagos. La región insular ecuatoriana se convirtió en la primera provincia libre de llantas usadas en Ecuador, en julio de 2012.

Así también, se recolectaron y movilizaron, 4000 neumáticos usados de la ciudad de Manta (24 de agosto de 2012), 7 800 de la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas (En enero de 2013), y 10200 de las ciudades de Manta y Portoviejo (febrero 2013). Es decir, un total de 64700 neumáticos.

El Plan Nacional de Movilización de Neumáticos Usados es solamente uno de los componentes de un proyecto más ambicioso que incluye la elaboración de un completo marco legal ambiental que regule la gestión de neumáticos usados. En ese sentido, el MAE se encuentra elaborando una Legislación Ambiental referente a la Gestión Integral de Neumáticos Usados. Esta ley, que permite que los procesos emprendidos sean sostenibles, se basa en principios ambientales. Su objetivo es establecer la aplicación del principio de responsabilidad extendida de importadores y fabricantes de los productos que al final de su vida útil se convierten en desechos peligrosos o especiales. La gestión de esta normativa fue aprobada por esta Cartera de Estado, el 20 de febrero de 2013, mediante Acuerdo Ministerial No. 020.



**Fig. 5:** Recolección de NFU-Galápagos.  
**Fuente:** (ANDES, 2012)

### **3.4 DISPOSICIÓN INDUSTRIAL (ESPOL, 2013)**

#### **3.4.1 FASES DEL RECICLAJE**

Para poder reciclar los materiales que conforman las llantas, es necesario que estas se sometan a los siguientes procesos o fases:

- **Destalonamiento:** es la remoción de los alambres de acero.
- **Trituración:** es la reducción volumétrica de la llanta entera a trozos más pequeños, esta operación está compuesta por dos fases: la trituración primaria y la trituración secundaria.
- **Granulación primaria:** es la reducción volumétrica de los trozos de llantas (provenientes de las fases de trituración) en granos.
- **Granulación secundaria** (refinar el grano): para obtener un grano aún más fino y seleccionar los granos en base a su tamaño.



- **Desmetalizado** (separación magnética del acero): Esta es una unidad que se emplea para separar el hierro de los demás materiales.
- **Aspiración de polvos** (Limpieza): son los sistemas de extracción para la aspiración de polvos de tela y de goma. Este sistema de 'aspiración de polvos' está formado por: el ciclón reductor de polvos, electroaspirador, roto válvulas, filtro de mangas y las tubaciones.

### **3.4.2 MAQUINARIAS PARA LA EXTRACCIÓN Y SEPARACIÓN DEL ALAMBRE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO.**

#### **Destalonadora o descejadora**

Esta máquina se utiliza para extraer el anillo de alambres de acero que se encuentra en el interior (en el talón) de la llanta de camión. Cada llanta cuenta con dos anillos, los cuales sino son extraídos, pueden comprometer seriamente la eficiencia de las fases sucesivas de la línea, debido a la dureza de los alambres de acero.

El proceso de destalonamiento es esencial en la obtención de los alambres de acero, ya que al extraer el alambre de talón antes de triturar la llanta permite que el producto final sea más limpio y haya menos desgaste en las partes de la trituradora que están en movimiento.



**Fig. 6:** Destalonadora.  
**Fuente:** (VIVO EN ITALIA, 2009)

### **Trituradora (primaria)**

Esta máquina se encarga de la primera trituración de la llanta, Por lo general este tipo de máquinas cuentan con transmisión hidráulica y con mínimo dos ejes (rotores) en los cuales se encuentran las cuchillas de corte. El resultado dicha operación son grandes trozos de llantas de tamaño no uniforme.



**Fig. 7:** Trituradora primaria  
**Fuente:** (VIVO EN ITALIA, 2009)

### **Trituradora (secundaria)**

La trituración secundaria la realiza otra máquina trituradora la cual reduce los trozos de llantas provenientes de la primera fase, en pedazos aún más pequeños, motivo por el cual este tipo de máquina debe contar con una parrilla o red metálica para la calibración del tamaño del material en la salida.



**Fig. 8:** Trituradora secundaria  
**Fuente:** (VIVO EN ITALIA, 2009)

### **Granulador primario**

El granulador o molino granulador es la máquina que se encarga de “granular” los pedazos de llantas provenientes del triturador secundario, la dimensión de los granos que se logra obtener con el granulador es de 16mm.



**Fig. 9:** Granulador primario  
**Fuente:** (VIVO EN ITALIA, 2009)

### **Separación del acero ‘armónico’ (desmetalizado)**

Esta operación separa el 99% del acero “armónico” presente en las llantas, el acero es removido por medio de un separador magnético el cual cuenta con una banda transportadora que se ocupa de conducir el metal hacia un punto de recolección (cajón/contenedor).



**Fig. 10:** Separador magnético  
**Fuente:** (VIVO EN ITALIA, 2009)

### **Granulador secundario (refinación y selección del grano)**

Si el material granulado (granos de tamaño 0-20mm) no contiene material textil, este es conducido por medio de una banda transportadora a un cernidor rotativo el cual se encarga de seleccionar los granos en diferentes grupos según su tamaño.

En este caso la criba (una especie de cernidor o tamiz) rotativa es alimentada por un tornillo sin fin o “tornillo de Arquímedes”, la criba tiene 3 parrillas con 3 diferentes tamaños de orificios con diámetros que van de 1 a 7mm. Durante el proceso de “cribatura”, es decir la separación granulométrica, los granos van a caer en diferentes tolvas contenedoras las cuales en su parte inferior tienen enganchados big-bags (grandes sacos), de manera que durante la caída los granos se depositen en los sacos.



**Fig. 11:** Granulador secundario  
**Fuente:** (VIVO EN ITALIA, 2009)

### **3.5 CARACTERÍSTICAS DE LA FIBRA DE LLANTA QUE HA DE TOMARSE EN CUENTA PARA DECIDIR QUE FORMEN PARTE DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA.**

Luego que se ha descrito los procesos de extracción y separación del alambre de neumáticos se explicará algunas ventajas que presentan sus características anteriormente mencionadas en el ítem 3.2.2 para ser adicionadas a una mezcla asfáltica. Estas son:

- Alta resistencia a la tracción al igual que alta ductilidad (alargamiento)
- Empaquetado especial para proteger contra la corrosión y destinada a prolongar la vida útil
- Mayor adherencia: recubrimiento de resina evita la oxidación.
- El cable mantiene su forma recta después de desenrollar y no acumula tensión por torsión.

- Resistencia a la tracción
- Resistencia a la tracción regular



**Fig. 12:** Alambre de llanta.

## CAPÍTULO IV

### RECICLAJE Y DISPOSICION DE TETRA PAK.

#### 4.1 JUSTIFICACIÓN DEL RECICLAJE

En Ecuador se produce cerca de 7800 toneladas de envases para alimentos al año en el país. Estos, luego de consumirse en el mercado, iban a dar a los rellenos sanitarios. Desde el año 2010, la empresa privada y comercializadoras buscan dar incentivos a recicladores nacionales para que le ayuden a reducir el impacto en el ambiente. Los envases Tetra Pak están compuestos en un 75% de cartón, 20% de polietileno (plástico) y 5% de aluminio. Estos materiales se aprovechan para generar dos productos:

1) tableros para interiores (de cartón, polietileno y aluminio) que reemplazan la madera natural y 2) cubiertas para exteriores (de polietileno y aluminio) resistentes a humedad y a condiciones climáticas como las que existen en la Amazonía, hoy su principal mercado.

(Revista Líderes, 2012)



**Fig. 13:** Poli-aluminio de envases Tetra Pak

Una empresa ecuatoriana, recicla al año 5.2% (390 toneladas) de envases Tetra Pak, aunque aún está lejos de países como Brasil que recicla un 22%. Para obtener la materia

prima, Tetra Pak realizó campañas y colocó 260 puntos de acopio en oficinas y escuelas. Paga 0,10 centavos por kilo de polietileno y aluminio. Tetra Pak trabaja acuerdos similares en Guayaquil y Cuenca. (Ecuaplastic, 2012)

Tejas, planchas de poli-aluminio y casas para mascotas se elaboran con envases reciclados de Tetra Pak. Las planchas de poli-aluminio han generado interés en el sector avícola. Se usan sobre todo como cubiertas en los galpones de crianza de aves.

Los envases de Tetra Pak usados son 100% reciclables y tienen un valor sumamente importante para industrias como la papelera. La recuperación de ese valor, o valorización a través del reciclaje, depende de que el subproducto pueda estar disponible para los recicladores, y eso a su vez depende de que la sociedad pueda manejar integralmente los residuos.

El aluminio es un metal ligero, blando pero resistente que forma parte de las fibras de Tetra Pak; no cambian sus características durante el reciclado, razón por la cual se ha optado por utilizarlo en nuestro proyecto de investigación para mezclas asfálticas. Cabe resaltar que no se ha encontrado en la bibliografía estudios anteriores con uso de Tetra Pak en mezclas asfálticas.

Por ser un material no biodegradable y muy contaminante abre posibilidades para el reciclado y no se convierte en un material nocivo para el ambiente si se lo utiliza de una manera adecuada. Los ensayos de mezclas asfálticas determinarán cuan factible es su uso y que resultados se obtendrá del mismo.





**Fig. 14:** Reciclaje del envase Tetra Pak

## **4.2 COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA ENVOLTURA TETRA PAK.**

### **4.2.1 COMPOSICIÓN DE LAS ENVOLTURAS TETRA PAK.**

Los envases deben su eficacia a la fabricación en capas (laminado) de su estructura. Cada capa es de un material diferente y apropiado para una función concreta. Uniendo capas (papel, polietileno, aluminio) con la cantidad necesaria de cada material para satisfacer todas las características requeridas, el peso y el volumen del envase en su conjunto se reducen al mínimo, mientras que se garantiza la funcionalidad y comodidad para los consumidores.

#### **PAPEL**

El papel es la principal materia prima que se utiliza para fabricar los cartones para bebidas. Está fabricado con madera, una materia prima renovable.

## **POLIETILENO**

Por término medio, el polietileno representa el 20% del peso del envase. El polietileno proporciona estanqueidad al contenido líquido y mantiene unidos los diferentes materiales del envase. El uso de las capas más finas posibles de polietileno (la capa exterior tiene 12 micras de espesor) minimiza el empleo de recursos. (Tetrapak España, 2014)



**Fig. 15:** Polietileno

**Fuente:** (Genraritat de Catalunya Gencat.cat, 2012)

## **ALUMINIO**

Cuando se usa, la hoja de aluminio sólo representa un máximo del 5% del peso del cartón para bebidas. El envase aséptico (de larga duración) necesita una barrera extremadamente eficaz contra el oxígeno. La hoja de aluminio es una solución muy práctica para esta necesidad.

La hoja de aluminio permite el almacenamiento seguro a temperatura ambiente de los productos envasados con ahorro de energía necesaria para su refrigeración tanto en el transporte como en el almacenamiento. La hoja de aluminio es una excelente barrera a

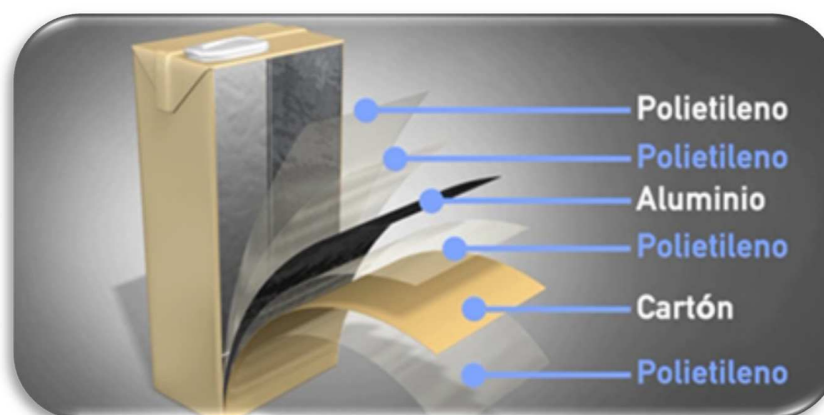
pesar de su delgadez. El espesor de la hoja se ha reducido de 9 hasta 6,5 micras en los últimos años. (Tetrapak España, 2014)



**Fig. 16:** Aluminio de la envoltura Tetra Pak

#### **4.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS ENVOLTURAS TETRA PAK**

El envase Tetra Pak es altamente reconocido, se caracteriza por una superficie plastificada que casi en su totalidad puede ser impresa, a la vez este envase repele por completo la luz evitando lo perjudicial que puede ser ésta para la conservación del contenido. Hay envases Tetra Pak con varias formas, tamaños y diseños distintos, están conformados básicamente por capas de polietileno, cartón y aluminio perfectamente unidas que permiten la conservación de alimentos y bebidas en buen estado, sin la necesidad de ser refrigerados. Las capas del envase protegen la calidad nutricional de su contenido y permiten descartar el uso de conservadores artificiales. A continuación se describe en la Fig.16 las diferentes capas del envase Tetra Pak (QUMINET, 2011).



**Fig. 17:** Capas del envase Tetra Pak

**Fuente:** (Genrariat de Catalunya Gencat.cat, 2012)

1. Polietileno - proporciona estanqueidad al alimento líquido
2. Cartón - para rigidez y resistencia.
3. Polietileno - capa de adherencia\*
4. Aluminio - barrera contra el oxígeno, los olores y la luz.
5. Polietileno - capa de adherencia\*
6. Polietileno - proporciona estanqueidad al alimento líquido

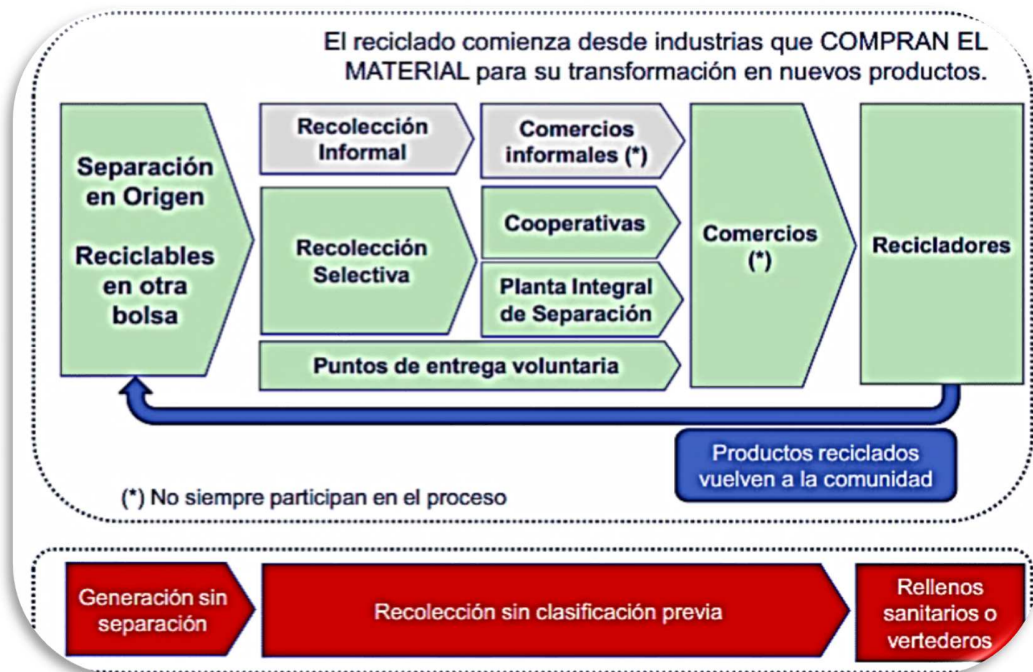
\* La capa de adherencia (5) sirve para garantizar que la capa de polietileno en contacto con el producto envasado permanece intacta. La otra capa de adherencia (3) une la hoja de aluminio al cartón sin necesidad de adhesivos.

\* En los cartones no asépticos, sólo existen 4 capas: la 1, 2, 5 y 6, las cuales no se usa aluminio.

## 4.3 DISPOSICIÓN INDUSTRIAL

### 4.3.1 PROCESO DE RECICLAJE

Es importante que el reciclaje inicie desde casa. Es decir se debe separar este tipo de empaques. Para ello se escurre los sobrantes líquidos del envase, se enjuaga el envase, se deja secar, se compacta el envase (se aplasta un lado del envase), y por último se la amarra.

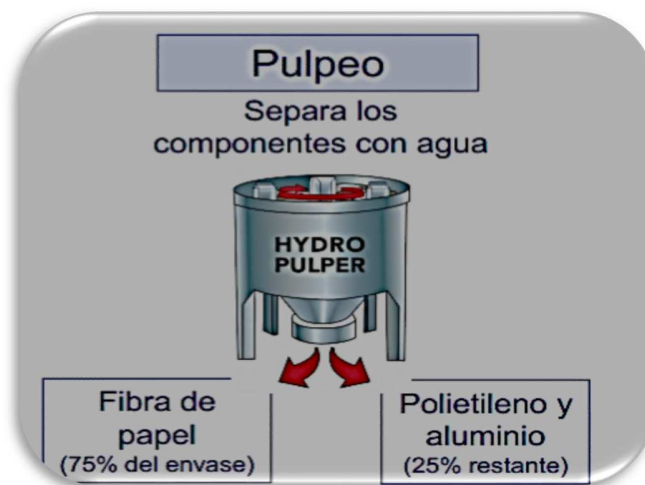


**Fig. 18:** Diferentes procesos de recolección

**Fuente:** (Globalenvironment, 2011)

Para el proceso industrial de reciclado de envases Tetra Pak, los envases reciclados se introducen en un hidropulper horizontal. En el proceso, las fibras de papel se quedan en suspensión en el agua, y luego mediante filtros, se retiene el plástico y el aluminio. Después de agitarlo entre 15 y 60 minutos, se separan las fibras de papel del polietileno y

la hoja de aluminio. Las fibras de papel disueltas en agua se utilizan para la fabricación de papel reciclado. (Globalenvironment, 2011)



**Fig. 19:** Pulpeo (Proceso de separación)

**Fuente:** (Globalenvironment, 2011)

La clave para un buen hidrapulpado de envases de Tetra Pak es la eliminación eficaz de los componentes que no sean fibra: polietileno, hoja de aluminio, tintas e impurezas tales como barro, arena, chatarra y otros cuerpos extraños. Una línea de hidrapulpado recupera hasta el 98% de las fibras de los envases de Tetra Pak (Globalenvironment, 2011)

#### **4.3.2 REUTILIZACIÓN DE ENVASES TETRA PAK**

**REUTILIZACIÓN DE ENVASES TETRA PAK PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MARQUESINAS** (Universidad Técnica Federico Santa María, 2013).

La marquesina es una cubierta que sirve como un refugio de la lluvia, viento o sol. En Chile se desarrolla diferentes proyectos por arquitectos de la Universidad Técnica

Federico Santa María, para crear marquesinas para canchas de fútbol y paneles móviles que permiten separar ambientes contruidos íntegramente con envases de Tetra Pak; convirtiéndose en una alternativa sustentable para filtrar la luz en un determinado espacio y aminorar la radiación solar.

El principal objetivo del proyecto fue encontrar un residuo que permitiera su reutilización y con cualidades suficientes para construir un panel. Optaron por el Tetra Pak porque presentaba todas esas características, además, su alto consumo facilita la recolección y su volumen de acumulación es menor si se le compara con otros productos.

Todo este trabajo ha permitido detectar que los módulos se pueden adaptar a cualquier escenario que requiera controlar la luminosidad, a un bajo costo y reutilizando un residuo. En el 2013 se construyó seis paneles móviles de 4m<sup>2</sup>, con cerca de 1800 cajas, con este proyecto se generó también una cultura del reciclaje, sobre todo en los sectores más vulnerables en donde los recursos son escasos.

Se desea mejorar los espacios recreativos y fomentar la integración participativa en el desarrollo de Chile, tanto en la recolección del material como en la construcción de los módulos, lo que permitirá reducir los costos.



**Fig. 20:** Marquesina con reciclados de Tetra Pak.

**Fuente:** (Universidad Técnica Federico Santa María, 2013)

### **CONSTRUCCIÓN DE TEJAS CON RECICLADOS DE TETRA PAK EN ECUADOR** (Diario El Telégrafo, 2014).

Una vez recolectados los envases, el siguiente paso es descomponerlos totalmente para destinar esos materiales a las empresas que se desarrollan a través de la utilización de plástico, aluminio y cartón. Este proceso se realiza en la planta, ubicada en el sur de Quito, en la que se receptan los carros con el material. El 75% del envase es cartón, el restante 20% es polietileno y el 5% aluminio. Para aprovechar íntegramente los componentes existe una alianza de Tetrapak con dos empresas en Quito, a las que transfirió tecnología, maquinaria y ahora estas le dan un valor agregado al utilizar el material en nuevos productos que se comercializan en distintos lugares.

Una empresa quiteña se encarga de separar el cartón del polialuminio y se queda con este primer insumo (la pulpa) de los envases para fabricar distintos productos, que están



destinados exclusivamente a la industria de la papelería. El resto del material (polietileno y aluminio) es para otra empresa que utiliza los dos componentes en conjunto para fabricar tableros y techos altamente resistentes a la humedad. Estos productos son empleados sobre todo para ayudar a las viviendas ecológicas que hay en la región oriental por su fácil traslado, resistencia y, especialmente, por ser aislantes de ruido, que es importante para los amazónicos por las constantes precipitaciones de lluvia que ocurre en el sector.

En el mercado se los consigue con el nombre de Ecopak. Aunque los productos son garantizados, el Ministerio del Ambiente espera que el Instituto Ecuatoriano de Normalización elabore la norma técnica que estandarice los procesos de fabricación de este tipo de tableros que proviene del procesamiento de los envases multicapas.

El MAE además analiza la posibilidad de elaborar convenios de apoyo a la industria del reciclaje, con las empresas privadas, instalar otras plantas de procesamiento de este material, como las que funcionan en México y Colombia.



**Fig. 21:** Techo de poli-aluminio  
**Fuente:** (BORJA, 2010)

## CAPÍTULO V

### DESCRIPCIÓN Y COMPOSICIÓN DE MEZCLAS.

#### 5.1 AGREGADOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS.

##### 5.1.1 DEFINICIÓN

Se entiende como agregado mineral, a un conjunto de partículas minerales secas, de una determinada distribución de tamaños, con una forma, angulosidad, rugosidad y dureza aceptable, limpias y libres de materiales deletéreos u otra materia contaminante, compatible para una apropiada adherencia a un ligante bituminoso determinado, para formar una mezcla bituminosa, la misma que será parte de un pavimento. El uso de agregados para mezclas que utilicen emulsiones asfálticas puede requerir condiciones de humedad particulares para los agregados (NEVI-12, 2012).

Para la obtención de una fracción o fracciones de características particulares aceptables, el material grueso será triturado y cribado, mientras que el material fino podrá ser producto de trituración de piedra o arenal natural.

#### **Otras Definiciones:**

Árido: material pétreo compuesto de partículas duras, de forma y tamaño estables.

Árido natural: árido procedente de yacimientos pétreos y que no ha sido sometido a tratamiento mecanizado.

Árido tratado: árido que se sometió a tratamiento de trituración, dosificación por tamaños y/o lavado en operaciones mecanizadas.

Arena (árido fino): árido que pasa por el tamiz de abertura nominal de 5 mm y es retenido en el de 0,08 mm (Nº 200).

Grava (árido grueso): árido retenido en el tamiz de abertura nominal de 5 mm (Nº 4).

Árido total (árido combinado): árido resultante de la combinación de arena y grava en proporciones definidas por el estudio de dosificación y que ha de emplearse en la fabricación de un hormigón.

Árido revuelto (árido integral): arena y grava mezclada en proporción no definida.

### **5.1.2 CLASIFICACIÓN**

a) De acuerdo al origen de la roca el árido puede ser ígneo, sedimentario o metamórfico.

En este grupo se incluyen los basaltos, pórfidos, gabros, granitos, cuarcitas, etc. cuyas cualidades de resistencia al pulimento los hace idóneos para garantizar la textura superficial necesaria durante un largo período de tiempo, por lo que son especialmente adecuados para su empleo como árido grueso en capas de rodadura, tanto en mezclas bituminosas como en tratamientos superficiales. Su mayor inconveniente es su precio, que muchas veces tiene un gran peso a la hora de decidir sobre la conveniencia de usarlos (UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE, 2013).

b) Artificiales o indirectos: cuando se obtienen de canteras y se someten a un proceso de chancado, cuando no hay a mano depósitos naturales de arenas o gravas hay que recurrir a canteras. En la cantera se deben obtener rocas de tamaños adecuados para someterlas a triturado.

- c) Naturales o directos: se obtienen de yacimientos, que pueden ser depósitos fluviales, glaciares, eólicos o marinos. Los áridos se encuentran prácticamente sueltos, son más económicos.
- d) Clasificación según tipo de partículas: Triturados ó Rodados
- e) Clasificación según tamaños:

**Grava:**

**Tabla No. 2:** Tamaño de los agregados gruesos

<b>Bolones</b>	mayores de 80mm
<b>Grava Gruesa</b>	80 a 40 mm
<b>Grava Fina</b>	40 a 20mm
<b>Gravilla</b>	20 a 10 mm

**Fuente:** (UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE, 2013)

**Tabla No. 3:** Malla de los tamices (grava)

<b>Tamiz ASTM</b>	<b>Tamiz mm</b>
<b>3"</b>	76.2
<b>2"</b>	50.4
<b>1 1/2"</b>	38.1
<b>1"</b>	25
<b>3/4"</b>	19
<b>3/8"</b>	9.5

**Fuente:** (NEVI-12, 2012).

**Arena:****Tabla No. 4:** Tamaño de los agregados finos

<b>Arena gruesa</b>	5 a 2 mm
<b>Arena media</b>	2 a 0.5 mm
<b>Arena fina</b>	0.50 a 0.075 mm

**Fuente:** (UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE, 2013)

**Tabla No. 5:** Malla de los tamices (arena)

Tamiz ASTM	Tamiz mm
<b>N°4</b>	4.75
<b>N°10</b>	2
<b>N°40</b>	0.425
<b>N°200</b>	0.075

**Fuente:** (NEVI-12, 2012).

**5.1.3 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS (Padilla, UPCommons, 2007)****5.1.3.1 AGREGADO GRUESO****Granulometría.**

La granulometría es la característica física principal y fundamental de todo conjunto de partículas porque influye de forma muy importante en la resistencia mecánica del conjunto (esqueleto mineral). Normalmente se utilizan granulometrías sensiblemente continuas, a fin de conseguir la máxima compacidad del conjunto, aunque también se

emplean granulometrías discontinuas en el caso de algunas mezclas asfálticas. Para encajar una granulometría dentro de algún uso normalizado se parte de fracciones uniformes que se mezclan en las proporciones adecuadas. Los análisis granulométricos se realizan por tamizado; el procedimiento es análogo al que se emplea para suelos.

El tamaño máximo de los agregados viene normalmente limitado por consideraciones relativas al espesor de la capa extendida, trabajabilidad, segregación, etc. Por otra parte la influencia de las partículas finas obliga normalmente a limitar su porcentaje y su plasticidad. En las mezclas asfálticas tiene una especial importancia el polvo mineral o filler, pues algunas características relevantes de la mezcla dependen de la unión formada por el polvo mineral y el ligante asfáltico.

#### **Rozamiento interno.**

La resistencia a la deformación o capacidad de soporte de una capa de firme depende esencialmente del rozamiento interno del esqueleto mineral y, en su caso, de la cohesión que proporciona el eventual ligante o conglomerante. El rozamiento interno aumenta con partículas angulosas y de textura superficial áspera como por ejemplo los agregados triturados. También influye de forma importante la granulometría del agregado y el porcentaje de huecos del material compactado. A mayores densidades corresponden generalmente mayores resistencias mecánicas, por lo que la compactación es un factor de primer orden.

La cohesión debe confiarse exclusivamente al ligante asfáltico o conglomerante. La cohesión entre las partículas suele ser despreciable, y cuando existe se debe únicamente a la plasticidad de la fracción fina, y en general es más nociva que útil. Sólo interesa una

cierta plasticidad de los finos y muy reducida de todas formas, cuando se trata de capas granulares no revestidas en caminos de baja intensidad de tráfico.

#### **Angulosidad del agregado grueso.**

La angulosidad del agregado grueso beneficia al esqueleto mineral debido al rozamiento interno que se genera entre las partículas, esto contribuye a que las partículas gruesas permanezcan en su lugar cuando el pavimento entre en funcionamiento y no se produzcan desplazamientos.

#### **Forma del agregado grueso.**

Las exigencias de forma para el agregado grueso varían ligeramente, con un mismo tráfico, para las mezclas asfálticas. Lo ideal es que las partículas presenten formas cuboides, evitando o restringiendo las formas planas, alargadas y en forma de lajas, ya que como lo hemos dicho antes, este tipo de forma es muy susceptible a quebrarse bajo condiciones de carga de tráfico, lo que modifica las granulometrías y las propiedades iniciales de las mezclas.

#### **Resistencia a la fragmentación de los agregados gruesos.**

Los agregados pétreos deben cumplir con un cierto mínimo de resistencia a la fragmentación o al desgaste, de acuerdo a la norma NEVI-12 depende de la mezcla asfáltica que se realice. El porcentaje máximo de desgaste mediante el ensayo de abrasión para mezclas asfálticas en caliente es 40% para alturas menores a 3000 m.s.n.m.

### **5.1.3.2 AGREGADO FINO**

#### **Procedencia del agregado fino.**

El agregado fino deberá proceder de la trituración de piedra de cantera o grava natural en su totalidad, o en parte de yacimientos naturales. Existen limitaciones en la proporción de agregado fino no triturado a emplear en las mezclas, regularmente se emplea arena natural en la elaboración de mezclas asfálticas que van a ser empleadas en pavimentos, se deberá señalar la proporción máxima de arena natural no triturada, a emplear en la mezcla, la cual regularmente no será superior al 10% de la masa total del agregado combinado.

#### **Limpieza del agregado fino.**

El agregado fino deberá estar exento de terrones de arcilla, materia vegetal, marga y otras materias extrañas, para evitar que se presenten comportamientos extraños del material dentro de la mezcla, tales como reacciones químicas, pérdida de estabilidad de la mezcla, abundamientos, entre otros.

#### **Resistencia a la abrasión del agregado fino.**

El material que se triture para obtener agregado fino deberá cumplir las condiciones exigidas al agregado grueso sobre el coeficiente de desgaste Los Ángeles, de modo que se pueda determinar si es idóneo o no en mezclas asfálticas en caliente. Los límites expuestos por la norma NEVI-12 se encuentran en la sección 403-3.02 (Materiales) del volumen 3.

#### **Adhesividad del agregado fino.**

Respecto a los fenómenos de adhesividad agregado fino - ligante, hay que tener en cuenta que las acciones químicas o químico - físicas en las partículas de menor tamaño son más complejas. Su mayor superficie específica, facilidad para acumular humedad y



gran heterogeneidad de su naturaleza determinan una mayor sensibilidad a toda clase de transformaciones químicas, adhesividad, absorción, etc.

### **5.1.3.3 FÍLLER**

#### **Definición de polvo mineral (filler).**

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como polvo mineral, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz #200. Y según la normativa Europea UNE-EN 933-2., se define como polvo mineral, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz 0.063 mm.

Cuando se trata de un producto comercial, se garantiza perfectamente su control y se conocen sus propiedades tanto físicas como químicas y su futuro comportamiento en la mezcla.

#### **Características del polvo mineral (filler).**

##### **Finura.**

Al ocupar parcialmente los espacios libres dejados por la estructura granular compactada y conformada por las partículas mayores, reduce el volumen de vacíos de la mezcla evitando un aumento pronunciado de la cantidad de ligante asfáltico.

El polvo mineral consigue cumplir con su función rellenadora, dependiendo del volumen de vacíos existente una vez que se haya compactado la estructura granular y en función de la granulometría y de las partículas de mayor tamaño.

La densidad aparente del polvo mineral es una medida relativa del grado de finura del polvo, cualidad muy importante para las características finales de las mezclas.

**Modificación del comportamiento reológico.**

El empleo del polvo mineral, incrementa la magnitud de la resistencia a la deformación de la mezcla, sin modificar la naturaleza viscosa del ligante, originando como consecuencia un aumento de la resistencia al corte de las mezclas asfálticas.

**Acción estabilizante frente al agua.**

Se incrementa la durabilidad de las mezclas asfálticas frente a la acción del agua debido a que se reduce parcialmente la porosidad de la estructura granular evitando el acceso del agua al interior, y por otro lado debido a que algunos polvos minerales presentan una mayor afinidad con el ligante asfáltico, mejoran la resistencia a la acción de desplazamiento que ejerce el agua sobre el ligante asfáltico.

Las características de finura y comportamiento reológico se hallan vinculadas al tamaño y forma de las partículas. La acción estabilizante frente al agua depende además del tamaño y forma de las partículas, de la composición química de los rellenos minerales.

**Procedencia del polvo mineral**

El polvo mineral podrá proceder de los agregados, separándose de ellos por medio de los ciclones de la central de fabricación, o aportarse a la mezcla por separado de aquéllos como un producto comercial o especialmente preparado. Las proporciones del polvo mineral de aportación a emplear en la mezcla deben cumplir lo que fijen las normas, debido a que es un material que se debe de utilizar en proporciones adecuadas en cada tipo de mezcla y condiciones, para obtener un resultado óptimo.

## **5.1.4 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN**

### **5.1.4.1 GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS (ASTM C 136-03, 2003)**

#### **ALCANCE:**

El Presente método de prueba cubre la determinación de la distribución de partículas de agregados finos y gruesos mediante cribado.

#### **EQUIPOS:**

**Horno.-**Termostáticamente controlado, capaz de mantener constantemente una temperatura de  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ} \text{F}$ ).

**Cuartheador Mecánico.-** Aparato diseñado para dividir la muestra original en partes representativas y reducir su tamaño a cantidades apropiadas.

**Tamiz.-** Malla de filamentos que se entrecruzan dejando unos huecos cuadrados. Es importante que esos cuadrados tengan todos el mismo tamaño, ya que éste determinará el tamaño de lo que va a atravesar el hueco.

**Bandejas y taras.-** Elementos auxiliares del laboratorio para colocación del material.

**Balanza.-** Instrumento que sirve para medir el peso de un objeto cuya precisión debe ser  $\pm 0.01 \text{ gr}$  para evitar errores de aproximación.

#### **PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

- Disponer las muestras para el análisis por medio de cuarteo considerando las normas: AASHTO T-87 (preparación de muestras secas de suelos alterados) ó AASHTO T-146 (preparación de muestras húmedas de suelos perturbados). La cantidad de

muestras mínimo dependerá del tamaño máximo de las partículas (indicado en el cuadro).

**Tabla No. 6:** Peso aproximado en función del tamaño máximo nominal.

Tamaño Máximo Nominal de la Partícula		Peso mínimo aprox. de la Porción
mm	Plg.	Kg.
9.5	3/8	1
12.5	1/2	2
19	3/4	5
25	1	10
50	2	20
75	3	30

**Fuente:** (ASTM C-136-03, 2003)

Para un tamaño nominal de  $\frac{3}{4}$  pulgada se opta por seleccionar 6 Kg. de material.

- Luego de preparar la muestra de ensayo para nuestro tamaño máximo nominal de  $\frac{3}{4}$  plg. se lava el material para separar las partículas gruesas de las finas que se encuentran pegadas, así como también para remover la materia orgánica que puede alterar el ensayo.



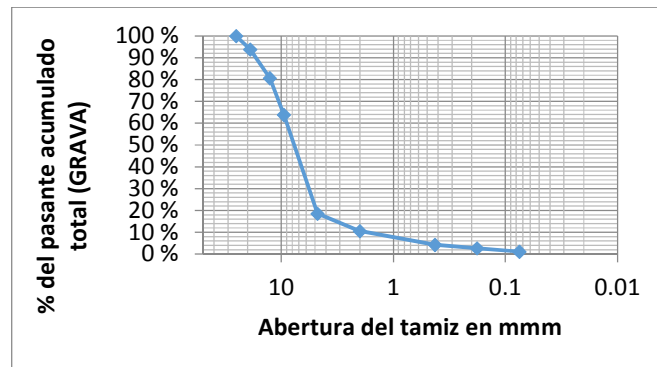
**Fig. 22:** Agregado fino y grueso.

- Esparcir el material lavado y secado en los diferentes tamices previamente acoplados y colocados en forma ascendente.
- Emplear manualmente un movimiento giratorio (rotacional y traslacional) sobre los tamices colocados en forma de columna. También se puede utilizar un tamizador vibratorio eléctrico. Si se procede a tamizar con el aparato eléctrico anteriormente mencionado, se debe finalizar manualmente, dándose por terminado cuando la masa del árido retenido en cada tamiz no varíe más de 1%.

#### RESULTADOS OBTENIDOS:

**Tabla No. 7:** Resultados obtenidos del ensayo de granulometría (grava).

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN						
INGENIERÍA CIVIL						
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES						
<b>ENSAYO:</b>	GRANULOMETRÍA AGREGADO GRUESO			<b>PROYECTO:</b>	TESIS DE GRADO	
<b>MATERIAL:</b>	GRAVA			<b>REALIZÓ :</b>	ESPÍN P. - CEDEÑO F.	
<b>UBICACIÓN:</b>	PIFO			<b>REVISÓ :</b>	ING. BONIFAZ H.	
<b>Peso Inicial:</b>	5097,5 gr.					
ABERTURA DE TAMIZ	PESO RETENIDO	PESO RETENIDO ACUM.	% DE RETENIDO	% RETENIDO ACUM.	% PASANTE ACUM.TOTAL	
Plg.	mm.	gr.	gr.			
1"	25,4	0	0	0,00	0,00	100
3/4"	19,05	311,6	311,6	6,11	6,11	94
1/2"	12,7	671,2	982,8	13,17	19,28	80,72
3/8"	9,5	858,4	1841,2	16,84	36,12	63,88
4	4,76	2310,2	4151,4	45,32	81,44	18,56
10	2	412,4	4563,8	8,09	89,53	10,47
40	0,425	315,2	4879	6,18	95,71	4,29
80	0,18	80,9	4959,9	1,59	97,30	2,70
200	0,075	80,8	5040,7	1,59	98,89	1,11
<b>Pasante</b>	<0.07	56,8	5097,5	1,11	100,00	0,00
<b>200</b>	5					
		5097,5		100,00		

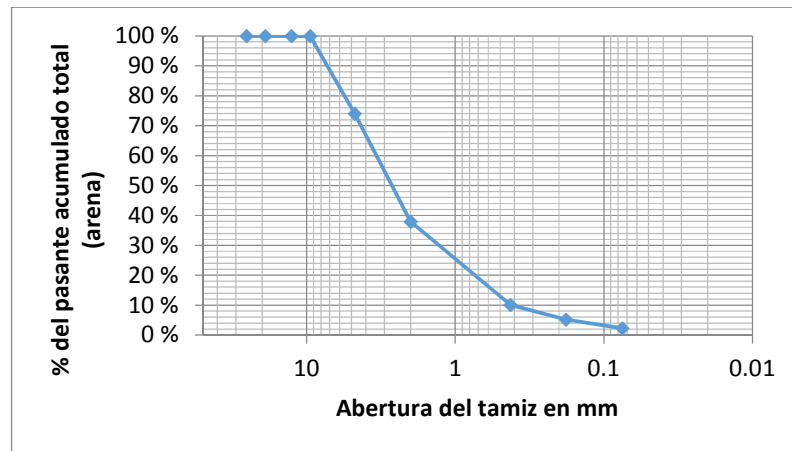


**Fig. 23:** Curva granulométrica (GRAVA)

Se puede concluir de los resultados, que el material grueso tiene un mínimo porcentaje de desprendimiento de partículas finas como consecuencia del lavado del material, lo cual a su vez permite que no afecte la mezcla de diseño.

**Tabla No. 8:** Resultados obtenidos del ensayo de granulometría (arena).

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN INGENIERÍA CIVIL						
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES						
ENSAYO :	GRANULOMETRIA AGREGADO FINO		PROYECTO:	TESIS DE GRADO		
MATERIAL :	ARENA		REALIZO:	ESPÍN P. - CEDEÑO F.		
UBICACIÓN :	PIFO		REVISO :	ING. BONIFAZ H.		
Peso Inicial:	599,9 gr.					
ABERTURA DE TAMIZ	PESO RETENIDO	PESO RETENIDO ACUM.	% DE MATERIAL RETENIDO	% RETENIDO ACUM.	% PASANTE ACUM. TOTAL	
Pulg.	mm.	gr.	gr.			
1"	25,4	0	0	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,05	0	0	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,7	0	0	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,5	0	0	0,00	0,00	100,00
4	4,76	155,7	155,7	25,95	25,95	74,05
10	2	217	372,7	36,17	62,13	37,87
40	0,425	166,8	539,5	27,80	89,93	10,07
80	0,18	29,2	568,7	4,87	94,80	5,20
200	0,075	17,3	586	2,88	97,68	2,32
Pasante 200	<0.075	13,9	599,9	2,32	100,00	0,00
	Σ	599,9		100,00	470,50	



**Fig. 24:** Curva granulométrica (ARENA)

Dentro del análisis granulométrico de los agregados es importante tomar en consideración el módulo de finura del agregado fino, que se determina sumando los porcentajes acumulados de las siguientes mallas: N° 4, N° 10, N° 40, N° 80 y dividiéndole para 100, en nuestro caso el módulo de finura es de 3.70 lo que representa una arena muy gruesa (triturado de roca).

#### **5.1.4.2 GRAVEDAD ESPECÍFICA PARA EL AGREGADO GRUESO (AASHTO T-85)/ (ASTM C 127-12, 2012)**

##### **ALCANCE:**

Esta norma describe el procedimiento para determinar la gravedad específica y absorción del agregado grueso; la gravedad específica puede ser expresada como la gravedad específica bulk o gravedad específica aparente. La gravedad específica bulk y la absorción, se basan en agregados sumergidos en agua después de 24 horas. Este ensayo no debe ser usado en agregados de bajo peso.

**TERMINOLOGÍA:**

- **Absorción.**- Aumento en el peso de los agregados debido al agua en los poros del material, pero sin incluir el agua adherida a la superficie exterior de las partículas, expresado como un porcentaje del peso seco.
- **Gravedad Específica.**- Relación entre la masa (o peso en el aire) de una unidad de volumen de un material a la masa del mismo volumen de agua a una temperatura indicada. Los valores son adimensionales.
- **Gravedad Específica Aparente.**- Relación entre el peso en el aire de una unidad de volumen de la parte impermeable del agregado a una temperatura indicada a el peso in el aire de un igual volumen de agua destilada libre de gas a una temperatura dada.
- **Gravedad Especifica Bulk.**- Relación entre el peso en el aire de una unidad de volumen total (incluyendo los vacíos permeables e impermeables de las partículas, pero sin incluir los vacíos entre partículas) a una temperatura establecida para el peso en el aire de un volumen igual del material libre de agua destilada a una temperatura establecida.

**EQUIPO:**

**Canasta de alambre.**- Compuesta de una malla de alambre con un diámetro aproximado de 3.35mm (N°6), el diámetro de la canasta debe ser igual a su altura con una capacidad de 4 a 7 litros para el árido.

La canasta será construida a tal grado que impida atrapar aire cuando ésta es sumergida.

**Depósito de agua.**- Un tanque de agua en el cual se suspende la muestra en la canasta, y que puede ser colocado debajo de la balanza.





**Fig. 25:** Canasta con agregado grueso sumergido en agua.

**PROCEDIMIENTO:**

- Lavar la muestra de ensayo hasta asegurar que han sido eliminados el polvo u otros recubrimientos superficiales de las partículas, se seca a continuación en el horno a temperatura de  $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230^{\circ} \pm 9^{\circ}\text{F}$ ). hasta masa constante.



**Fig. 26:** Lavado y secado del agregado grueso.

- Dejarla enfriar al aire a temperatura ambiente durante un período de 1 a 3 horas. Una vez fría se pesa, y sumergirla en agua a temperatura ambiente por un periodo de 24 horas.



**Fig. 27:** Muestra sumergida en agua.

- Después del periodo de inmersión, se saca la muestra del agua y se secan las partículas sobre un paño absorbente de gran tamaño, hasta que se elimine el agua superficial visible, secando individualmente los fragmentos mayores, evitar la evaporación del agua contenida en los poros de las partículas del árido durante la operación de secado superficial.
- A continuación, se determina el peso de la muestra en el estado saturado superficialmente seco. Estas y todas las pesadas subsiguientes se realizarán con una aproximación de 0.5gr o 0.05% veces el peso de la muestra para pesos superiores.

**RESULTADOS:****Tabla No. 9:** Resultados obtenidos del ensayo para peso específico (grava).

<b>DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN</b>			
<b>INGENIERÍA CIVIL</b>			
<b>LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES</b>			
<b>ENSAYO :</b>	GRAVEDAD ESPECIFICA ASTM C127-12	<b>PROYECTO:</b>	TESIS DE GRADO
<b>MATERIAL :</b>	GRAVA	<b>REALIZÓ:</b>	ESPÍN P - CEDEÑO F
<b>UBICACIÓN :</b>	PIFO	<b>REVISÓ:</b>	ING. BONIFAZ H.
A	Peso de la muestra saturada con superficie seca en el aire	(gr)	3086,60
B	Peso en el agua de la muestra saturada	(gr)	1833,00
C	Peso de la muestra seca en el aire	(gr)	2982,50
(C/C-B)	Gravedad Específica del material impermeable de las partículas (aparente)	----	2,59
(A/A-B)	Gravedad Específica de las partículas saturadas con superficie seca (bulk a granel)	----	2,46
(C/A-B)	Gravedad Específica de las partículas secas (bulk)	----	2,38
(A-C/C)*100	Absorción de agua	(%)	3,49

Se puede ver en la tabla No. 9 los resultados, en la cual se especifica la gravedad específica de la muestra de grava es de 2.38, el rango de aceptación de los agregados gruesos es de 2.33 a 2.75, cumple satisfactoriamente para cualquier tipo de mezcla asfáltica que se desee elaborar; la gravedad específica aparente es de 2.59, este define que tan poroso está el material, mientras mayor sea su valor menor será los huecos que presente el agregado.

### **5.1.4.3 GRAVEDAD ESPECÍFICA PARA EL AGREGADO FINO (AASHTO T-84)/ (ASTM C128-12, 2012)**

#### **ALCANCE:**

Esta norma describe el procedimiento de ensayo para la determinación de la gravedad específica bulk, gravedad específica aparente. Así como la absorción de una muestra de árido fino después de 24 horas de sumergidos en agua.

#### **EQUIPO Y MATERIALES:**

**Balanza.-** Que tenga una capacidad de 1Kg o más, una sensibilidad de 0.1gr o menos, y sea exacta dentro del 0.1% de la masa de la muestra de ensayo en cualquier punto dentro del intervalo de uso.

**Picnómetro.-** Es una probeta que dispone de un cuello alargado y un bulbo inferior, permite determinar la densidad del agregado, en referencia a la de un fluido de densidad conocida, por ejemplo el agua.

**Agua destilada:** El agua destilada es aquella cuya composición se basa en la unidad de moléculas de H<sub>2</sub>O. Es aquella a la que se le han eliminado las impurezas e iones mediante destilación. Se caracteriza por tener un ph neutro.

**Pipeta:** Tubo de varias formas, cuyo orificio superior se tapa a fin de que la presión atmosférica impida la salida del líquido. La pipeta es un utensilio de laboratorio, que sirve para hacer mezclas y transportar líquidos en poca cantidad. Suelen ser de vidrio o de plástico y está formada por un tubo transparente por el cual se puede ver la cantidad de líquido que se está cogiendo.

**Bomba de Vacío:** Una bomba de vacío extrae moléculas de gas de un volumen sellado para crear un vacío parcial. Su función principal dentro de este ensayo es retirar las burbujas de aire que ingresan dentro del picnómetro al introducir la muestra de agregado y el agua destilada.

**PROCEDIMIENTO:**

- La toma de muestras es de acuerdo con la práctica ASTM D-75 (Toma de muestras de los agregados). Obtener aproximadamente 500 gr. de la muestra de agregado fino utilizando el procedimiento aplicable en la práctica ASTM C-702 (Práctica para la reducción de muestras de agregado según el tamaño).
- Secar la muestra en un recipiente adecuado o vasija en el horno hasta un peso constante a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C ( $230 \pm 9$  °F). Se deja enfriar a temperatura ambiente y se cubre con agua sumergiéndole por  $24 \pm 4$  h.



**Fig. 28:** Agregado fino sumergido en agua.

- Secar la muestra en un recipiente adecuado o vasija en el horno hasta un peso constante a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C ( $230 \pm 9$  °F).
- Registrar todas las determinaciones de pesos con una aproximación de 0.1gr.



**Fig. 29:** Peso del picnómetro sin agua destilada.



**Fig. 30:** Peso del picnómetro con agua hasta la marca.

- Introducir inmediatamente en el picnómetro aforado  $500 \pm 10$ gr de la muestra de árido fino preparada, y se añade agua destilada hasta aproximadamente un 90% de su capacidad o la marca del aforo.



**Fig. 31:** Picnómetro con muestra de árido fino.



**Fig. 32:** Picnómetro con muestra de árido fino y agua destilada hasta la marca.

- Sacudir con la palma de la mano en la base del picnómetro para liberar las burbujas de aire y conectar la válvula de la bomba de vacíos con el picnómetro aproximadamente por 15 minutos.



**Fig. 33:** Extrayendo burbujas de aire del picnómetro con la muestra.

- Llenar de agua destilada hasta la marca del picnómetro y tratar de que el mismo lave el cuello interno del instrumento, para en lo posterior pesar en la balanza de precisión.

**RESULTADOS:****Tabla No. 10:** Resultados obtenidos del ensayo para peso específico (arena).

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN			
INGENIERÍA CIVIL			
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES			
<b>ENSAYO:</b>	GRAVEDAD ESPECIFICA ASTM C128-12	<b>PROYECTO:</b>	TESIS DE GRADO
<b>MATERIAL:</b>	ARENA	<b>REALIZÓ:</b>	ESPÍN P. - CEDEÑO F.
<b>UBICACIÓN:</b>	PIFO	<b>REVISÓ:</b>	ING. BONIFAZ H.
<b>A</b>	Peso de la muestra saturada con superficie seca en el aire	(gr)	500,00
<b>C</b>	Peso de la muestra seca en el aire	(gr)	484,32
<b>D</b>	Peso del frasco lleno de agua	(gr)	659,31
<b>E</b>	Peso del frasco lleno con la muestra saturada	(gr)	957,25
<b>(C/C+D-E)</b>	Gravedad Específica del material impermeable de las partículas	----	2,59
<b>(A/A+D-E)</b>	Gravedad Específica de las partículas saturadas con superficie seca (bulk a granel)	----	2,47
<b>(C/A+D-E)</b>	Gravedad Específica de las partículas secas (bulk)	----	2,39
<b>(A-C/C)*100</b>	Absorción de agua	(%)	3,24

En la tabla No. 10 la gravedad específica de la muestra de arena es de 2.40; el rango de aceptación de los agregados finos es de 2.21 a 2.67, por lo tanto cumple con los requerimientos para uso en mezclas asfálticas. La gravedad específica aparente de la arena es de 2.60, al igual que el caso anterior, este peso específico define que tan poroso es el material, mientras mayor sea su peso específico aparente menor será los huecos que presente el agregado.

La absorción que presenta el agregado fino es de 3.24% y el rango de aceptación es de 0% al 5%; por lo tanto cumple con el margen de aceptación para utilizarse en mezclas asfálticas.



#### 5.1.4.4 ENSAYO DE ABRASIÓN (AASHTO T-96)/ (ASTM C131)

##### ALCANCE:

Este método, describe el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de agregado grueso, natural o triturado, más pequeños que 37.5 mm (1½ pulg.) usando la máquina de Los Ángeles.

##### EQUIPO:

**Máquina de los Ángeles.-** Equipada con un contador; consiste en un cilíndrico de acero, hueco y cerrado en ambos extremos, con un diámetro interior de 711.5 mm y una longitud también interior de 508.5 mm.



**Fig. 34:** Máquina de los Ángeles.

**Balanza.-** Conforme a la norma AASHTO M 231, dispositivos para pesar usados en los ensayos de materiales.

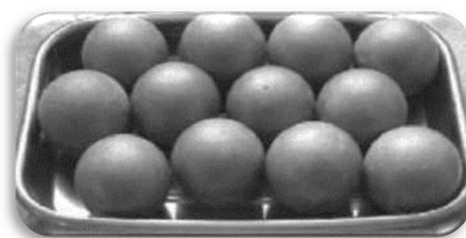
**Horno.-** Capaz de mantener constante una temperatura de  $110^{\circ}\pm 5^{\circ}$  C ( $230^{\circ}\pm 9^{\circ}$  F).

**Carga** - La carga consistirá de esferas de acero de aproximadamente 46.8 mm de diámetro y una masa entre 390 g y 455 g. La cantidad de esferas viene dada por la siguiente tabla:

**Tabla No. 11:** Selección de esferas de acuerdo a la graduación.

Graduación	Número de Esferas	Peso de la carga (gr)
A	12	5000 +-25
B	11	4584 +-25
C	8	3330 +-20
D	6	2500 +-15

**Fuente:** (ASTM C131)



**Fig. 35:** Bolas de acero.

## PROCEDIMIENTO

- La muestra de ensayo consistirá en agregado limpio obtenido del lavado y secado en horno, separada por fracciones de cada tamaño y combinada con una de las granulometrías descritas en la tabla:

**Tabla No. 12:** Peso del agregado según su graduación.

Tamaño de la malla Pulgadas		Peso de los tamaños indicados (gr)			
Pasante	Retenido	Graduación			
		A	B	C	D
1 1/2	1	1250±25			
1	3/4	1250±25			
3/4	1/2	1250±10	2500±10		
1/2	3/8	1250±10	2500±10		
3/8	1/4			2500±10	
1/4	#4			2500±10	
#4	#8				5000±10
<b>Total</b>		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10

**Fuente:** (ASTM C131)

- De acuerdo a la granulometría previamente obtenida y de acuerdo al tamaño máximo, elegir el número de esferas y el peso de la muestra según la tabla No.12.
- Colocar el material y las esferas en la máquina de los ángeles.



**Fig. 36:** Máquina de los ángeles con el material y las esferas.

- Conectar la máquina para que gire 500 veces a una velocidad de 30 a 33 r.p.m.
- Inmediatamente de haber transcurrido el número de revoluciones, descargar el material de la máquina y retirar las esferas.
- Pasar el material por el tamiz #12, para esto es necesario lavar el material para separar los finos adheridos a las partículas.
- Una vez lavado el material, colocar el pasante del tamiz #12 en el horno durante 24 horas hasta secarse, a una temperatura de 105° C a 110° C.
- Finalmente pesar la muestra una vez que se haya enfriado a temperatura ambiente para calcular el desgaste del material.

#### RESULTADOS:

**Tabla No. 13:** Resultados obtenidos del ensayo de abrasión para la grava.

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN		
INGENIERÍA CIVIL		
LABORARIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES		
<b>ENSAYO :</b>	ABRASION ASTM C-131	<b>PROYECTO:</b> TESIS DE GRADO
<b>MATERIAL :</b>	GRAVA	<b>REALIZÓ :</b> ESPÍN P. - CEDEÑO F.
<b>UBICACIÓN :</b>	PIFO	<b>REVISÓ :</b> ING. BONIFAZ H.
A	Peso del material antes del ensayo (gr)	5005,6
B	Peso del material no desgastado después del ensayo(gr)	3727,5
C=A-B	Perdida por desgaste (gr)	1278,10
D=(C/A)*100	Desgaste del material (%)	<b>25,53</b>

El desgaste del agregado grueso es una de las características principales a tener en cuenta en las mezclas asfálticas, dado que la duración y resistencia al desgaste y tiempo,

depende de la dureza de la propia roca y del material con que se efectúe el frotamiento. El límite máximo de desgaste para la gradación de la muestra de ensayo es 40% según la norma ASTM C-131, en nuestro caso el porcentaje de desgaste de la grava es del 25.53% lo que representa un material resistente y con poco desprendimiento de material fino, según los datos presentados en la tabla No.13.

#### **5.1.4.5 ENSAYO EQUIVALENTE DE ARENA (AASHTO T-176)/ (ASTM D-2419)**

##### **ALCANCE:**

Indica bajo condiciones estándar, las proporciones relativas de arcillas, finos plásticos y polvo presente en suelos granulares y agregados finos que pasan el tamiz N° 4 (4.75mm).

##### **EQUIPO Y MATERIALES:**

**Cilindro Graduado.-** Se identifica por tener ensamblado un sifón en su base, tiene un tubo irrigador, un tapón de goma y está constituido por un acrílico de color blanco.

**Pistón.-** Es de acero niquelado y de acuerdo a la norma posee un indicador de lectura de arena de nylon templado; pesa  $1000 \pm 5$ gr.

**Tamiz N°4.-** Tiene una abertura de 4.75mm.

**Embudo:** para depositar las muestras con facilidad debe ser de boca ancha.

**Botellas de Vidrio o Plástico:** Son usadas para depositar la solución coagulante, una para ejecutar el trabajo y la otra para reserva. Su capacidad aproximada debe ser de un galón.

**Tubo Irrigador:** Cerca de la punta presenta una cuña de lados planos con dos perforaciones laterales. Su diámetro es de ¼”.

**Manguera de Hule:** Se utilizada para conectar el sifón al tubo irrigador o el tubo irrigador a la botella con la solución coagulante. Puede ser de goma o un material equivalente. Viene con una pinza para cortar el paso de solución.



**Fig. 37:** Equipos de ensayo para Equivalente de Arena

#### **PROCEDIMIENTO:**

- Obtener al menos 1500g de material pasante del tamiz #4 (4.75mm) luego de sacada una muestra representativa.
- Preparar el reactivo disolviendo  $219 \pm 2$ gr de cloruro de calcio en  $350 \pm 50$ ml de agua destilada o desmineralizada, se enfría a temperatura ambiente y si es necesario, se filtra con un papel poroso medio. Se añaden  $480 \pm 5$ gr de glicerina y  $12,5 \pm 0,5$ gr de solución de formaldehído, se diluye hasta 1litro con agua destilada o desmineralizada, mezclando enérgicamente.
- A la muestra de 1500gr tamizada se le añade un poco de agua en una tara cualquiera y se mezcla hasta uniformizar la humedad con el objetivo de no perder material fino durante su manipulación.

- Poner 4" de reactivo o solución coagulante dentro del cilindro graduado y se coloca la muestra en el recipiente de hojalata hasta que el material quede al ras del mismo compactándolo con la mano para que entre la mayor cantidad de material posible.
- Verter el material del recipiente de hojalata dentro del cilindro graduado con ayuda del embudo de boca ancha tratando de no perder nada del material. Se agita enérgicamente el cilindro graduado en su base con el objetivo de sacar todo el aire retenido y se deja reposar la mezcla durante  $10\text{min} \pm 1\text{min}$ .
- Después de los 10mín se coloca el tapón de caucho en el cilindro graduado y se agita vigorosamente el mismo siguiendo un recorrido lineal horizontal de  $229 \pm 5\text{mm}$ . La agitación dura 30 segundos  $\pm 1\text{segundos}$  en los cuales se deben realizar 90 ciclos, entendiéndose por un ciclo a todo el recorrido de ida y vuelta o vaivén del cilindro.
- Al finalizar la agitación se coloca el cilindro en posición vertical sobre una superficie firme y se retira el tapón de caucho para con esto proceder a introducir el tubo irrigador lavando el material de las paredes del cilindro y luego colocándolo en el fondo del mismo atravesando el material para elevarlo y dejar en suspensión a las partículas más livianas que las partículas de arena más gruesas.
- Se llena el cilindro hasta la marca cuidando de que esta lectura se mantenga una vez sacado completamente el tubo irrigador. Con esto se deja en reposo al cilindro durante  $20\text{min} \pm 15\text{seg}$  contados inmediatamente después que se saca el tubo irrigador.
- Terminados los 20min de sedimentación se toma la lectura de arcilla leyendo su medida superior tratando de reconocer la capa formada o sedimentada.

- Finalmente se introduce el pistón de manera suave hasta que este toque el material y se asiente y se toma la lectura de arena dada por el lector de arena de nylon y se restan 10" a dicho valor. Con estas dos lecturas se calcula el porcentaje de equivalente de arena.



**Fig. 38:** Muestra en reposo

## RESULTADOS:

**Tabla No. 14:** Resultados obtenidos del ensayo equivalente de arena.

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN				
INGENIERÍA CIVIL				
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES				
<b>ENSAYO :</b>	EQUIVALENTE DE ARENA ASTM D-2419	<b>PROYECTO:</b>	TESIS DE GRADO	
<b>MATERIAL :</b>	ARENA	<b>REALIZÓ :</b>	ESPÍN P. - CEDEÑO F.	
<b>UBICACIÓN :</b>	PIFO	<b>REVISÓ :</b>	ING. BONIFAZ H.	
A	Lectura de Arena	3,9	3,8	
B	Lectura de Arcilla	4,1	4,3	
$D=(A/B)*100$	Equivalente de Arena (%)	95,122	88,372	
<b>Equivalente de Arena Promedio (%)</b>		<b>91,75</b>		



Los resultados muestran que es un material de buena calidad puesto que existe un 8.25% de arcilla en el agregado fino, por lo tanto no es expansivo. Los límites del equivalente de arena promedio para una base granular a más de 3000 metros sobre el nivel del mar es del 45% mínimo según la norma ASTM D-2419; en nuestro caso tenemos un 91,75%, esto significa que cumple con los requerimientos para uso en mezclas asfálticas, todo esto según los datos presentados en la tabla No.14.

## **5.2 LIGANTES EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**

### **5.2.1. GENERALIDADES**

Dentro de los ligantes asfálticos se incluyen materiales de distinta procedencia, los asfaltos y los alquitranes, que tienen en común su aspecto y una serie de propiedades aglomerantes. Ambos son materiales termoplásticos, viscosos, su color es negro y están formados por una mezcla compleja de hidrocarburos.

Dadas sus propiedades de consistencia, adhesividad, impermeabilidad y durabilidad, tiene gran variedad de aplicaciones en la construcción de pavimentos flexibles como por ejemplo, mezclas asfálticas, bases estabilizadas, riegos de sello, emulsiones asfálticas, riegos de liga, riegos de impregnación, entre otros.

La mayoría de los asfaltos son semisólidos o sólidos a temperatura ambiente, su manipulación requiere su previo calentamiento, con la finalidad de reducir su consistencia a un valor admisible para la operación deseada: ya sea bombeo (en el manejo), la envuelta de agregados, riegos asfálticos, producción de mezclas asfálticas en caliente, entre otros.

### **5.2.2. DEFINICIÓN DE ASFALTO (Trinidad, 2011)**

Es una sustancia negra, pegajosa, sólida o semisólida según la temperatura ambiente; a la temperatura de ebullición del agua tiene consistencia pastosa, por lo que se extiende con facilidad. Se utiliza para revestir carreteras, impermeabilizar estructuras, como depósitos techos o tejados, y en la fabricación de baldosas, pisos y tejas. No se debe confundir con el alquitrán, que es también una sustancia negra, pero derivada del carbón, la madera y otras sustancias. El asfalto se encuentra en depósitos naturales, pero casi todo el que se utiliza hoy es artificial, derivado del petróleo.

Los asfaltos son materiales aglomerantes de color oscuro, constituidos por complejas cadenas de hidrocarburos no volátiles y de elevado peso molecular. Estos pueden tener dos orígenes; los derivados de petróleos y los naturales.

### **5.2.3. CLASIFICACIÓN DEL LIGANTE ASFÁLTICO (Padilla, Materiales Básicos, 2004)**

Además de los ligantes asfálticos procedentes de la destilación del petróleo, existen otros materiales hidrocarbonatos que también tienen propiedades aglomerantes, razón por la cual lo clasificaremos de la siguiente manera:

- **Ligante hidrocarbonado.**

Término genérico para materiales adhesivos conteniendo asfalto, alquitrán o una mezcla de ambos.

- **Ligante asfáltico.**

Término genérico aplicado a cualquier material adhesivo conteniendo asfalto.

- **Asfalto.**

Material muy viscoso o casi sólido, virtualmente no volátil, adhesivo e impermeabilizante, derivado del petróleo o de los asfaltos naturales, que es completamente o casi soluble en tolueno. En esta investigación se utilizará el cemento asfáltico AC-20, que es un material bituminoso de color negro constituido principalmente por asfaltenos, resina y aceite, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad, es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperatura ambiente. Al calentarse se ablanda gradualmente, hasta alcanzar consistencia líquida. Dentro de los ligantes derivados del petróleo según la denominación americana, se considera los siguientes tipos de ligantes en función del procedimiento de elaboración y los productos añadidos:

**Asfaltos para pavimentación.**

Tipo de asfalto empleado para la fabricación de mezclas asfálticas usado básicamente en construcción y mantenimiento de firmes. En nuestro país se utiliza únicamente el cemento asfáltico AC-20.

**Asfaltos industriales.**

Usados en otros campos distintos de la construcción y mantenimiento de carreteras.

**Asfaltos fluidificados.**

Se obtienen por disolución de los mismos en un aceite o fluidificante, teniendo por lo tanto una viscosidad reducida, se desarrollaron para facilitar el empleo de los asfaltos cuando las temperaturas o el tipo de tratamiento exigen viscosidades de aplicación menores. El fluidificante por lo general, no es más que un aditivo, que se elimina

posteriormente por evaporación y que sirve para facilitar la puesta en obra, quedando al último el asfalto puramente.

#### **Asfaltos fluxados.**

Se han desarrollado para aplicaciones muy específicas, en los cuales el fluxante no es un derivado del petróleo sino que proviene del proceso de destilación de la hulla. Su viscosidad ha sido reducida por el empleo de un aceite fluidificante.

#### **Asfaltos modificados.**

Es un asfalto al cual se le ha añadido de manera homogénea y estable, en un cierto porcentaje previamente analizado, algún tipo de aditivo, para mejorar sus propiedades reológicas. El asfalto es un material como se sabe es muy susceptible a los cambios de temperatura, sufre envejecimiento por intemperismo, es afectado por la oxidación y la fotodegradación. Sus propiedades mecánicas son muy pobres: es quebradizo a bajas temperaturas y fluye un poco arriba de la temperatura del medioambiente, además de tener una baja recuperación elástica, lo que limita ampliamente su rango de utilidad.

Por estas razones el material asfáltico en ocasiones tiene que ser modificado mediante la adición de un agente químico para mejorar sustancialmente sus propiedades reológicas, es decir, que mejoren su comportamiento para una amplia gama de condiciones de temperatura o de aplicación de las cargas.

### **5.2.4. PROPIEDADES DEL LIGANTE ASFÁLTICO**

#### **a) Densidad.**

La densidad de los asfaltos que se utilizan en la construcción de pavimentos varía desde 0.9-1.4 kg/dm<sup>3</sup>. La densidad da una idea de las impurezas que contiene un producto

y su medida sirve de control sirve para la uniformidad de un suministro. (Padilla, Materiales Básicos, 2004)

**b) Penetración.**

La penetración es una medida de la consistencia del producto asfáltico, que se determina midiendo en décimas de milímetro, la longitud de una aguja normalizada que entra en una muestra en unas condiciones especificadas de tiempo, temperatura y carga.

Esta propiedad por sí sola no nos permite identificar un asfalto, pero sí nos define si el producto que está sometido al ensayo es líquido, semisólido o sólido. La penetración de un producto asfáltico disminuye cuando la densidad del mismo aumenta.

**c) Viscosidad.**

La viscosidad es la relación entre la fuerza aplicada a un fluido y la velocidad con la que fluye, estos dependen de la temperatura, por lo que su determinación a diferentes temperaturas da una buena idea de cuál es su susceptibilidad térmica.

**d) Susceptibilidad térmica.**

Para poner en obra un material asfáltico, se requiere que tenga una viscosidad baja, lo cual puede conseguirse por medio de una disolución en un disolvente volátil, por emulsión en agua o por un aumento en la temperatura, el cual éste último es el procedimiento frecuentemente utilizado.

La susceptibilidad térmica de un producto asfáltico, es la aptitud que presenta para variar su viscosidad en función de la temperatura, es muy importante la susceptibilidad debido a que se puede conocer la temperatura adecuada para que el producto asfáltico adquiera la viscosidad requerida para el uso que le daremos.

**e) Punto de Inflamación.**

Es la temperatura a la cual arden los vapores del asfalto al aproximar a la superficie del material una llama de prueba. El punto de inflamación de un asfalto debe de estar alrededor de los 215 grados centígrados. (Padilla, Materiales Básicos, 2004)

**f) Volatilidad.**

Indica la cantidad de aceites volátiles que contiene un asfalto, mediante calentamiento a una temperatura determinada durante un cierto tiempo. Esta propiedad da un índice de inalterabilidad del asfalto durante las operaciones previas a su puesta en obra.

**g) Solubilidad.**

La propiedad de solubilidad sirve para comprobar la uniformidad de composición de un producto de este tipo y para determinar la cantidad de asfalto que contiene un pavimento.

**h) Fragilidad.**

Se caracteriza por la rotura de un material en cuanto se sobrepasa su límite elástico y sin que haya sufrido una deformación plástica apreciable. Un material que sufre deformaciones lentas de carácter plástico puede romperse bajo el efecto de un choque térmico.

**i) Cohesión.**

Esta propiedad indica la dificultad de un producto asfáltico o de una mezcla de un producto asfáltico y un agregado pétreo para romperse por tracción sin que falle la adherencia entre el producto asfáltico y el agregado pétreo.

**j) Adherencia.**

Está representada como la resistencia que va a desprenderse de un producto asfáltico y el agregado pétreo.

**k) Envejecimiento.**

El asfalto está compuesto por moléculas orgánicas que reaccionan con el oxígeno del aire oxidándose lo que les hace más duros y frágiles. Este envejecimiento oxidativo se produce de forma muy lenta cuando el asfalto está en el firme, aunque este proceso es más rápido cuando las temperaturas a las que se ve sometido son mayores. Se debe tener en cuenta también que gran parte de este envejecimiento o endurecimiento oxidativo tiene lugar antes de que el asfalto esté compactado, durante el proceso de mezcla en el que el ligante está sometido a altas temperaturas y en forma de película fina sobre la superficie del agregado.

**5.2.5. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE ASFÁLTICO.****5.2.5.1. PUNTO DE REBLANDECIMIENTO DEL ASFALTO (AASHTO T-53)/  
(ASTM D-95).****ALCANCE:**

Esta norma describe el procedimiento para la determinación del punto de ablandamiento de betunes asfálticos y alquitranes que tengan un rango de ablandamiento de 30 a 157°C utilizando el aparato de anillo y esfera.

**EQUIPO:****Platos de base**

Hechos de material no absorbente, con espesor suficiente para prevenir la deformación y de tamaño adecuado (50x75 mm.) para mantener dos o más anillos.

**Vaso de Precipitación**

Recipiente de vidrio que se pueda calentar, con un diámetro interno no menor de 85 mm, y altura entre la base y el borde de 120 mm como mínimo, con capacidad de 1000 ml.

**Soporte de anillos y montaje completo**

Un soporte de bronce diseñado, para sostener los dos anillos en posición horizontal.

**Anillos**

Dos anillos de bronce y de bordes cuadrados.

**Esferas**

Dos bolas de acero de 9.53 mm cuyo peso es de  $3.5 \pm 0.05$  gr cada una.

**Guías de Centrado:** Sirven para colocar los anillos y esferas.

Termómetro: Un termómetro con un intervalo de temperatura entre -2 y 80°C.

**MUESTRA DE ENSAYO:**

- Los especímenes deben armarse dentro de 4 ½ horas.
- Se calienta el asfalto evitando introducir burbujas de aire.
- No se calienta la muestra por más de dos horas y la temperatura no debe elevarse a más de 110°C por encima del punto de ablandamiento.



- Se vierte la muestra en los anillos de prueba previamente calentados a la temperatura de vertido.

**PROCEDIMIENTO:**

- Para el llenado, los anillos deberán ser colocados sobre una base previamente amalgamada para evitar la adherencia.



**Fig. 39:** Llenado del ligante asfáltico en los anillos.

- Las muestras blandas deberán enfriarse por un lapso de 30 minutos a una temperatura de 10°C por debajo del punto de ablandamiento previsto. Una vez enfriadas las muestras se quitará el exceso de material.
- Para los propósitos de la referencia, todo punto de reblandecimiento menor a 80°C (176°F) se determina en un baño de agua y todo punto de reblandecimiento sobre 80°C (176°F) se determina un baño de glicerina.
- Se ensambla el sistema colocando los anillos con la muestra, las guías que centran las esferas y el termómetro en posición para después ser llenado el baño a una profundidad de 105±3 milímetros (4½±1/8) pulgadas.

- Usando las pinzas se coloca las dos esferas en el fondo del baño para que adquieran la misma temperatura de inicio que el resto del ensamblaje durante 15 min.
- Se pone todo el conjunto del baño en agua con hielo o se calienta muy suavemente, para alcanzar y mantener durante 15 minutos la temperatura de iniciación apropiada.



**Fig. 40:** Estabilización de la temperatura del agua.

- Con las pinzas se pone cada una de las esferas en cada guía de centrado.
- Se calienta el baño y se incrementa uniformemente la temperatura a razón de  $5^{\circ}\text{C}$  ( $9^{\circ}\text{F}$ ) por minuto.



**Fig. 41:** Incremento de la temperatura del agua a razón de  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

- Para cada anillo y esfera se registra la temperatura indicada por el termómetro al momento en que la esfera rodeada de betún toca la placa de soporte. Si la diferencia entre las dos temperaturas exceden  $1^{\circ}\text{C}$  ( $2^{\circ}\text{F}$ ) se debe repetir la prueba.



**Fig. 42:** Esfera rodeada de betún toca la placa soporte.

## RESULTADOS:

**Tabla No. 15:** Resultados obtenidos del ensayo (ASTM D-95).

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN					
INGENIERÍA CIVIL					
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES					
<b>ENSAYO:</b>	ABLANDAMIENTO DEL LIGANTE ASTM D-95	<b>PROYECTO:</b>	TESIS DE GRADO		
<b>MATERIAL:</b>	CEMENTO ASFALTICO AC-20	<b>REALIZÓ:</b>	ESPÍN P. - CEDEÑO F.		
<b>UBICACIÓN:</b>	CHOVA	<b>REVISÓ:</b>	ING. BONIFAZ H.		
VARIABLES		Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	
<b>T1</b>	Valor de temperatura 1 (°C)	49,3	47,9	48,1	
<b>T2</b>	Valor de temperatura 2 (°C)	50,1	48,6	48,9	
<b>DT = Abs(T1 - T2)</b>	Diferencia de Temperatura (°C)	0,8	0,7	0,8	
<b>Chequeo</b>	Diferencia de temperatura (< 1 °C)	CORRECTO	CORRECTO	CORRECTO	
	Promedio de temperatura (°C)	49,7	48,25	48,5	
	Punto de Ablandamiento (°C)		<b>48,82</b>		

El promedio de temperatura obtenido de los tres ensayos es de 48.82 °C según la tabla No. 15; si la diferencia entre las dos temperaturas hubieran sido de 1°C (2°F), tendríamos que haber repetido los ensayos, pero como podemos observar la diferencia máxima de temperatura es de 0.8°C, razón por la cual se encuentra dentro del límite y cumple con la norma anteriormente expuesta, para más adelante utilizarlo en la caracterización del asfalto mediante el cálculo del índice de penetración.

#### **5.2.5.2. PENETRACIÓN DEL ASFALTO (AASHTO T49-03)/ (ASTM D-5)**

##### **ALCANCE:**

Este método, describe el procedimiento para determinar la penetración o consistencia de materiales bituminosos sólidos y semisólidos.

##### **EQUIPO:**

###### **Penetrómetro**

Aparato que permite el movimiento vertical sin fricción apreciable del vástago sostenedor de la aguja, y capaz de indicar la profundidad de la penetración con una precisión de 0.1 mm.

Dependiendo de las condiciones en que se aplique el ensayo, se estipulan pesas de  $50.0 \pm 0.05\text{g}$  y  $100.0 \pm 0.05\text{g}$ .

###### **Aguja de Penetración**

La aguja es de acero inoxidable templado y duro, debe tener aproximadamente 50 mm de largo y su diámetro entre 1.00 y 1.2mm.

La punta truncada del cono debe tener un diámetro entre 0.14 y 0.16 mm y en ángulo recto al eje de la aguja. Su peso será de  $2.50 \pm 0.05\text{ g}$ .

**Cápsulas**

Deben ser de metal o vidrio, de forma cilíndrica y con fondo plano.

**Baño María**

Tendrá una capacidad mínima de 10 litros y un sistema apto para mantener la temperatura a 25°C con una tolerancia de  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ .

**Aparato medidor de tiempo**

Dispositivo automático que se conecta al penetrómetro y debe ser cuidadosamente calibrado para proporcionar el intervalo de ensayo deseado dentro de  $\pm 0.1$  segundos.

**Termómetro**

Un termómetro cuya escala máxima de error sea de  $0.1^\circ\text{C}$ .

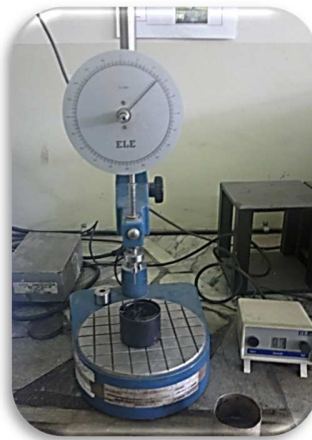
**PROCEDIMIENTO:**

- La muestra se calienta de asfalto por un máximo de 30 minutos sin sobrepasar una temperatura de  $90^\circ\text{C}$ , agitamos frecuentemente para evitar sobrecalentamientos localizados. Al agitarse, se debe evitar la formación de burbujas.
- Se llena el molde precalentado a una temperatura semejante a la del asfalto, y hasta una altura superior al menos en 10 mm a la penetración supuesta.
- La muestra se llena al aire a una temperatura entre  $20^\circ$  y  $30^\circ\text{C}$ , por un período entre 1 a 2 horas.
- Se escoge las condiciones del ensayo en función de la temperatura y tiempo del mismo. Finalmente se sumerge los recipientes en Baño María a la temperatura especificada, manteniéndolos así durante los mismos períodos de enfriamiento.



**Fig. 43:** Recipientes sumergidos en Baño María.

- Se selecciona una carga de 100g para un tiempo de penetración de 5 segundos con la muestra salida del baño maría a una temperatura de 25°C durante toda la ejecución.
- La muestra se retira del agua y se pone la aguja descendiendo lentamente hasta que la punta haga contacto con la superficie de la muestra sin penetrar.



**Fig. 44:** Penetrómetro con muestra ensayada.

- Se realiza un mínimo de tres penetraciones en la superficie de la muestra en puntos distanciados al menos 10 mm de la pared de la cápsula y a no menos de 10 mm entre uno y otro orificio.



**Fig. 45:** Penetración de la aguja en la superficie de la muestra.

**RESULTADOS DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN:**

**Tabla No. 16:** Resultados obtenidos del ensayo (ASTM D-5).

<b>DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN</b>				
<b>INGENIERÍA CIVIL</b>				
<b>LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES</b>				
<b>ENSAYO :</b>	PENETRACION ASTM D-5	<b>PROYECTO:</b>	TESIS DE GRADO	
<b>MATERIAL:</b>	CEMENTO ASFALTICO AC-20	<b>REALIZÓ:</b>	ESPÍN - CEDEÑO	
<b>UBICACIÓN:</b>	CHOVA	<b>REVISÓ :</b>	ING. BONIFAZ H.	
		<b>Probeta 1</b>	<b>Probeta 2</b>	<b>Probeta 3</b>
		(mm/10)	(mm/10)	(mm/10)
<b>1</b>	Valor de Penetración 1	50	49	50,5
<b>2</b>	Valor de Penetración 2	49	51	51
<b>3</b>	Valor de Penetración 3	50,5	51	50,5
<b>4</b>	Valor de Penetración 4	49	49	50
<b>P. promedio</b>	Penetración promedio	49,625	50	50,5
<b>P. Final</b>	Penetración final	50,04		
<b>A</b>	Corrección	2,53		
<b>I.P</b>	<b>Índice de Penetración</b>	-1,49		

Nuestro índice de penetración es de -1.49 según la tabla No. 16, esto quiere decir que cuando se tiene un I.P < -1 tenemos cementos asfálticos con mayor susceptibilidad a la temperatura, ricos en resinas y con comportamiento algo viscoso.

De acuerdo a NEVI-12 para cementos asfálticos AC-20 con grado de viscosidad 60°C se tiene un valor de penetración mínimo de 40 mm/10 para condiciones de 25°C, 100 gr y 25 segundos, de acuerdo al ensayo; nuestro valor calculado es de 50.04 mm/10 y cumple con los requisitos establecidos por esta norma; adicional a lo anteriormente expuesto cumple con otra norma (ASTM D-946) que clasifica a los asfaltos de acuerdo al valor de la penetración como se muestra:

**Tabla No. 17:** Especificaciones para cementos asfálticos. Equivalencias entre grado de penetración y grado de viscosidad.

<b>Grado Penetración</b>	<b>Comentarios</b>
<b>40-50</b>	Grado más duro para climas templados y cálidos
<b>60-70</b>	Grados típicos usados en los Estados Unidos para climas templados y cálidos
<b>200-300</b>	Grado más suave usado para climas fríos como el norte de Canadá (Roberts et al. 1996)

**Fuente:** (ASTM D-946, 1982)

### **5.2.5.3. GRAVEDAD ESPECÍFICA DE MATERIALES BITUMINOSOS SEMI-SÓLIDOS (AASHTO T 228-78)/ (ASTM D 70-76).**

#### **ALCANCE:**

Este método prueba cubre la determinación de la gravedad específica de materiales bituminosos semi-sólidos, cementos asfálticos y breas blandas de alquitrán, mediante el uso del picnómetro.



**EQUIPO:**

**Picnómetro.-** Aparato de vidrio, cuidadosamente esmerilado para albergar un tapón de vidrio de 22 a 26 mm de diámetro, el tapón debe ser provisto de un orificio de 1.0 a 2.0 mm de diámetro ubicado centralmente en relación al eje vertical; el picnómetro debe tener una capacidad de 24 a 30 ml y no pesar más de 40 gr.

**Termómetro.-** Posee un rango de -8 a 32 °C.

**MATERIAL:**

**Agua destilada.-** Recientemente obtenida y enfriada para llenar el picnómetro y el vaso de precipitado.

**PREPARACIÓN DEL EQUIPO:**

Tomar muestras de acuerdo con la norma ASTM D-140, la muestra debe estar libre de sustancias extrañas y se debe mezclar completamente antes de extraer una porción representativa.

**CALIBRACIÓN DEL EQUIPO:**

- Se limpia y se seca el picnómetro para poder pesarlo.
- El vaso se retira del baño y se llena el picnómetro con agua destilada evitando que se formen burbujas de aire para que luego se proceda a colocar el tapón.
- El picnómetro se introduce en el agua al menos 30 minutos.
- Se retira el picnómetro del agua, se seca la parte exterior con una toalla seca y se pesa.

**PROCEDIMIENTO:**

- Se calienta la muestra y se revuelve constantemente hasta que esté suficientemente fluida para verterla.



**Fig. 46:** Muestra caliente fluida.

- Se vierte suficiente muestra en un picnómetro seco, limpio y calentado hasta llenar aproximadamente tres cuartos de su capacidad.



**Fig. 47:** Picnómetro con muestra

- La bandeja se retira del baño de agua, se llena el picnómetro que contiene el asfalto con agua destilada y se coloca el tapón en el picnómetro, no se debe dejar ninguna burbuja de aire dentro del mismo.
- Se coloca el picnómetro en la bandeja con agua y se aprieta el tapón.



**Fig. 48:** Picnómetro en la bandeja con agua

- Se deja el picnómetro en el baño de agua durante un periodo de por lo menos 30 minutos, se saca el picnómetro del baño, se seca y pesa.

**RESULTADOS DEL ENSAYO PARA PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO:**

**Tabla No. 18:** Resultados obtenidos del ensayo ASTM D70-76

<b>DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN</b>			
<b>INGENIERÍA CIVIL</b>			
<b>LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES</b>			
<b>ENSAYO:</b> GRAVEDAD ESPECÍFICA ASFALTO ASTM D 70-76	<b>PROYECTO:</b>	TESIS DE GRADO	
<b>MATERIAL:</b> CEMENTO ASFÁLTICO AC-20	<b>REALIZÓ:</b>	ESPÍN. - CEDEÑO	
<b>UBICACIÓN:</b> CHOVA	<b>REVISÓ :</b>	ING. BONIFAZ H.	
Peso del picnómetro (con tapón)	gr	54,27	A
Peso del picnómetro con agua hasta la marca	gr	175,95	B
Peso del picnómetro + asfalto	gr	125,80	C
Peso del picnómetro +asfalto + agua hasta la marca	gr	176,60	D
Gravedad específica del Asfalto= $(C-A)/((B-A)-(D-C))$	--	1,010	

La gravedad específica del asfalto es de 1.010 como se mostró en la tabla No. 18. Este valor es determinante para calcular el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica como se verá en el siguiente capítulo. El peso específico del cemento asfáltico depende tanto del origen como del proceso de destilación pero su valor se mantiene cerca de la unidad, razón por la cual permite realizar correcciones de volumen a altas temperaturas.

## CAPÍTULO VI

### 6. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

#### 6.1. INTRODUCCIÓN.

El diseño de mezclas asfálticas en caliente tiene como objetivo el obtener un producto capaz de soportar todos y cada uno de los factores que determinan su necesidad como lo son el tráfico, el clima entre otras, las cuales pueden afectar a su desempeño como capa de rodadura terminada si no se determina de manera adecuada la mezcla óptima de agregados y asfalto para soportar dichos factores.

En la presente investigación se realiza el diseño de una mezcla asfáltica en caliente elaborada tradicionalmente es decir con la mezcla de agregados y ligante asfáltico, y se analiza los efectos que produce la adición de 3 nuevos materiales reciclados (limadura metálica, alambre de neumáticos fuera de uso, y fibras tetra pak), siendo estos adicionados de manera individual y porcentual con relación al porcentaje óptimo de ligante asfáltico en la mezcla, haciendo énfasis en analizar los resultados de estabilidad y flujo de las muestras elaboradas.

Existen diversos métodos para diseñar mezclas asfálticas entre los cuales tenemos: Marshall, Hveem, y Superpave, entre los más utilizados. En este trabajo se aplica la metodología Marshall para el diseño de las mezclas asfálticas que se realicen.

##### 6.1.1. Método Marshall.

El método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas consiste específicamente en determinar un porcentaje óptimo de contenido de asfalto con relación a la mezcla total

óptima de agregados, la cual también es diseñada en proporciones ideales, dicha mezcla debe garantizar el adecuado acomodo de las partículas de agregado y ligante asfáltico.

El método se aplica a mezclas en caliente, y toma en cuenta las propiedades del ligante asfáltico, así como también el tamaño de los agregados utilizados, además ser versátil a su uso tanto en laboratorio, así como también en campo. El método Marshall fue elegido en base a su facilidad relativa de uso en cuanto a equipos (portátil), y a su eficiencia en cuanto a los resultados obtenidos y su correlación en campo siendo mejorado por parte del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, los cuales lo determinaron finalmente como método de diseño de mezclas asfálticas.

## **6.2. DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TRADICIONAL UTILIZANDO EL METODO MARSHALL.**

En este trabajo se utiliza este método para desarrollar el diseño de la mezcla asfáltica en caliente, por lo cual a continuación se detalla los procesos y ensayos requeridos para llevar a cabo el diseño tanto de la mezcla tradicional, así como también al ser realizada con materiales reciclados descritos en los capítulos del II al IV.

### **6.2.1. Equipos Requeridos por el Método Marshall.**

El método Marshall proporciona resultados relacionados al volumen – densidad, así como también estabilidad – flujo de la mezcla asfáltica, usa equipos de compactación para simular los efectos del tráfico sobre la mezcla asfáltica, los cuales serán aplicados de acuerdo a la normativa vigente en el país (NEVI-12) en el presente trabajo de investigación, así tenemos los siguientes equipos que intervienen en el proceso:

- **Pisón de compactación Marshall:**

Este elemento es el responsable de compactar dinámicamente la muestra de mezcla asfáltica dentro del molde de compactación el pisón deslizante tiene un peso de 4.540 kg de peso el cual tiene una caída libre de 457 mm, su base circular es de 9.8 cm. (3 7/8") de diámetro.

- **Base de compactación Marshall:**

El pedestal o base de compactación consiste en un taco de madera dura el cual posee una placa metálica colocada en su parte superior para soportar el molde de compactación, y una guía metálica para mantener en todo momento en forma rectilínea constante al pisón o martillo Marshall.

- **Molde de compactación Marshall:**

El molde de compactación Marshall está elaborado en tubo de acero maquinado formado por una base y un collarín intercambiables en ambos extremos del molde. Es utilizado para la preparación de probetas para el ensayo de estabilidad y flujo sus dimensiones son las siguientes: un diámetro interior de 10 cm. (4") tanto en base como en collarín, una base metálica que se halla dividida en dos secciones; la sección inferior de 7.5 centímetros (3") de altura, y la superior 6.35 cm. (2 1/2").

- **Compactador automático para ensayo Marshall:**

Existen equipos automáticos para realizar la compactación de los especímenes Marshall, es así como surge el compactador automático Marshall que se encarga de reproducir automáticamente la compactación manual, asegurando las mismas

condiciones y resultados del ensayo. Está diseñado y construido de forma que la distancia de caída del martillo sea la misma en cada impacto. Posee un contrapeso ubicado en la parte superior de la máquina el cual evita el efecto de rebote sobre la muestra.

Posee un sistema automático de lectura de la cantidad de golpes efectuados, con pre-determinador de parada automática, todo esto instalado en forma separada del cuerpo principal de la máquina. Este equipo generalmente es accionado por un motor eléctrico de 220v 50Hz.

- **Prensa Marshall:**

La Máquina de Estabilidad Marshall o prensa Marshall permite medir de manera rápida y exacta la resistencia al flujo plástico de las mezclas bituminosas de acuerdo con las normas de ensayo ASTM D-1559 y AASHTO T-245.

Consta de un pistón o anillo de carga de 27 KN (6.000 libras) de capacidad, el cual aplica carga al espécimen de ensayo a una velocidad de avance constante de 50.8 mm/min. (2”), y es accionado por un motor de 1/2 HP monofásico, 220 V.50C. Controlado por llave inversora del sentido de avance.

Adicionalmente posee un lector automático de estabilidad el cual registra de manera automática el valor máximo de carga al cual el espécimen de ensayo ha fallado el valor puede ser registrado en Kgf o en lbf.

- **Deformímetro Marshall:**

El deformímetro en el método Marshall se utiliza para comparar cotas mediante la medición indirecta del desplazamiento de una punta de contacto esférica cuando el aparato está fijo en un soporte. Consta de un mecanismo de engranajes o palancas que amplifica el movimiento del vástago en un movimiento circular de las agujas sobre escalas graduadas circulares que permiten obtener medidas con una precisión de centésimas o milésimas de milímetro (micras).

- **Mordaza Marshall:**

Este elemento permite la aplicación de carga al espécimen de ensayo a través de la transmisión de la fuerza de la prensa Marshall la cual por medio de su cuerpo elaborado en acero, lo cual hace posible determinar la estabilidad de la mezcla ensayada su diámetro interior es 5 cm. (2”).

- **Baño María:**

El Baño María está construido totalmente en acero inoxidable, tiene una capacidad para 10 probetas Marshall, y nos ayuda a calentar las mismas hasta los 25 °C para la determinación de los pesos y volúmenes del espécimen, así como también llevarla hasta los 60 °C para el ensayo de estabilidad y flujo.

- **Horno:**

El horno es un elemento indispensable en el desarrollo del método en cuestión y sobre todo esencial para simular de manera exacta los efectos que deben reproducirse en



campo en la elaboración de mezclas asfálticas, es necesario tanto para llevar los agregados a una temperatura de 160 °C, así como también al ligante asfáltico a una temperatura de 155 °C, temperaturas necesarias para la mezcla inicial de estos materiales en un solo material que es la mezcla asfáltica, además es necesario para mantener el material a una temperatura constante de 140 °C, para su posterior compactación, además de permitirnos también precalentar los elementos necesarios para llevar a cabo los ensayos como lo son los moldes, mordazas, pisones, etc.

- **Estufa:**

La Estufa o cocina permite llevar a cabo la mezcla de los agregados con el ligante asfalto y sus modificadores de ser el caso, debe garantizar regular la temperatura entre 140 °C y 1501 °C.

- **Balanza:**

La balanza necesaria para llevar a cabo la interpretación de los pesos de cada material en este método debe tener una precisión de 0.1 gr, además es necesario que esta esté equipada con un accesorio que posibilite tomar pesos en inmersión.

- **Bomba de vacío**

Necesaria para la determinación de la densidad teórica Máxima RICE de la mezcla asfáltica, produce un desplazamiento de aire libre de 85 l/min. (3 pie<sup>3</sup>/min.) y un vacío máximo de 29-30", opera a una temperatura de 30 a 170°F (-1 .11 a 76 .6°C).

- **Taras y Bandejas:**

Necesarias para colocar los distintos materiales que intervienen en el proceso para ser pesados, calentados, mezclados, etc.

- **Frasco volumétrico RICE**

Un recipiente de cristal o plástico con una capacidad de 2000 ml a 4000 ml, para la determinación de la Densidad Máxima Teórica RICE.

Además de estos equipos son necesarios una serie de elementos menores para realizar la mezcla para el ensayo Marshall entre los cuales tenemos a las espátulas, franelas, aceitero, ollas metálicas, cucharas metálicas, equipos de seguridad personal como mandiles mascarillas, guantes de caucho y cuero, zapatos punta de acero, gafas, tapones para oídos, etc.

### **6.2.2. Procedimientos Requeridos por el Método Marshall.**

El método Marshall al igual que otros métodos para el diseño de mezclas asfálticas requiere de un proceso sistemático para la elaboración, ensayo y evaluación del nuevo material en este orden específico por lo cual se hace necesaria la descripción de estos pasos.

#### **Elaboración de especímenes Marshall.**

El ensayo Marshall requiere de la elaboración y ensayo de mezclas asfálticas compactadas para determinar luego del proceso de compactación su relación densidad – volumen, así como también su relación estabilidad – flujo, para lo cual se debe seguir el siguiente procedimiento:

- **Preparación de los agregados.**

Según la caracterización de los agregados definida en el capítulo V de esta investigación los agregados caracterizados por su granulometría no cumplen la normativa vigente en la NORMA ECUATORIANA VIAL 2012 (NEVI-12 M. d., 2013) razón por la que se aplica un proceso de estabilización granulométrica, el cual consiste en utilizar un porcentaje menor de material pasante con relación al pasante original de cada tamiz, para cumplir así los requerimientos del NEVI-12 (NEVI-12 M. d., 2013).

En este proceso se realiza una variación de los porcentajes de materiales pasantes de la mezcla de manera que cumplan o estén dentro de los límites referidos en el NEVI – 12 ya que en base al análisis granulométrico se determinó un tamaño máximo de  $\frac{3}{4}$  de pulgada, la mezcla será referida a un huso granulométrico de Mezcla Asfáltica Normal MAC 2 (NEVI-12 M. d., 2013).

**Tabla No. 19:** Husos Granulométricos MAC

<i>Tamiz</i>	<b>Porcentaje que pasa</b>		
	<b>MAC - 1</b>	<b>MAC - 2</b>	<b>MAC - 3</b>
<i>25 mm (1")</i>	100	-	-
<i>19 mm (3/4")</i>	80	<b>100</b>	-
<i>12.5 mm (1/2")</i>	67-85	<b>80-100</b>	-
<i>9.5 mm (3/8")</i>	60-77	<b>70-88</b>	100
<i>4.75 mm (No4)</i>	43-54	<b>51-68</b>	65-87
<i>2 mm (No10)</i>	29-45	<b>38-52</b>	43-61
<i>425 mm (No40)</i>	14-25	<b>17-28</b>	16-29
<i>180 mm (No80)</i>	8-17	<b>8-17</b>	9-19
<i>75 mm (No200)</i>	04-8	<b>05-8</b>	05-10

**Fuente:** NEVI-12 (NEVI-12 M. d., 2013)

En la Tabla No. 19 se observan los límites propuestos por el NEVI-12 para elegir el huso granulométrico adecuado para la elaboración de la mezcla asfáltica de acuerdo al tamaño máximo nominal de la partícula en este caso para un tamaño de  $\frac{3}{4}$  " (19 mm.), la mezcla asfáltica es diseñada para un huso granulométrico MAC-2.

Este es un proceso iterativo para lo cual es necesario imponerse los porcentajes pasantes de mezcla que recaigan dentro de los límites propuestos por el NEVI-12, inicialmente se adopta un peso total de 930 gr de peso total de agregados en la mezcla para cada briqueta obteniendo así los siguientes resultados.

**Tabla No. 20:** Estabilización Granulométrica inicial (no entra en huso).

Peso inicial de agregados: 930 gr.

ABERTURA DE TAMIZ		FINO	GRUESO	Especificación NEVI <b>MAC-2</b>		Pasante Mezcla	Ret. Acum. Mezcla.	Ret. Acum. Mezcla
Pulg.	mm.	%ACUM. QUE PASA	%ACUM. QUE PASA	Max.	Min.	%	%	gr
<b>3/4"</b>	19.05	100.00	93.89	100.00	100.00	<b>100.00</b>	0.00	0.00
<b>1/2"</b>	12.7	100.00	80.72	100.00	80.00	<b>87.50</b>	12.50	116.25
<b>3/8"</b>	9.5	100.00	63.88	88.00	70.00	<b>76.30</b>	23.70	220.41
<b>4</b>	4.76	74.05	18.56	68.00	51.00	<b>56.10</b>	43.90	408.27
<b>10</b>	2	37.87	10.47	52.00	38.00	<b>43.20</b>	56.80	528.24
<b>40</b>	0.425	10.07	4.29	28.00	17.00	<b>24.30</b>	75.70	704.01
<b>80</b>	0.18	5.20	2.70	17.00	8.00	<b>16.20</b>	83.80	779.34
<b>200</b>	0.075	2.32	1.11	8.00	5.00	<b>7.10</b>	92.90	863.97
<b>Pasante 200</b>	<b>&lt;0.075</b>	0.00	0.00	-	-	-	100.00	930.00

En la tabla No. 20 se observa los datos de la primera iteración los cuales deben estar dentro de los límites del NEVI-12 propuestos en la tabla No. 19.

Estos valores obtenidos a través de 11 iteraciones dan como resultado la proporción de materiales retenidos con respecto a los porcentajes pasantes iterados en la tabla No 4, referidos a granulometría gruesa y fina únicamente, registrando el agregado retenido en el tamiz No. 4 que es aquel que separa gravas de arenas; obtenemos el porcentaje de agregados gruesos utilizados en la mezcla, de igual manera con los finos tomamos el peso de material pasante del tamiz No. 4 y por último el porcentaje es determinado en función del peso inicial total de agregados que es de 930 gr.

**Tabla No. 21: Porcentajes Iniciales para Mezcla Asfáltica.**

	<b>Gruesos pasante <math>\frac{3}{4}</math>, retenido en No. 4</b>	<b>Finos pasante de No. 4, retenido en No. 200</b>	<b>Filler Pasante de No. 200</b>
<b>Peso (gr)</b>	408.27	455.7	66.03
<b>%</b>	43.90%	49.00%	7.10%

En la tabla No. 21 se tienen los pesos retenidos de materiales gruesos, finos, y fíller de acuerdo a la tabla No. 20, los cuales no entran en el huso ya que deben ser estabilizados de acuerdo a un nuevo análisis granulométrico.

A partir de estos porcentajes se procede a realizar una estabilización granulométrica a través de la cual se logra obtener los porcentajes exactos de material pasante de la mezcla de agregados, este proceso se lo lleva a cabo realizando un análisis granulométrico de acuerdo a la norma (ASTM C-136-03, 2003), obteniendo así los porcentajes exactos de

material pasante y además los pesos de agregado retenido necesario de cada tipo para la mezcla de acuerdo a los porcentajes pasantes estabilizados, los cuales se indican a continuación. Peso inicial de agregados: 930 gr.

**Tabla No. 22:** Estabilización granulométrica para diseño MAC-2.

ABERTURA DE TAMIZ		PESO RETENIDO		Especificación NEVI MAC-2		PASANTE MEZCLA	RET. ACUM. MEZCLA	PESO ACUM. MEZCLA
		FINO	GRUESO	Max.	Min.			
Pulg.	mm.	gr.	gr.			%	%	gr.
3/4"	19.05	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	0.00	0.00
1/2"	12.7	0.00	117.67	100.00	80.00	87.34	12.66	117.67
3/8"	9.5	0.00	100.52	88.00	70.00	76.52	23.48	218.19
4	4.76	0.00	190.84	68.00	51.00	55.98	44.02	409.03
10	2	119.14	0.00	52.00	38.00	43.16	56.84	528.17
40	0.425	175.42	0.00	28.00	17.00	24.28	75.72	703.59
80	0.18	75.11	0.00	17.00	8.00	16.20	83.80	778.70
200	0.075	79.26	0.00	8.00	5.00	7.67	92.33	857.96
Pasante 200	<0.075	71.26	0.00	-	-	0.00	100.00	929.22
$\Sigma =$		520.19	409.03					

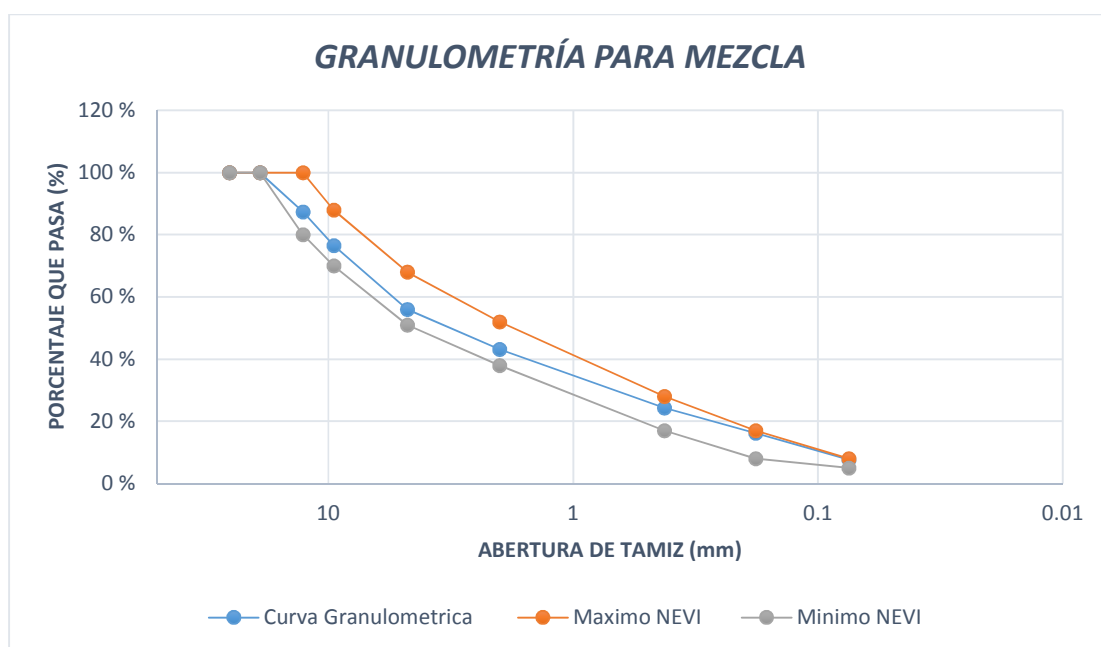
En la tabla No. 22 se presentan los resultados de la estabilización granulométrica de la muestra tomada de acuerdo a la tabla No. 3, en esta tabla se encuentran los pesos retenidos que deben ser pesados para elaborar la mezcla asfáltica de acuerdo a los porcentajes de material pasante estabilizados mediante este proceso. La granulometría de la tabla se resume con los siguientes pesos y porcentajes:

**Tabla No. 23:** Pesos y porcentajes finales para mezcla asfáltica.

	Gruesos pasante $\frac{3}{4}$ , retenido en No. 4	Finos pasante de No. 4, retenido en No. 200	Filler Pasante de No. 200
Peso (gr)	409.03	448.93	71.26
%	44.02%	48.31%	7.67%

En la tabla No. 23 se tienen los pesos retenidos y porcentajes de materiales gruesos, finos, y filler de acuerdo a la tabla No. 5, los cuales entran en el huso granulométrico ya que están estabilizados de acuerdo al nuevo análisis granulométrico.

De acuerdo a estos datos se procede a la verificación de la curva Granulométrica de los agregados con los que se trabaja con respecto a los límites propuestos por el NEVI-12, obteniendo así la siguiente gráfica (Ver Fig. 49).



**Fig. 49:** Granulometría definida para mezcla asfáltica.

De acuerdo a la Fig. 49, el material pétreo utilizado en esta investigación cumple con la normativa vigente al encontrarse dentro de los límites normativos, así que el material es apto y está correctamente dosificado para la mezcla asfáltica.

Estos resultados son el producto de un proceso arduo de selección de la proporción ideal de agregados la cual en combinación con la dosificación óptima de ligante asfáltico que se detalla a continuación, determinan las proporciones adecuadas de todos los materiales que intervienen en la elaboración de la mezcla asfáltica final.

### **Preparación de la mezcla**

Tomando en cuenta la proporción de agregados propuesta en el acápite anterior se procede a la elaboración de los especímenes de ensayo conocidos también como briquetas, las cuales responden a las siguientes características

- **Elaboración de briquetas.**

Las briquetas son elementos o cuerpos de prueba cilíndricos elaborados con mezcla asfáltica, a través de un proceso de compactación con un pisón Marshall de dimensiones, peso y número de golpes conocidos en el molde Marshall, los especímenes de ensayo tienen una dimensión de 4" (10.16 cm.) de diámetro, y aproximadamente 2 ½" (6.35 cm.) de altura, la cual es relativa de acuerdo a la relación densidad – volumen de la mezcla asfáltica.

Este valor correspondiente a la altura de la briqueta influye en la evaluación de los resultados de estabilidad del espécimen, para lo cual el Manual del Instituto del Asfalto (the asphalt institute, mix design methods for asphalt concrete, 1974), especifica factores de corrección para el valor de estabilidad de la briqueta de acuerdo a su altura y volumen (the asphalt institute, TABLE III-1-STABILITY CORRELATION RATIOS, 1974).





**Fig. 50:** Briqueta para ensayo Marshall.

Las briquetas se prepararon con diferentes contenidos de asfalto variando este contenido en un 0,5 % entre cada una de ellas, es necesario elaborar al menos 3 briquetas para cada contenido de ligante asfáltico combinado con agregados a evaluar, así entonces los contenidos de asfalto correspondientes a 5%, 5.5%, 6%, 6.5%, y 7%, en peso con relación al peso total de agregados serán elaborados, por ende se realiza un total de 15 briquetas las cuales son ensayadas para luego determinar en base a sus resultados el contenido de asfalto óptimo.

Para la elaboración de las briquetas primero se calienta los agregados a una temperatura de 160 °C, y el ligante asfáltico AC-20 a una temperatura de 155 °C en el horno, una vez llevados a esta temperatura se adiciona el ligante asfáltico al mix de agregados en el peso determinado según el porcentaje definido, los cuales en esta investigación son los siguientes.

**Tabla No. 24:** Pesos de ligante asfáltico evaluados en mezcla asfáltica.

% de asfalto	Peso de asfalto(gr)
5.00%	46.461
5.50%	51.1071
6.00%	55.7532
6.50%	60.3993
7.00%	65.0454

En la tabla No. 7 se presentan los pesos de asfalto que deben ser empleados en la elaboración de la mezcla asfáltica de acuerdo a los porcentajes de asfalto definidos para la elaboración de 19s



**Fig. 51:** Control de temperaturas de mezcla.

Una vez adicionado el ligante asfáltico al mix de agregados, se procede a mezclar estos materiales en una olla metálica al calor de la estufa, por el tiempo que sea necesario para que los agregados sean completamente cubiertos por el ligante asfáltico, cuidando siempre que la temperatura de la mezcla no produzca la evaporación de este último, y por ende pérdida de material asfáltico en la mezcla.



**Fig. 52:** Mezcla de agregados con ligante asfáltico.

Cuando se observa que el agregado ha sido cubierto por completo por el ligante asfáltico, se procede a colocar la mezcla asfáltica en los moldes Marshall previamente calentados, este es un proceso esencial en la elaboración de las briquetas ya que tanto en el diseño de mezclas asfálticas como en la producción y colocación de carpeta asfáltica, se debe llevar un estricto control de las temperaturas de producción y aplicación del producto, razón por la cual todos los elementos que formen parte del proceso de elaboración deben tener igual o mayor temperatura que la mezcla asfáltica para que esta no pierda temperatura y sea compactada de manera correcta.

En el molde se deben colocar tanto en la parte inferior (base del molde), como en la superior (superficie de contacto con el pisón o martillo Marshall) una superficie de papel filtro con la finalidad de evitar que la mezcla se adhiera al molde o al martillo y se produzcan pérdidas en peso de la biqueta, y sin duda tener cuidado de que en la colocación no se produzcan desperdicios.



**Fig. 53:** Moldes precalentados en horno.

Una vez colocada la mezcla en el molde se debe golpear la mezcla para distribuirla con una espátula de bordes redondeados precalentada dando un total de 25 golpes, aplicados de la siguiente forma: en la parte perimetral de la mezcla en un total de 15 golpes, y en la parte central de la misma en un total de 10 golpes, antes de llevar al compactador automático Marshall se debe controlar la temperatura de compactación, la cual debe ser de 140 °C, de no ser así se debe llevar el molde con muestra al horno para elevar la temperatura al valor indicado (ASTM D 1559, 1998).

Este proceso es realizado de la manera más eficiente posible tanto en la aplicación de los golpes evitando que se produzca desperdicios del material entre el molde y el collarín así como también verificar que no quede material residual en los elementos usados en este proceso.

El tiempo que transcurra entre la distribución de la mezcla (aplicación de golpes) y la compactación de la misma efectuada por el pisón o martillo Marshall, debe ser inmediata para evitar la pérdida de temperatura o enfriamiento de la mezcla garantizando de esta manera la temperatura de compactación de la misma.



**Fig. 54:** Aplicación de golpes a la mezcla asfáltica.

Con la temperatura adecuada se lleva el molde con la muestra al compactador automático Marshall donde se procede a aplicar un total de 75 golpes por cada cara de la briqueta ya que el diseño se realiza para tráfico pesado (NEVI-12 T. C., 2013).

**Tabla No. 25:** Criterios Marshall (NEVI-12 T. C., 2013).

Criterio	Tabla 812-4.1 Criterios Marshall					
	Tráfico					
	Bajo <sup>A</sup>		Medio <sup>B</sup>		Alto <sup>C</sup>	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx
Número de golpes por cara	35		50		75	
Estabilidad, N	3336		5338		8006	
Flujo, 0.25 mm	8	18	8	16	8	14
Vacíos de Aire, %	3	5	3	5	3	5
Vacíos de Agregado Mineral, %	Ver Tabla 3.812-07					
Vacíos Llenos de Asfalto, %	70	80	65	78	65	75
<sup>A</sup> ESALs < 10,000						
<sup>B</sup> ESALs entre 10,000 y 1,000,000						
<sup>C</sup> ESALs > 10,000,000						

En la tabla No. 25 se detallan los valores normativos de los diferentes parámetros de evaluación como estabilidad, flujo, propiedades volumétricas, de acuerdo a los diferentes niveles de tráfico esperados, y al número de ejes equivalentes (ESALs), que propone el NEVI-12.



**Fig. 55:** Compactación de briquetas Marshall.

Luego de compactado el espécimen por ambos lados se debe identificar claramente en el mismo el porcentaje de asfalto que contiene y se deja enfriar por un mínimo de 15 horas, para luego ser extraído mediante un extractor de muestras de su molde, quedando así listo para su ensayo respectivo.



**Fig. 56:** Extractor de muestras Marshall.

Una vez extraída la briqueta determinamos sus propiedades volumétricas mediante un proceso de control de su peso.

### **Procedimiento de determinación de parámetros volumétricos de la muestra.**

Los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica son los que proporcionan una predicción del funcionamiento de la misma durante su periodo de operación, razón por la cual este parámetro debe cumplir con los valores normativos que garanticen un desempeño adecuado de la mezcla en funcionamiento.

El procedimiento necesario para llevar a cabo la determinación de estos parámetros se realiza de la siguiente manera.

1. Una vez extraída la briqueta del molde Marshall se procede medir su altura y determinar su peso en el aire.
2. Luego se sumerge la briqueta en la balanza de inmersión para saturarla en agua a 25 °C, por un lapso de 5 a 15 minutos, luego de los cuales se registra el peso sumergido de la briqueta.



**Fig. 57:** Briqueta sumergida en agua a 25 °C.

3. Se saca la briqueta del agua y se la seca superficialmente cuidando que el agua de los poros no sea eliminada, y se toma y registra su peso saturada superficie seca.



**Fig. 58:** Briqueta superficialmente seca.

Una vez registrados estos valores se procede a calcular los parámetros volumétricos como.

#### **Vacíos de aire “Va”.**

Los vacíos en la mezcla representan una cualidad indispensable razón por la cual deben estar correctamente dosificados y distribuidos en la misma para obtener los el mejor resultado de trabajo de las carreteras, caminos, pistas, etc. En los cuales se esté aplicando la mezcla asfáltica como parte constitutiva de la estructura del pavimento, ya que estos proveen a la mezcla la capacidad de tener una compactación adicional por tráfico, dejando al asfalto fluir pero sin exponer la mezcla a la exudación ni tampoco arriesgar la permeabilidad de la mezcla, el método Marshall recomienda valores comprendidos para este parámetro entre el 3% y 5%, ya que valores inferiores al 3% facilitarían la formación de ahuellamientos en el material, y en cambio valores superiores al 5% producirían fisuras al facilitar el ingreso de aire y agua a la mezcla (Dean Orestes Carrasco Flores, 2004).



**Vacíos del Agregado Mineral “VAM”.**

.Los vacíos del agregado mineral consideran a aquellos en los cuales el asfalto puede fluir y recubrir a los agregados es decir incluye tanto a los vacíos entre los agregados así como a aquellos que están llenos de asfalto

El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuando mayor sea el VAM más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VAM los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durables será la mezcla (Dean Orestes Carrasco Flores, 2004).

**Vacíos llenos de asfalto “VAF”.**

.Los vacíos llenos de asfalto VAF son los espacios intergranulares entre las partículas de agregado (VAM) que se encuentran llenos de asfalto.

El VAM abarca asfalto y aire, y por lo tanto el VAF se calcula restando los vacíos de aire del VAM y luego dividiendo por el VAM y expresando el valor final como un porcentaje (Caceres Alejandro, 2007).

### Densidad máxima teórica de la mezcla asfáltica Rice.

Denominada así por su autor el Ing. James Rice, y como su nombre lo indica describe al peso por unidad de volumen a 25 °C de la mezcla asfáltica suelta con respecto a un volumen igual de agua a la misma temperatura.

Se determina aplicando el siguiente procedimiento:

- Se debe seleccionar el peso necesario de mezcla asfáltica para ser ensayado de acuerdo a la norma ASTM D2041 (ASTM D-2041 , 1996).

**Tabla No. 26:** Pesos de la muestra para ensayo Rice. (ASTM D-2041 , 1996)

Tamaño Máximo de Agregado (mm, plg.)		Tamaño Mínimo de la Muestra (gr)
<b>50</b>	(2")	6000
<b>37.7</b>	(1 1/2")	4000
<b>25.4</b>	(1")	2500
<b>19.1</b>	(3/4")	<b>2000</b>
<b>12.5</b>	(1/2")	1500
<b>9.5</b>	(3/8")	1000
<b>4.75</b>	(No.4)	500

En la tabla No. 26 se especifican los peso de muestra de mezcla asfáltica que deben ser tomados para el ensayo de determinación de la densidad máxima teórica Rice, de acuerdo a la norma ASTM D – 2041, que para este caso de acuerdo al tamaño de partícula de ¾” será de mínimo 2000 gr.

- En este caso de acuerdo al tamaño de partícula de ¾” será de mínimo 2000 gr de mezcla asfáltica para realizar el ensayo Rice.

- Se calibra el frasco volumétrico Rice adicionando agua destilada al mismo de acuerdo a su capacidad y tomando el peso del mismo.
- Introducimos la mezcla en el frasco volumétrico Rice y colocamos agua destilada hasta cubrir las partículas de mezcla verificando que tanto el agua como la mezcla se encuentren a una temperatura de 25 °C, para luego someter el frasco a una bomba de vacío la cual extrae el aire existente en la mezcla. Este proceso se realiza por un lapso de 15 minutos durante los cuales cada dos minutos se debe mecer manualmente el frasco para facilitar la salida de todo el aire existente en la mezcla.



**Fig. 59:** Extracción del aire de la mezcla asfáltica en el ensayo RICE.

- Una vez extraído el aire de la muestra se procede a llenar el frasco calibrado con agua destilada y muestra sin aire para registrar el peso del mismo.
- Una vez registrados estos datos y aplicando la siguiente fórmula se obtiene el valor de la densidad máxima teórica Rice a la cual en las fórmulas subsiguientes se le denominará “Gmm”.

$$Gmm = \frac{A}{A + B - C}$$

Dónde:

Gmm = Densidad máxima teórica de la mezcla asfáltica.

A = Peso inicial de la muestra ensayada.

B = Peso del picnómetro o frasco volumétrico más agua destilada calibrado.

C = Peso del picnómetro más agua más muestra sin aire calibrado.

Para comprobar este cálculo proveniente del ensayo se verifica el resultado mediante la fórmula propuesta por el Instituto del Asfalto (the asphalt institute, MAXIMUM SPECIFIC GRAVITIES OF MIXTURES WITH DIFFERENT ASPHALT CONTENTS, 1974).

$$Gmm = \frac{Pmm}{\frac{Ps}{Gse} + \frac{Pb}{Gb}}$$

Dónde:

Pmm = Porcentaje de mezcla suelta total, con relación al peso total de la mezcla.

Ps = Porcentaje total de agregado, con relación al peso total de la mezcla.

Pb = Porcentaje total de ligante asfáltico, con relación al peso total de la mezcla.

Gb = Gravedad específica del asfalto.

Gse = Gravedad específica del agregado.

La gravedad específica efectiva del agregado se basa en el valor de la densidad máxima teórica de la mezcla, que incluye a todos los vacíos de aire excepto a aquellos

lentos de asfalto VFA, y se determina de la siguiente manera (the asphalt institute, EFFECTIVE SPECIFIC GRAVITY OF AGGREGATE, 1974).

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

Dónde:

$G_{se}$  = Gravedad específica efectiva de los agregados.

$P_{mm}$  = Porcentaje de mezcla suelta total, con relación al peso total de la mezcla.

$P_b$  = Porcentaje total de ligante asfáltico, con relación al peso total de la mezcla.

$G_{mm}$  = Densidad máxima teórica de la mezcla asfáltica.

$G_b$  = Gravedad específica del asfalto.

### **Gravedad específica Bulk del agregado.**

La gravedad específica bulk de los agregados toma en cuenta los diferentes pesos específicos de cada tipo de agregado existente en la mezcla (gruesos, finos y filler) y los correlaciona para determinar la gravedad específica de la mezcla de agregados, a través de la siguiente fórmula (the asphalt institute, BULK SPECIFIC GRAVITIES OF AGGREGATE, 1974):

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

Dónde:

$G_{sb}$  = Gravedad específica bulk de los agregados.

$P_1+P_2+P_n$  = porcentajes parcial en función del peso total de agregado.

$G_1, G_2, G_n$  = Gravedad específica bulk de cada tipo de agregados.

Estos valores se detallan en el capítulo V de esta investigación.

### **Asfalto absorbido “Pba”**

El asfalto absorbido es aquella cantidad de ligante asfáltico que ha sido absorbido por los agregados, y que deja de formar parte de la cantidad de asfalto efectivo presente en la mezcla asfáltica, y se determina mediante la siguiente fórmula (the asphalt institute, ASPHALT ABSORPTION, 1974).

$$Pba = 100 * \frac{Gse - Gsb}{Gsb * Gse} Gb$$

Dónde:

$Pba$  = Porcentaje de asfalto absorbido en función del peso total de agregado.

$Gse$  = Gravedad específica efectiva de los agregados.

$Gsb$  = Gravedad específica bulk de los agregados.

$Gb$  = Gravedad específica del asfalto.

### **Contenido de asfalto efectivo “Pbe”**

El contenido de asfalto efectivo de una mezcla asfáltica es la cantidad de ligante asfáltico total existente en la mezcla menos aquella cantidad que ha sido absorbida por el agregado ( $Pba$ ), y comprende a aquella fracción de ligante asfáltico que se encuentra revistiendo al agregado y del cual dependerá la durabilidad y rendimiento de la mezcla

asfáltica, se determina a través de la siguiente fórmula (the asphalt institute, EFFECTIVE ASPHALT CONTENT OF A PAVING MIXTURE, 1974).

$$Pbe = Pb - \frac{Pba}{100} * Ps$$

Dónde:

Pbe = Porcentaje de asfalto efectivo en función del peso total de la mezcla

Pb = Porcentaje total de ligante asfáltico, con relación al peso total de la mezcla.

Pba = Porcentaje de asfalto absorbido en función del peso total de agregado.

Ps = Porcentaje total de agregado, con relación al peso total de la mezcla.

Para obtener los datos necesarios en la determinación de los parámetros volumétricos de la mezcla se debe empezar por determinar los pesos tanto en aire, sumergido, y saturado superficie seca de la muestra procediendo de la siguiente manera:

Luego de extraer la briqueta del molde Marshall la pesamos directamente en la balanza, determinando así su peso en aire.

Tomado ya ese dato, se sumerge la briqueta en la balanza de inmersión, el agua debe estar a 25 °C y se debe dejar sumergida por un lapso entre 5 y 15 minutos luego de los cuales se registra el dato de peso sumergido.

Por último se seca superficialmente la briqueta sobre una superficie de papel periódico para evitar la pérdida del agua los poros, y se pesa para registrar su valor de peso saturado superficie seca.

Con base a estos datos se procede a determinar los valores de Va, VMA, y VFA, mediante la aplicación de las siguientes formulas (the asphalt institute, mix design methods for asphalt concrete, 1974):

$$Va = 100 * \frac{Gmm - Gmb}{Gmm}$$

Dónde:

Va = Porcentaje de vacíos de aire de la mezcla compactada, en función del volumen total

Gmm = Densidad máxima teórica de la mezcla asfáltica.

Gmb = Gravedad específica Bulk de la mezcla compactada.

$$VMA = 100 - \frac{Gmb - Ps}{Gsb}$$

Dónde:

VMA = Porcentaje de vacíos del agregado mineral en función del volumen total

Gmb = Gravedad específica Bulk de la mezcla compactada.

Ps = Porcentaje total de agregado, con relación al peso total de la mezcla.

Gsb = Gravedad específica bulk de los agregados.

$$VFA = 100 * \frac{VMA - Va}{VMA}$$

Dónde:

VFA = Porcentaje de vacíos llenos de asfalto en función del volumen total de la mezcla asfáltica.



VMA = Porcentaje de vacíos del agregado mineral en función del volumen total de la mezcla asfáltica.

Va = Porcentaje de vacíos de aire de la mezcla compactada, en función del volumen total

De acuerdo a estas fórmulas se realiza el cálculo de los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica objeto de esta investigación y se obtuvo los siguientes resultados.

### **CÁLCULOS:**

Gravedad específica de los agregados:

$$Gsb = \frac{P1 + P2 + \dots + Pn}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \dots + \frac{Pn}{G3}} = \frac{44.02 + 48.31 + 7.67}{\frac{44.02}{2.377} + \frac{48.31}{2.392} + \frac{7.67}{2.70}}$$

$$Gsb = 2.4061 \text{ gr/cm}^3$$

El valor de la gravedad específica del asfalto “Gb”, fue determinado en el capítulo V, y su valor es:

$$Gb = 1.010 \text{ gr/cm}^3$$

El porcentaje de mezcla suelta total, con relación al peso total de la mezcla, será siempre Pmm = 100% ya que considera todo el peso de la mezcla expresado en porcentaje.

Para el cálculo de las propiedades volumétricas de las briquetas elaboradas con el fin de determinar el porcentaje óptimo de asfalto se aplicó las fórmulas propuestas anteriormente de acuerdo a los pesos tomados de todas y cada una de las briquetas realizadas en las 11 iteraciones es decir se elaboró un total de 165 briquetas para la

determinación del porcentaje óptimo fuera de las realizadas para el ensayo de choque térmico, así como también se tabula los datos de los ensayos Rice realizados a cada mezcla asfáltica de acuerdo a su contenido de asfalto, de tal manera que se ilustra los datos obtenidos de estas briquetas en las siguientes tablas (Tablas No. 10, 11,12) :

**Tabla No. 27:** Pesos registrados por cada briketa.

<i>Briketa</i>	<i>Porcentaje</i>	<i>Porcentaje</i>	<i>Peso</i>	<i>Peso Sat.</i>	<i>Peso</i>
	<i>Asfalto (Pb)</i>	<i>Agregado (Ps)</i>	<i>Aire (gr.)</i>	<i>Sup. Seca (gr.)</i>	<i>en agua (gr.)</i>
1	5.00%	95.00%	<b>971.48</b>	<b>972.92</b>	<b>520.68</b>
2	5.00%	95.00%	<b>971.91</b>	<b>972.85</b>	<b>520.08</b>
3	5.00%	95.00%	<b>971.51</b>	<b>972.95</b>	<b>520.21</b>
1	5.50%	94.50%	<b>976.23</b>	<b>977.70</b>	<b>525.51</b>
2	5.50%	94.50%	<b>976.88</b>	<b>977.05</b>	<b>525.58</b>
3	5.50%	94.50%	<b>976.10</b>	<b>977.60</b>	<b>525.84</b>
1	6.00%	94.00%	<b>979.32</b>	<b>981.51</b>	<b>528.22</b>
2	6.00%	94.00%	<b>980.14</b>	<b>982.07</b>	<b>528.3</b>
3	6.00%	94.00%	<b>979.09</b>	<b>981.1</b>	<b>528.05</b>
1	6.50%	93.50%	<b>985.62</b>	<b>986.42</b>	<b>531.62</b>
2	6.50%	93.50%	<b>986.46</b>	<b>987.31</b>	<b>532.90</b>
3	6.50%	93.50%	<b>985.36</b>	<b>986.68</b>	<b>533.20</b>
1	7.00%	93.00%	<b>988.28</b>	<b>989.87</b>	<b>536.20</b>
2	7.00%	93.00%	<b>988.19</b>	<b>989.65</b>	<b>536.33</b>
3	7.00%	93.00%	<b>987.34</b>	<b>988.67</b>	<b>535.43</b>

La tabla No. 27, muestra los valores registrados por cada briketa elaborada con los diferentes porcentajes de contenido de ligante asfáltico a evaluarse, tanto en el aire, en el agua, así como también en su estado saturado superficie seca.

**Tabla No. 28:** Densidad Máxima Teórica Rice "Gmm".

<i>Mezcla</i>	<i>% Asfalto (Pb)</i>	<i>% Agregado (Ps)</i>	<i>Temp. del Agua °C</i>	<i>Peso de la muestra Seca (gr.)</i>	<i>Peso Pic +agua +muestra (gr.)</i>	<i>Peso Pic+agua hasta la marca (gr.)</i>	<i>Densidad Máxima Teórica "Gmm"</i>
<b>1</b>	5.00%	95.00%	25.00	969.10	2439.10	1897.810	<b>2.2653</b>
<b>2</b>	5.50%	94.50%	25.00	965.60	2433.50	1892.226	<b>2.2756</b>
<b>3</b>	6.00%	94.00%	25.00	977.12	2453.00	1910.605	<b>2.2477</b>
<b>4</b>	6.50%	93.50%	25.00	982.40	2463.80	1919.029	<b>2.2448</b>
<b>5</b>	7.00%	93.00%	25.00	981.40	2461.50	1917.433	<b>2.2441</b>

Los valores presentados en la tabla No. 28 son los datos necesarios para llevar cabo la determinación de la densidad teórica máxima Rice teniendo así un peso inicial de muestra ensayada "A", un peso de frasco volumétrico o picnómetro "B", como datos generales para todos los cálculos, y el peso del picnómetro más agua más muestra sin aire como dato particular para cada porcentaje de contenido de asfalto ensayado. Los valores presentados en las tablas No. 27 que son los pesos registrados por las briquetas tanto en aire, sumergidas, y saturadas con superficie seca, y No. 28 que son los valores necesarios para el cálculo de la densidad máxima teórica, hacen posible el cálculo de los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica, como vacíos de aire (Va), vacíos del agregado mineral (VMA), y los vacíos llenos de asfalto (VFA), necesarios para la definición del contenido óptimo de asfalto, además a partir de estos se llega también a la determinación del contenido de asfalto efectivo (Pbe), y la absorción de asfalto (Pba). A través de estos datos y aplicando las fórmulas propuestas por el instituto del asfalto (the asphalt institute, mix design methods for asphalt concrete, 1974) mencionadas anteriormente en este documento, se determinan los parámetros volumétricos expuestos en la siguiente tabla:

**Tabla No. 29:** Propiedades volumétricas de las mezclas Marshall tradicional elaboradas.

<i>Briqueta</i>	<i>%</i>	<i>Gmb</i>	<i>Gmm (Ensay)</i>	<i>Gse</i>	<i>Gmm (calc)</i>	<i>V. a.</i>	<i>VAM</i>	<i>VAF</i>	<i>Pba</i>	<i>Pbe</i>
	<i>Asfalto</i>	<i>g/cm3</i>	-	-	-	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>
<b>1</b>	5.00%	2.148	2.265	2.424	2.265	5.170	15.184	65.954	0.307	4.709
<b>2</b>	5.00%	2.147	2.265	2.424	2.265	5.239	15.246	65.639	0.307	4.709
<b>3</b>	5.00%	2.146	2.265	2.424	2.265	5.272	15.275	65.490	0.307	4.709
<b>PROMEDIO</b>		<b>2.147</b>	<b>2.265</b>	<b>2.424</b>	<b>2.265</b>	<b>5.227</b>	<b>15.235</b>	<b>65.694</b>	<b>0.307</b>	<b>4.709</b>
<b>1</b>	5.50%	2.159	2.276	2.455	2.276	5.129	15.209	66.276	0.830	4.716
<b>2</b>	5.50%	2.164	2.276	2.455	2.276	4.914	15.017	67.274	0.830	4.716
<b>3</b>	5.50%	2.161	2.276	2.455	2.276	5.051	15.139	66.635	0.830	4.716
<b>PROMEDIO</b>		<b>2.161</b>	<b>2.276</b>	<b>2.455</b>	<b>2.276</b>	<b>5.032</b>	<b>15.122</b>	<b>66.728</b>	<b>0.830</b>	<b>4.716</b>
<b>1</b>	6.00%	2.160	2.248	2.438	2.248	3.880	15.596	75.124	0.556	5.477
<b>2</b>	6.00%	2.160	2.248	2.438	2.248	3.901	15.615	75.017	0.556	5.477
<b>3</b>	6.00%	2.161	2.248	2.438	2.248	3.851	15.571	75.266	0.556	5.477
<b>PROMEDIO</b>		<b>2.161</b>	<b>2.248</b>	<b>2.438</b>	<b>2.248</b>	<b>3.877</b>	<b>15.594</b>	<b>75.136</b>	<b>0.556</b>	<b>5.477</b>
<b>1</b>	6.50%	2.167	2.245	2.453	2.245	3.460	15.785	78.080	0.808	5.744
<b>2</b>	6.50%	2.171	2.245	2.453	2.245	3.295	15.641	78.934	0.808	5.744
<b>3</b>	6.50%	2.173	2.245	2.453	2.245	3.205	15.563	79.405	0.808	5.744
<b>PROMEDIO</b>		<b>2.170</b>	<b>2.245</b>	<b>2.453</b>	<b>2.245</b>	<b>3.320</b>	<b>15.663</b>	<b>78.806</b>	<b>0.808</b>	<b>5.744</b>
<b>1</b>	7.00%	2.178	2.244	2.471	2.244	2.925	15.800	81.486	1.108	5.969
<b>2</b>	7.00%	2.180	2.244	2.471	2.244	2.859	15.743	81.839	1.108	5.969
<b>3</b>	7.00%	2.178	2.244	2.471	2.244	2.926	15.801	81.485	1.108	5.969
<b>PROMEDIO</b>		<b>2.179</b>	<b>2.244</b>	<b>2.471</b>	<b>2.244</b>	<b>2.903</b>	<b>15.781</b>	<b>81.603</b>	<b>1.108</b>	<b>5.969</b>
<b>Promedio General Gse=</b>				<b>2.448</b>						

Los agregados presentes en una mezcla asfáltica, absorben menos cantidad de ligante asfáltico en comparación con la absorción de agua por parte de los mismos, por esta razón la gravedad específica efectiva de los agregados siempre será mayor que su gravedad específica bulk pero menor a su gravedad específica aparente, considerándose este parámetro erróneo si llegase a recaer fuera de estos límites.

Si este valor es erróneo se deberá realizar una verificación de la composición de la mezcla tanto en agregados como en ligante asfáltico para corregir el error.

Para comparar estos resultados es necesario calcular la gravedad específica aparente de los agregados, la cual requiere las gravedades específicas aparentes de cada agregado constituyente y se procede de igual manera a calcular la gravedad específica bulk, es decir mediante la misma fórmula. (the asphalt institute, GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE , 1974)

$$Gsa = \frac{44.02 + 48.31 + 7.67}{\frac{44.02}{2.59} + \frac{48.31}{2.59} + \frac{7.67}{2.70}}$$

$$Gsa = 2.60 \text{ gr/cm}^3$$

Una vez determinados los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica se analiza el comportamiento de la mezcla ante el efecto de cargas para lo cual se efectúa un análisis de estabilidad – flujo de la briqueta sometida a una carga vertical por parte de la prensa Marshall de 27 KN (6.000 libras) de capacidad, el cual aplica carga al espécimen de ensayo a una velocidad de avance constante de 50,8 mm/min. (2”).

Para llevar a cabo este ensayo se debe preparar la briqueta de acuerdo a ciertas condiciones de aplicación y temperatura proceso que se lleva a cabo de la siguiente manera.

1. Se calienta la briqueta en agua precalentada a una temperatura de 60 °C, en el baño maría por un lapso de 30 a 40 minutos.



**Fig. 60:** Briqueta sumergida a 60°C.

2. Una vez cumplido el lapso de calentamiento se retira la briqueta del baño maría, para luego ser colocada en las mordazas Marshall que deben estar precalentadas, y se colocan en la prensa Marshall para aplicar carga al espécimen y medir su valor resistencia hasta la falla que se registra como valor de estabilidad e igualmente se registra el valor de deformación al momento de la falla a través del deformímetro que será denominado como valor de flujo.

Se debe tomar en cuenta que desde el momento en que se retira la briqueta del baño maría no puede transcurrir un tiempo excesivo antes de su preparación y colocación del espécimen en la prensa Marshall para su posterior ensayo y registro de datos.

El tiempo determinado para llevar a cabo este procedimiento es de 30 segundos, además de ser necesario se debe eliminar el exceso de agua en la briqueta al salir del baño maría con un paño o franela, y las mordazas Marshall deben estar lubricadas para que la briqueta no se adhiera a las mismas



**Fig. 61:** Ensayo Marshall de estabilidad – flujo.

Una vez realizado el ensayo se registran y anotan los datos para luego ser procesados de acuerdo a los parámetros necesarios para su correcta interpretación, ya que el valor de estabilidad debe ser corregido mediante un factor de correlación de estabilidad el cual dependerá tanto del volumen de la briqueta, así como también del valor medido de altura de la briqueta. (the asphalt institute, TABLE III-1-STABILITY CORRELATION RATIOS, 1974).

**Tabla No. 30:** Tabla de factores de correlación de estabilidad (the asphalt institute, TABLE III-1-STABILITY CORRELATION RATIOS, 1974)

Volume of Specimens, cm <sup>3</sup>	Approximate Thickness of Specimens,		Correlation Ratio
	in.	mm.	
<b>200 to 213</b>	1	25.4	5.56
<b>214 to 225</b>	1 1/16	27.0	5
<b>226 to 237</b>	1 1/8	28.6	4.55
<b>238 to 250</b>	1 3/16	30.2	4.17
<b>251 to 264</b>	1 1/4	31.8	3.85
<b>265 to 276</b>	1 5/16	33.3	3.57
<b>277 to 289</b>	1 3/8	34.9	3.33
<b>290 to 301</b>	1 7/16	36.5	3.03
<b>302 to 316</b>	1 1/2	38.1	2.78
<b>317 to 328</b>	1 9/16	39.7	2.5
<b>329 to 340</b>	1 5/8	41.3	2.27
<b>341 to 353</b>	1 11/16	42.9	2.08
<b>354 to 367</b>	1 3/4	44.4	1.92
<b>368 to 379</b>	1 13/16	46.0	1.79
<b>380 to 392</b>	1 7/8	47.6	1.67
<b>393 to 405</b>	1 15/16	49.2	1.56
<b>406 to 420</b>	2	50.8	1.47
<b>421 to 431</b>	2 1/16	52.4	1.39
<b>432 to 443</b>	2 1/8	54.0	1.32
<b>444 to 456</b>	2 3/16	55.6	1.25
<b>457 to 470</b>	1 1/4	57.2	1.19
<b>471 to 482</b>	2 5/16	58.7	1.14
<b>483 to 495</b>	2 3/8	60.3	1.09
<b>496 to 508</b>	2 7/16	61.9	1.04
<b>509 to 522</b>	2 1/2	63.5	1
<b>523 to 535</b>	2 9/16	64.0	0.96
<b>536 to 546</b>	2 5/8	65.1	0.93
<b>547 to 559</b>	2 11/16	66.7	0.89
<b>560 to 573</b>	2 3/4	68.3	0.86
<b>574 to 585</b>	2 13/16	71.4	0.83
<b>586 to 598</b>	2 7/8	73.0	0.81
<b>599 to 610</b>	2 15/16	74.6	0.78
<b>611 to 625</b>	3	76.2	0.76



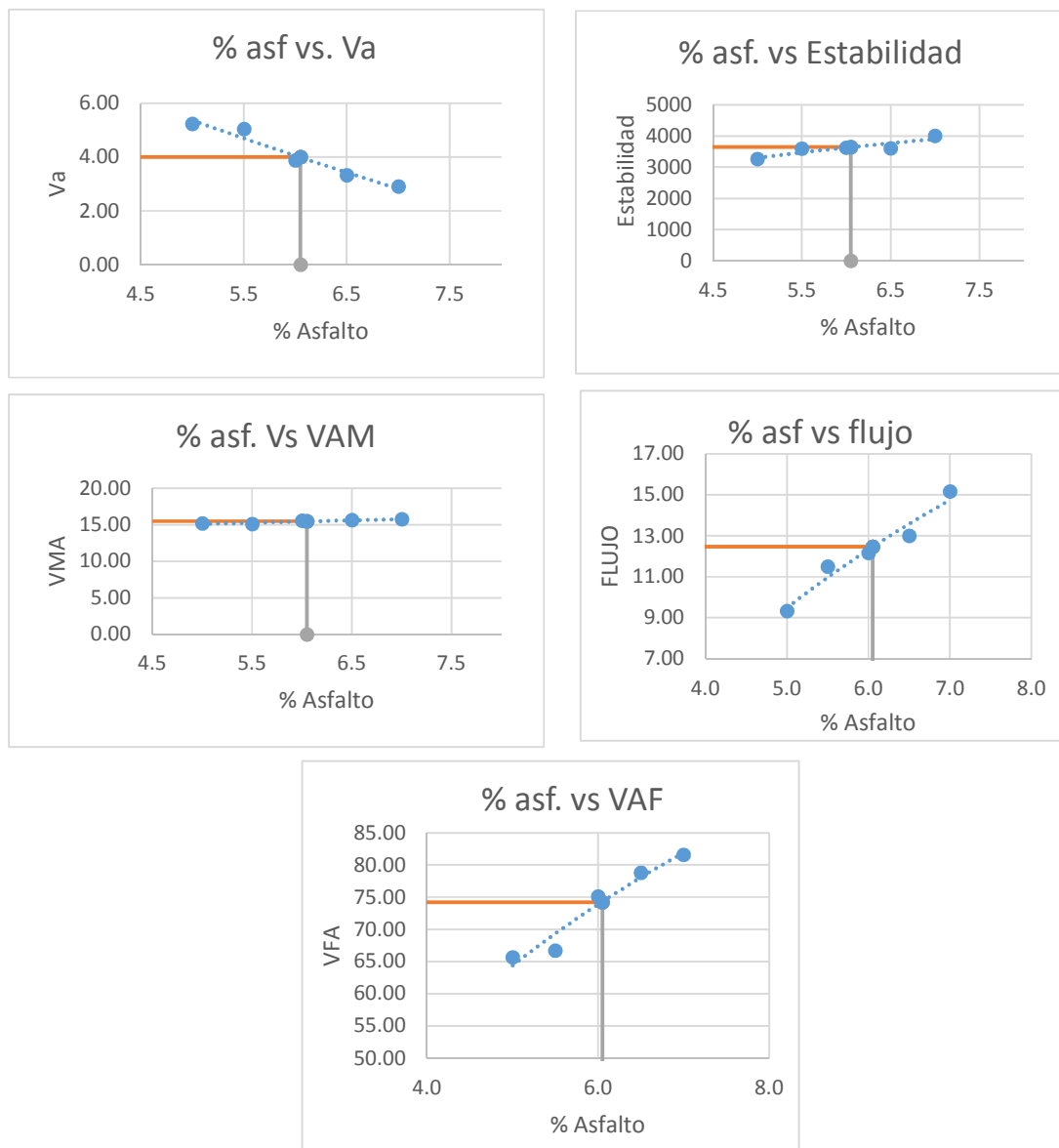
Una vez corregidos de acuerdo a la tabla No. 30, estos datos se tabulan y representan en una tabla para verificar y evaluar sus parámetros de resistencia, es entonces así que para este proyecto se obtuvieron los siguientes datos provenientes de las briquetas ensayadas.

**Tabla No. 31:** Valores de estabilidad – flujo en mezcla Marshall tradicional.

<i>Briqueta</i>	<i>Porcentaje Asfalto (Pb)</i>	<i>Estabilidad.</i>				<i>Flujo 0.01"</i>
		<i>Medida</i>	<i>Medida</i>	<i>Factor de Corrección.</i>	<i>Corregida</i>	
		<i>Kgf</i>	<i>lbf</i>	<i>-</i>	<i>lbf</i>	
1	5.00%	1270.4	2800.753	1.19	3332.896	9.00
2	5.00%	1269.2	2798.107	1.19	3329.747	9.00
3	5.00%	1197.3	2639.595	1.19	3141.118	10.00
<b>PROMEDIO</b>					<b>3267.920</b>	<b>9.33</b>
1	5.50%	1297.2	2859.836	1.25	3574.796	11.00
2	5.50%	1305.1	2877.253	1.25	3596.566	11.50
3	5.50%	1308.4	2884.528	1.25	3605.660	12.00
<b>PROMEDIO</b>					<b>3592.341</b>	<b>11.50</b>
1	6.00%	1342.1	2958.82	1.19	3521.001	12.50
2	6.00%	1336.5	2946.48	1.25	3683.098	12.00
3	6.00%	1330.3	2932.81	1.25	3666.012	12.00
<b>PROMEDIO</b>					<b>3623.370</b>	<b>12.17</b>
1	6.50%	1302.3	2871.080	1.25	3588.850	13.50
2	6.50%	1301.7	2869.757	1.25	3587.197	13.00
3	6.50%	1318.2	2906.134	1.25	3632.667	12.50
<b>PROMEDIO</b>					<b>3602.905</b>	<b>13.00</b>
1	7.00%	1442.1	3179.286	1.25	3974.108	16.00
2	7.00%	1437.4	3168.925	1.25	3961.156	15.00
3	7.00%	1486.3	3276.731	1.25	4095.913	14.50
<b>PROMEDIO</b>					<b>4010.392</b>	<b>15.17</b>

Una vez revisados los parámetros de estabilidad flujo en la tabla No. 31, se procede a llevar los mismos hacia una representación gráfica representándolos en curvas comparativas a partir de las cuales se determinara los valores óptimos exactos de contenido de asfalto de acuerdo al valor óptimo de vacíos de aire necesarios en la mezcla

asfáltica, valores que se mencionaron anteriormente en este capítulo deben estar entre el 3% y 5% razón por la cual se determina el contenido óptimo de asfalto en la mezcla al 4% de vacíos de aire necesarios, además se determinan también los valores exactos de VAM, VAF, estabilidad, flujo, todos estos de acuerdo al porcentaje óptimo determinado inicialmente



**Fig. 62:** Curvas Marshall para determinación de parámetros óptimos.

Con la representación gráfica de los valores obtenidos mediante el ensayo, y la determinación de los porcentajes y valores óptimos obtenidos mediante las mismas se concluye el diseño Marshall y se especifica de manera exacta todos y cada uno de los parámetros requeridos para el correcto desempeño de la mezcla asfáltica en forma de carpeta asfáltica en que se va a usar.

### **6.3. DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA UTILIZANDO EL MÉTODO MARSHALL ADICIONANDO ÚNICAMENTE LIMADURA METÁLICA.**

Para dar paso al uso de los 3 materiales alternativos propuestos en esta investigación se debe incluir los mismos en el proceso Marshall de diseño de mezclas asfálticas calientes, el primer material que se incluye es la limadura metálica la cual será incluida como porcentaje en base al peso total de agregados presentes en la mezcla asfáltica, determinando con esto, que tanto la mezcla de agregados así como el porcentaje óptimo de ligante asfáltico permanecen invariables en relación al porcentaje de limadura metálica que se incluirá en la mezcla.

Dicho esto se denota que el objetivo de incluir este material en la mezcla asfáltica diseñada es el encontrar un porcentaje de limadura metálica óptima, que permita mediante su inclusión en la mezcla de acuerdo al resultado, una mejora o perjuicio de la misma en cuanto a su eficiencia como material asfáltico comprobando esto mediante la evaluación de resultados que permitan diferenciar la variación de sus parámetros de estabilidad o flujo en beneficio o perjuicio de aquellos obtenidos en la mezcla asfáltica original.

Se realiza mezclas asfálticas adicionando porcentajes del 10% al 30% de limadura metálica aumentado en 5 % su valor de contenido es decir se elaboran mezclas asfálticas

al 10%, 15%, 20%, 25%, y 30% de contenido de limadura metálica con relación al peso total de agregados, cabe destacar que se desarrolló mezclas de prueba con contenidos del 3%, 5%, 8%, y 40% en contenido de limadura pero los resultados fueron descartados por su irrelevancia de acuerdo a los resultados obtenidos en la mezcla original.



**Fig. 63:** Limadura metálica adicionada al mix de agregados.

Todos y cada uno de los procesos mencionados para llevar a cabo el método Marshall deben aplicarse de la misma manera en toda su extensión, con la diferencia de que luego de tener el mix de agregados en la proporción óptima se debe adicionar la limadura metálica en porcentaje de acuerdo al peso total de agregados y luego de tener las temperaturas de mezcla establecidas tanto en agregados limadura metálica y ligante asfáltico, se procede a realizar la mezcla en la estufa



**Fig. 64:** Control de temperaturas de mezcla adicionando limadura metálica.

Se realizan de igual manera un total de 15 briquetas como exige el método para su ensayo y determinación de parámetros tanto volumétricos como de estabilidad-flujo usando los porcentajes ya mencionados mediante las cuales se establecerán los gráficos de análisis y determinación de cantidades óptimas de limadura metálica a intervenir en la mezcla.

Una vez realizada la mezcla se debe compactar en el pisón Marshall con 75 golpes por cara teniendo en cuenta de aplicar el mismo proceso descrito anteriormente sobre todo el control de temperaturas tanto en agregados como en elementos en los procesos de mezcla, compactación y ensayo, que intervienen en el proceso.

Se realizan los ensayos Rice (densidad máxima teórica), para cada porcentaje de limadura metálica ensayado.

**Tabla No. 32:** Valores de densidad máxima teórica Rice para mezcla adicionada con limadura metálica.

<i>% Limadura Metálica</i>	<i>% Asfalto</i>	<i>Temp. del Agua °C</i>	<i>Densidad del Agua (gr/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Peso del Picnómetro (gr.)</i>	<i>Densidad Máxima Teórica "Gmm"</i>
<b>10.00%</b>	6.00%	25.00	0.99713	351.70	<b>2.2370</b>
<b>15.00%</b>	6.00%	25.00	0.99713	351.70	<b>2.2359</b>
<b>20.00%</b>	6.00%	25.00	0.99713	351.70	<b>2.2367</b>
<b>25.00%</b>	6.00%	25.00	0.99713	351.70	<b>2.2372</b>
<b>30.00%</b>	6.00%	25.00	0.99713	351.70	<b>2.2377</b>

En la tabla No. 32 se presentan los datos tomados mediante el ensayo Rice para los diferentes contenidos de limadura metálica en la mezcla asfáltica, los cuales serán necesarios en la determinación de la densidad máxima teórica de las muestras realizadas con la adición de este material.

Se procede a determinar las propiedades volumétricas de la mezcla tomando los pesos al aire, sumergido, y saturado superficie seca de las briquetas realizadas y tabulándolos para su interpretación.

**Tabla No. 33:** Pesos de las briquetas evaluadas adicionando limadura metálica.

<i>Briqueta</i>	<i>Porcentaje</i>	<i>Porcentaje</i>	<i>Porcentaje</i>	<i>Peso</i>	<i>Peso Sat.</i>	<i>Peso</i>
	<i>Limadura</i>	<i>Asfalto</i>	<i>Agregado</i>	<i>Aire</i>	<i>Sup. Seca</i>	<i>en agua</i>
		<i>(Pb)</i>	<i>(Ps)</i>	<i>(gr.)</i>	<i>(gr.)</i>	<i>(gr.)</i>
<b>1</b>		6.05%	93.95%	984.87	988.43	531.88
<b>2</b>	10.00%	6.05%	93.95%	985.01	988.93	532.03
<b>3</b>		6.05%	93.95%	984.91	988.34	532.01
<b>1</b>		6.05%	93.95%	989.12	993.56	540.2
<b>2</b>	15.00%	6.05%	93.95%	989.24	993.8	540.31
<b>3</b>		6.05%	93.95%	989.34	994	540.67
<b>1</b>		6.05%	93.95%	991.98	993.87	540.54
<b>2</b>	20.00%	6.05%	93.95%	991.44	993.47	540.12
<b>3</b>		6.05%	93.95%	991.23	993.22	540.02
<b>1</b>		6.05%	93.95%	993.64	997.92	544.99
<b>2</b>	25.00%	6.05%	93.95%	993.74	998.1	544.03
<b>3</b>		6.05%	93.95%	993.56	997.88	545.89
<b>1</b>		6.05%	93.95%	997.01	998.57	545.01
<b>2</b>	30.00%	6.05%	93.95%	996.91	998.38	544.6
<b>3</b>		6.05%	93.95%	996.83	998.12	545.98

Una vez tomados los pesos de los especímenes Marshall (briquetas) en la tabla No. 33, se procede a aplicar las fórmulas propuestas por el instituto del asfalto (the asphalt institute, mix design methods for asphalt concrete, 1974) detalladas en el capítulo VI de este documento, con el objetivo de determinar los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica elaborada con la adición de limadura metálica cuyo resultados son expuestos en la siguiente tabla:

**Tabla No. 34:** Propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas evaluadas adicionando limadura metálica.

<i>Briqueta</i>	<i>% Lim. Metálica</i>	<i>% Asfalto</i>	<i>Gmb</i> -	<i>Gmm (Ensay)</i> -	<i>Gse</i> -	<i>Gmm (calc)</i> -	<i>V. a.</i> %	<i>VMA</i> %	<i>VFA</i> %	<i>Pba</i> %	<i>Pbe</i> %
<b>1</b>		6.05%	2.157	2.237	2.427	2.237	3.568	15.768	77.370	0.360	5.712
<b>2</b>	10.00%	6.05%	2.156	2.237	2.427	2.237	3.629	15.821	77.065	0.360	5.712
<b>3</b>		6.05%	2.158	2.237	2.427	2.237	3.518	15.724	77.627	0.360	5.712
<b>PROMEDIO</b>			<b>2.157</b>	<b>2.237</b>	<b>2.427</b>	<b>2.237</b>	<b>3.572</b>	<b>15.771</b>	<b>77.354</b>	<b>0.360</b>	<b>5.712</b>
<b>1</b>		6.05%	2.182	2.237	2.427	2.237	2.471	14.810	83.317	0.360	5.712
<b>2</b>	15.00%	6.05%	2.181	2.237	2.427	2.237	2.487	14.824	83.224	0.360	5.712
<b>3</b>		6.05%	2.182	2.237	2.427	2.237	2.443	14.785	83.479	0.360	5.712
<b>PROMEDIO</b>			<b>2.182</b>	<b>2.237</b>	<b>2.427</b>	<b>2.237</b>	<b>2.467</b>	<b>14.806</b>	<b>83.340</b>	<b>0.360</b>	<b>5.712</b>
<b>1</b>		6.05%	2.188	2.237	2.427	2.237	2.182	14.558	85.009	0.360	5.712
<b>2</b>	20.00%	6.05%	2.187	2.237	2.427	2.237	2.240	14.608	84.667	0.360	5.712
<b>3</b>		6.05%	2.187	2.237	2.427	2.237	2.228	14.598	84.736	0.360	5.712
<b>PROMEDIO</b>			<b>2.187</b>	<b>2.237</b>	<b>2.427</b>	<b>2.237</b>	<b>2.217</b>	<b>14.588</b>	<b>84.804</b>	<b>0.360</b>	<b>5.712</b>
<b>1</b>		6.05%	2.194	2.237	2.427	2.237	1.932	14.339	86.526	0.360	5.712
<b>2</b>	25.00%	6.05%	2.189	2.237	2.427	2.237	2.168	14.546	85.092	0.360	5.712
<b>3</b>		6.05%	2.198	2.237	2.427	2.237	1.736	14.168	87.747	0.360	5.712
<b>PROMEDIO</b>			<b>2.194</b>	<b>2.237</b>	<b>2.427</b>	<b>2.237</b>	<b>1.946</b>	<b>14.351</b>	<b>86.455</b>	<b>0.360</b>	<b>5.712</b>
<b>1</b>		6.05%	2.198	2.237	2.427	2.237	1.736	14.168	87.746	0.360	5.712
<b>2</b>	30.00%	6.05%	2.197	2.237	2.427	2.237	1.794	14.218	87.385	0.360	5.712
<b>3</b>		6.05%	2.205	2.237	2.427	2.237	1.445	13.914	89.612	0.360	5.712
<b>PROMEDIO</b>			<b>2.200</b>	<b>2.237</b>	<b>2.427</b>	<b>2.237</b>	<b>1.658</b>	<b>14.100</b>	<b>88.248</b>	<b>0.360</b>	<b>5.712</b>
<i>Promedio General Gse=</i>					<b>2.427</b>						



En la tabla No. 34 se presentan los datos correspondientes al análisis volumétrico de las muestras que se someten a ensayo.

Una vez realizado el cálculo de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica, se procede al ensayo de los especímenes en la prensa Marshall para la determinación de los valores de estabilidad y flujo así.

**Tabla No. 35:** Valores de estabilidad – flujo en mezcla asfáltica adicionada con limadura metálica.

<i>Estabilidad</i>						
<i>Briqueta</i>	<i>Porcentaje</i>	<i>Medida</i>	<i>Medida</i>	<i>Corrección.</i>	<i>Corregida</i>	<i>Flujo</i>
	<i>Limadura</i>	<i>Kgf</i>	<i>lbf</i>	<i>-</i>	<i>lbf</i>	<i>0.01"</i>
<b>1</b>		1421.5	3133.871	1.19	3729.307	11.00
<b>2</b>	10.00%	1420.8	3132.328	1.19	3727.470	12.00
<b>3</b>		1435.2	3164.074	1.19	3765.249	12.00
<b>PROMEDIO</b>					<b>3740.675</b>	<b>11.67</b>
<b>1</b>		1550.3	3417.826	1.25	4272.283	11.00
<b>2</b>	15.00%	1553.6	3425.102	1.25	4281.377	12.00
<b>3</b>		1499.3	3305.391	1.25	4131.738	13.00
<b>PROMEDIO</b>					<b>4228.466</b>	<b>12.00</b>
<b>1</b>		1682.1	3708.40	1.25	4635.495	14.00
<b>2</b>	20.00%	1694.8	3736.39	1.25	4670.493	11.00
<b>3</b>		1695.2	3737.28	1.25	4671.595	12.00
<b>PROMEDIO</b>					<b>4659.194</b>	<b>12.33</b>
<b>1</b>		1723.1	3798.785	1.25	4748.482	12.00
<b>2</b>	25.00%	1724	3800.769	1.25	4750.962	13.00
<b>3</b>		1712.1	3774.534	1.25	4718.168	13.00
<b>PROMEDIO</b>					<b>4739.204</b>	<b>12.67</b>
<b>1</b>		1945.3	4288.652	1.25	5360.815	13.00
<b>2</b>	30.00%	1954.1	4308.053	1.25	5385.066	13.00
<b>3</b>		1923.9	4241.473	1.25	5301.842	16.00
<b>PROMEDIO</b>					<b>5349.241</b>	<b>14.00</b>

Una vez determinados los valores de estabilidad y flujo en la tabla No. 35, estos deben ser analizados en comparación con la mezcla tradicional diseñada como parámetro de comparación para con las mezclas a las que se adiciona los materiales reciclados.

#### **6.4. DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA UTILIZANDO EL MÉTODO MARSHALL ADICIONANDO ÚNICAMENTE ALAMBRE METÁLICO DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO.**

Se procede a adicionar el segundo material reciclado el alambre de neumáticos fuera de uso el cual será incluido como porcentaje en base al peso total de agregados presentes en la mezcla asfáltica determinando con esto, que tanto la mezcla de agregados así como el porcentaje óptimo de ligante asfáltico permanecen invariables en relación al porcentaje de alambre metálico de neumáticos fuera de uso que se incluirá en la mezcla.

Dicho esto se denota que el objetivo de incluir este material en la mezcla asfáltica diseñada es del de encontrar el porcentaje de alambre metálico de neumáticos fuera de uso óptimo que permita mediante su inclusión en la mezcla de acuerdo al resultado una mejora o perjuicio de la misma en cuanto a su eficiencia como material asfáltico comprobando esto mediante la evaluación de resultados que permitan diferenciar la variación de sus parámetros de estabilidad o flujo en beneficio o perjuicio de aquellos obtenidos en la mezcla asfáltica tradicional.

Se realiza mezclas asfálticas adicionando porcentajes del 10% al 30% de limadura metálica aumentado en 5 % su valor de contenido es decir se elaboran mezclas asfálticas al 10%, 15%, 20%, 25%, y 30% de contenido de limadura metálica con relación al peso total de agregados, cabe destacar que se desarrolló mezclas de prueba con contenidos del 3%, 5%, 8%, y 40% en contenido de limadura pero los resultados fueron descartados por su irrelevancia de acuerdo a los resultados obtenidos en la mezcla original.



**Fig. 65:** Alambre metálico de neumáticos fuera de uso adicionada al mix de agregados.

Todos y cada uno de los procesos mencionados para llevar a cabo el método Marshall deben aplicarse de la misma manera en toda su extensión, con la diferencia de que luego de tener el mix de agregados en la proporción óptima se debe adicionar el alambre metálico de neumáticos fuera de uso en porcentaje de acuerdo al peso total de agregados y luego de tener las temperaturas de mezcla establecidas tanto en agregados alambre metálico de neumáticos fuera de uso y ligante asfáltico, se procede a realizar la mezcla en la estufa.

Se realizan de igual manera un total de 15 briquetas como exige el método para su ensayo y determinación de parámetros tanto volumétricos como de estabilidad-flujo usando los porcentajes ya mencionados mediante las cuales se establecerán los gráficos de análisis y determinación de cantidades óptimas de alambre metálico de neumáticos fuera de uso a intervenir en la mezcla.

Una vez realizada la mezcla se debe compactar en el pisón Marshall con 75 golpes por cara teniendo en cuenta de aplicar el mismo proceso descrito anteriormente sobre todo el control de temperaturas tanto en agregados como en elementos en los procesos de mezcla, compactación y ensayo, que intervienen en el proceso.

Se realizan los ensayos Rice (densidad máxima teórica), para cada porcentaje de alambre metálico de neumáticos fuera de uso ensayado.

**Tabla No. 36:** Valores de densidad máxima teórica Rice para mezcla adicionada con alambre de neumáticos fuera de uso.

<i>% Fibra Metálica</i>	<i>% Asfalto</i>	<i>Temp. del Agua °C</i>	<i>Peso del Picnómetro (gr.)</i>	<i>Peso Pic+agua +muestra (gr.)</i>	<i>Densidad Máxima Teórica "Gmm"</i>
<b>10.00%</b>	6.05%	25.00	351.70	2475.05	<b>2.2587</b>
<b>15.00%</b>	6.05%	25.00	351.70	2475.08	<b>2.2584</b>
<b>20.00%</b>	6.05%	25.00	351.70	2474.95	<b>2.2580</b>
<b>25.00%</b>	6.05%	25.00	351.70	2475.00	<b>2.2582</b>
<b>30.00%</b>	6.05%	25.00	351.70	2474.97	<b>2.2585</b>

Una vez tomados los datos necesarios para calcular la densidad máxima teórica y determinada la misma en la tabla No. 36; Para la determinación de las propiedades volumétricas de la mezcla se debe tomar los pesos del espécimen elaborado luego de extraído de su molde estos pesos serán tomados al aire, sumergido, y saturado superficie seca de todas las briquetas realizadas, estos se registran y tabulan para su posterior interpretación, y a través de esto llegar a la determinación de la propiedades volumétricas antes mencionadas.

**Tabla No. 37:** Pesos de las briquetas elaboradas adicionando alambre de neumáticos fuera de uso.

<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>Peso</i>	<i>Peso Sat.</i>	<i>Peso</i>
<i>Fibras Met.</i>	<i>Asfalto (Pb)</i>	<i>Agregado (Ps)</i>	<i>Aire</i>	<i>Sup. Seca</i>	<i>en agua</i>
			<i>(gr.)</i>	<i>(gr.)</i>	<i>(gr.)</i>
<b>10.00%</b>	6.05%	93.95%	984.51	989.32	528.23
	6.05%	93.95%	984.72	989.43	528.42
	6.05%	93.95%	985.02	990.03	529.15
<b>15.00%</b>	6.05%	93.95%	987.12	992.33	534.23
	6.05%	93.95%	987.27	992.54	534.51
	6.05%	93.95%	987.67	993.01	533.89
<b>20.00%</b>	6.05%	93.95%	990.8	994.9	536.97
	6.05%	93.95%	991.5	995.7	537.02
	6.05%	93.95%	991.2	995.4	536.67
<b>25.00%</b>	6.05%	93.95%	994.98	998.34	541.12
	6.05%	93.95%	995.24	998.8	541.91
	6.05%	93.95%	996.32	999.02	544.12
<b>30.00%</b>	6.05%	93.95%	997.23	1001.68	545.59
	6.05%	93.95%	997.51	1001.74	545.63
	6.05%	93.95%	997.43	1002.01	545.9

Una vez tomados los pesos de los especímenes Marshall (briquetas) en la tabla No. 37, se procede a aplicar las fórmulas propuestas por el instituto del asfalto (the asphalt institute, mix design methods for asphalt concrete, 1974) detalladas en el capítulo VI de este documento, con el objetivo de determinar los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica elaborada con la adición de limadura metálica cuyo resultados son expuestos en la siguiente tabla:

**Tabla No. 38:** Propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas evaluadas adicionando alambre de neumáticos fuera de uso.

<i>Briqueta</i>	%	%	<i>Gmb</i>	<i>Gmm (Ensay)</i>	<i>Gse</i>	<i>Gmm (calc)</i>	<i>V. a.</i>	<i>VAM</i>	<i>VAF</i>	<i>Pba</i>	<i>Pbe</i>
	<i>Fibras Met.</i>	<i>Asfalto</i>	-	-	-	-	%	%	%	%	%
1		6.05%	2.135	2.258	2.453	2.258	5.447	16.628	67.241	0.810	5.289
2	10.00%	6.05%	2.136	2.258	2.453	2.258	5.411	16.596	67.398	0.810	5.289
3		6.05%	2.137	2.258	2.453	2.258	5.355	16.547	67.637	0.810	5.289
	<b>PROMEDIO</b>		<b>2.136</b>	<b>2.258</b>	<b>2.453</b>	<b>2.258</b>	<b>5.404</b>	<b>16.590</b>	<b>67.425</b>	<b>0.810</b>	<b>5.289</b>
1		6.05%	2.155	2.258	2.453	2.258	4.578	15.862	71.139	0.810	5.289
2	15.00%	6.05%	2.155	2.258	2.453	2.258	4.549	15.836	71.276	0.810	5.289
3		6.05%	2.151	2.258	2.453	2.258	4.737	16.002	70.399	0.810	5.289
	<b>PROMEDIO</b>		<b>2.154</b>	<b>2.258</b>	<b>2.453</b>	<b>2.258</b>	<b>4.621</b>	<b>15.900</b>	<b>70.938</b>	<b>0.810</b>	<b>5.289</b>
1		6.05%	2.164	2.258	2.453	2.258	4.186	15.517	73.019	0.810	5.289
2	20.00%	6.05%	2.162	2.258	2.453	2.258	4.276	15.595	72.584	0.810	5.289
3		6.05%	2.161	2.258	2.453	2.258	4.315	15.630	72.393	0.810	5.289
	<b>PROMEDIO</b>		<b>2.162</b>	<b>2.258</b>	<b>2.453</b>	<b>2.258</b>	<b>4.259</b>	<b>15.581</b>	<b>72.666</b>	<b>0.810</b>	<b>5.289</b>
1		6.05%	2.176	2.258	2.453	2.258	3.633	15.028	75.827	0.810	5.289
2	25.00%	6.05%	2.178	2.258	2.453	2.258	3.538	14.945	76.326	0.810	5.289
3		6.05%	2.190	2.258	2.453	2.258	3.011	14.480	79.207	0.810	5.289
	<b>PROMEDIO</b>		<b>2.182</b>	<b>2.258</b>	<b>2.453</b>	<b>2.258</b>	<b>3.394</b>	<b>14.818</b>	<b>77.120</b>	<b>0.810</b>	<b>5.289</b>
1		6.05%	2.186	2.258	2.453	2.258	3.176	14.625	78.287	0.810	5.289
2	30.00%	6.05%	2.187	2.258	2.453	2.258	3.153	14.605	78.414	0.810	5.289
3		6.05%	2.187	2.258	2.453	2.258	3.160	14.612	78.371	0.810	5.289
	<b>PROMEDIO</b>		<b>2.187</b>	<b>2.258</b>	<b>2.453</b>	<b>2.258</b>	<b>3.163</b>	<b>14.614</b>	<b>78.357</b>	<b>0.810</b>	<b>5.289</b>
<i>Promedio General Gse=</i>					<b>2.453</b>						

Una vez realizado el cálculo de las propiedades volumétricas en la tabla No. 38, de la mezcla asfáltica, se procede al ensayo de los especímenes en la prensa Marshall para la determinación de los valores de estabilidad y flujo así.

**Tabla No. 39:** Valores de estabilidad – flujo en mezcla asfáltica adicionando alambre de neumáticos fuera de uso.

<i>Briqueta</i>	<i>Porcentaje Fibras Metálicas.</i>	<i>Estabilidad (lb)</i>				<i>Flujo 0.01"</i>
		<i>Medida Kgf</i>	<i>Medida lbf</i>	<i>Correc. -</i>	<i>Corregida lbf</i>	
<b>1</b>		1134.9	2502.026	1.19	2977.411	9.00
<b>2</b>	10.00%	1135.7	2503.790	1.19	2979.510	10.00
<b>3</b>		1112.1	2451.761	1.19	2917.595	12.00
<b>PROMEDIO</b>					<b>2958.172</b>	<b>10.33</b>
<b>1</b>		1365.2	3009.751	1.19	3581.603	11.00
<b>2</b>	15.00%	1358.4	2994.759	1.19	3563.764	10.00
<b>3</b>		1312.6	2893.788	1.19	3443.607	14.00
<b>PROMEDIO</b>					<b>3529.658</b>	<b>11.67</b>
<b>1</b>		1351.2	2978.89	1.19	3544.874	12.00
<b>2</b>	20.00%	1371.8	3024.30	1.19	3598.919	11.00
<b>3</b>		1374.2	3029.59	1.19	3605.215	11.50
<b>PROMEDIO</b>					<b>3583.003</b>	<b>11.50</b>
<b>1</b>		1632.9	3599.928	1.25	4499.910	11.00
<b>2</b>	25.00%	1645.8	3628.368	1.25	4535.460	11.00
<b>3</b>		1644.2	3624.841	1.25	4531.051	13.00
<b>PROMEDIO</b>					<b>4522.140</b>	<b>11.67</b>
<b>1</b>		1782.1	3928.858	1.19	4675.341	14.00
<b>2</b>	30.00%	1689.2	3724.049	1.19	4431.618	12.00
<b>3</b>		1612.3	3554.513	1.19	4229.871	16.00
<b>PROMEDIO</b>					<b>4445.610</b>	<b>14.00</b>

Una vez determinados los valores de estabilidad y flujo en la tabla No. 39, estos deben ser analizados en comparación con la mezcla tradicional diseñada como parámetro de comparación para con las mezclas a las que se adiciona los materiales reciclados.

## **6.5. DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA UTILIZANDO EL MÉTODO MARSHALL ADICIONANDO ÚNICAMENTE TETRA PAK.**

Se procede a adicionar el tercer material reciclado las fibras tetra pak las cuales serán incluidas como porcentaje en base al peso total de agregados presentes en la mezcla asfáltica determinando con esto, que tanto la mezcla de agregados así como el porcentaje óptimo de ligante asfáltico permanecen invariables en relación al porcentaje de fibras tetra pak que se incluirá en la mezcla.

Dicho esto se denota que el objetivo de incluir este material en la mezcla asfáltica diseñada es el de encontrar el porcentaje de fibras tetra pak óptimo que permita mediante su inclusión en la mezcla de acuerdo al resultado una mejora o deterioro de la misma en cuanto a su eficiencia como material asfáltico comprobando esto mediante la evaluación de resultados que permitan diferenciar la variación de sus parámetros de estabilidad o flujo de aquellos obtenidos en la mezcla asfáltica tradicional.

Se realiza mezclas asfálticas adicionando porcentajes del 10% al 30% de fibras tetra pak aumentado en 5 % su valor de contenido es decir se elaboran mezclas asfálticas al 10%, 15%, 20%, 25%, y 30% de contenido de fibras tetra pak con relación al peso total de agregados, cabe destacar que se desarrolló mezclas de prueba con contenidos del 3%, 5%, 8%, y 40% en contenido de fibras tetra pak pero los resultados fueron descartados por su irrelevancia de acuerdo a los resultados obtenidos en la mezcla original.





**Fig. 66:** Fibras tetra pak adicionada al mix de agregados.

Todos y cada uno de los procesos mencionados para llevar a cabo el método Marshall deben aplicarse de la misma manera en toda su extensión, con la diferencia de que luego de tener el mix de agregados en la proporción óptima se debe adicionar el fibras tetra pak en porcentaje de acuerdo al peso total de agregados y luego de tener las temperaturas de mezcla establecidas tanto en agregados alambre metálico de neumáticos fuera de uso y ligante asfáltico, se procede a realizar la mezcla en la estufa.

Se realizan de igual manera un total de 15 briquetas como exige el método para su ensayo y determinación de parámetros tanto volumétricos como de estabilidad-flujo usando los porcentajes ya mencionados mediante las cuales se establecerán los gráficos de análisis y determinación de cantidades óptimas de fibras tetra pak a intervenir en la mezcla.

Una vez realizada la mezcla se debe compactar en el pisón Marshall con 75 golpes por cara teniendo en cuenta que se debe aplicar el mismo proceso descrito anteriormente sobre todo el control de temperaturas tanto en agregados como en elementos en los procesos de mezcla, compactación y ensayo, que intervienen en el proceso.

Cabe destacar que la fibra tetra pak al tener un peso específico menor al de los otros dos materiales usados en esta investigación (limadura metálica y alambre de neumáticos fuera de uso), consiste en un material más voluminoso dando como resultado que la cantidad empleada en cuanto a volumen será mayor con relación al uso de la limadura metálica y el alambre de neumáticos fuera de uso.

Se realizan los ensayos Rice (densidad máxima teórica), para cada porcentaje de fibras tetra pak ensayado.

**Tabla No. 40:** Valores de densidad máxima teórica Rice para mezcla adicionada con fibras tetra pak.

<i>% Tetra Pak</i>	<i>% Asfalto</i>	<i>Temp. del Agua °C</i>	<i>Peso del Picnómetro (gr.)</i>	<i>Peso Pic+agua +muestra (gr.)</i>	<i>Densidad Máxima Teórica "Gmm"</i>
<b>10.00%</b>	6.05%	23.00	351.70	2477.25	<b>2.1622</b>
<b>15.00%</b>	6.05%	23.00	351.70	2477.10	<b>2.1607</b>
<b>20.00%</b>	6.05%	23.00	351.70	2477.15	<b>2.1613</b>
<b>25.00%</b>	6.05%	23.00	351.70	2477.12	<b>2.1610</b>
<b>30.00%</b>	6.05%	23.00	351.70	2477.11	<b>2.1608</b>

Una vez tomados los datos necesarios para calcular la densidad máxima teórica y determinada la misma en la tabla No. 40 se procede a determinar las propiedades volumétricas de la mezcla tomando los pesos al aire, sumergido, y saturado superficie seca de las briquetas realizadas y tabulándolos para su interpretación.

**Tabla No. 41:** Pesos de las mezclas evaluadas adicionando fibras tetra pak

<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>Peso</i>	<i>Peso Sat.</i>	<i>Peso</i>
<i>Fib. tetra pak</i>	<i>Asfalto (Pb)</i>	<i>Agregado (Ps)</i>	<i>Aire (gr.)</i>	<i>Sup. Seca (gr.)</i>	<i>en agua (gr.)</i>
<b>10.00%</b>	6.05%	93.95%	980.33	986.45	504.34
	6.05%	93.95%	980.46	986.63	504.59
	6.05%	93.95%	981.23	987.44	505.21
<b>15.00%</b>	6.05%	93.95%	981.98	987.87	505.78
	6.05%	93.95%	982.33	988.67	506.63
	6.05%	93.95%	982.55	988.89	506.56
<b>20.00%</b>	6.05%	93.95%	984.77	994.34	518.45
	6.05%	93.95%	985.92	994.76	513.58
	6.05%	93.95%	984.93	994.99	517.78
<b>25.00%</b>	6.05%	93.95%	990.88	998.78	512.67
	6.05%	93.95%	991.45	999.24	514.56
	6.05%	93.95%	991.23	999.67	514.32
<b>30.00%</b>	6.05%	93.95%	998.65	1003.45	515.60
	6.05%	93.95%	998.59	1003.6	515.9
	6.05%	93.95%	998.45	1003.12	515.43

Una vez tomados los pesos de los especímenes Marshall (briquetas) en la tabla No. 41, se procede a aplicar las fórmulas propuestas por el instituto del asfalto (the asphalt institute, mix design methods for asphalt concrete, 1974) detalladas en el capítulo VI de este documento, con el objetivo de determinar los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica elaborada con la adición de fibras tetra pak cuyos resultados son expuestos en la siguiente tabla:

**Tabla No. 42:** Propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas evaluadas adicionando fibras tetra pak.

<i>Briqueta</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>Gmb</i>	<i>Gmm (Ensay)</i>	<i>Gse</i>	<i>Gmm (calc)</i>	<i>V. a.</i>	<i>VAM</i>	<i>VAF</i>	<i>Pba</i>	<i>Pbe</i>
	<i>Fib. tetra pak</i>	<i>Asfalto</i>	-	-	-	-	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>
<b>1</b>		6.05%	2.033	2.161	2.332	2.161	5.891	20.602	71.406	-1.338	7.307
<b>2</b>	10.00%	6.05%	2.034	2.161	2.332	2.161	5.865	20.580	71.503	-1.338	7.307
<b>3</b>		6.05%	2.035	2.161	2.332	2.161	5.828	20.549	71.639	-1.338	7.307
	<b>PROMEDIO</b>		<b>2.034</b>	<b>2.161</b>	<b>2.332</b>	<b>2.161</b>	<b>5.861</b>	<b>20.577</b>	<b>71.516</b>	<b>-1.338</b>	<b>7.307</b>
<b>1</b>		6.05%	2.037	2.161	2.332	2.161	5.729	20.465	72.008	-1.338	7.307
<b>2</b>	15.00%	6.05%	2.038	2.161	2.332	2.161	5.685	20.428	72.170	-1.338	7.307
<b>3</b>		6.05%	2.037	2.161	2.332	2.161	5.721	20.458	72.037	-1.338	7.307
	<b>PROMEDIO</b>		<b>2.037</b>	<b>2.161</b>	<b>2.332</b>	<b>2.161</b>	<b>5.711</b>	<b>20.450</b>	<b>72.072</b>	<b>-1.338</b>	<b>7.307</b>
<b>1</b>		6.05%	2.069	2.161	2.332	2.161	4.229	19.200	77.974	-1.338	7.307
<b>2</b>	20.00%	6.05%	2.049	2.161	2.332	2.161	5.171	19.995	74.137	-1.338	7.307
<b>3</b>		6.05%	2.064	2.161	2.332	2.161	4.478	19.410	76.927	-1.338	7.307
	<b>PROMEDIO</b>		<b>2.061</b>	<b>2.161</b>	<b>2.332</b>	<b>2.161</b>	<b>4.626</b>	<b>19.535</b>	<b>76.346</b>	<b>-1.338</b>	<b>7.307</b>
<b>1</b>		6.05%	2.038	2.161	2.332	2.161	5.661	20.408	72.262	-1.338	7.307
<b>2</b>	25.00%	6.05%	2.046	2.161	2.332	2.161	5.328	20.127	73.528	-1.338	7.307
<b>3</b>		6.05%	2.042	2.161	2.332	2.161	5.480	20.255	72.946	-1.338	7.307
	<b>PROMEDIO</b>		<b>2.042</b>	<b>2.161</b>	<b>2.332</b>	<b>2.161</b>	<b>5.490</b>	<b>20.263</b>	<b>72.912</b>	<b>-1.338</b>	<b>7.307</b>
<b>1</b>		6.05%	2.047	2.161	2.332	2.161	5.260	20.070	73.791	-1.338	7.307
<b>2</b>	30.00%	6.05%	2.048	2.161	2.332	2.161	5.237	20.050	73.882	-1.338	7.307
<b>3</b>		6.05%	2.047	2.161	2.332	2.161	5.248	20.059	73.838	-1.338	7.307
	<b>PROMEDIO</b>		<b>2.047</b>	<b>2.161</b>	<b>2.332</b>	<b>2.161</b>	<b>5.248</b>	<b>20.060</b>	<b>73.837</b>	<b>-1.338</b>	<b>7.307</b>
<i>Promedio General Gse=</i>					<b>2.332</b>						

Una vez ejecutado el cálculo de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica en la tabla No. 42 se realiza al ensayo de los especímenes en la prensa Marshall para la determinación de los valores de estabilidad y flujo así.

**Tabla No. 43:** Valores de estabilidad – flujo en mezcla asfáltica adicionando fibras tetra pak.

<i>Briqueta</i>	<i>Porcentaje Fib. tetra pak</i>	<i>Estabilidad (lb)</i>				
		<i>Medida Kgf</i>	<i>Medida lbf</i>	<i>Correc. -</i>	<i>Corregida lbf</i>	<i>Flujo 0.01''</i>
<b>1</b>		1009.2	2224.905	1.14	2536.392	13.00
<b>2</b>	10.00%	1010.9	2228.653	1.14	2540.664	12.00
<b>3</b>		1012.1	2231.299	1.14	2543.680	11.00
<b>PROMEDIO</b>					<b>2540.246</b>	<b>12.00</b>
<b>1</b>		1134.5	2501.144	1.14	2851.305	13.00
<b>2</b>	15.00%	1145.2	2524.734	1.14	2878.197	14.00
<b>3</b>		1121.4	2472.264	1.14	2818.381	12.00
<b>PROMEDIO</b>					<b>2849.294</b>	<b>13.00</b>
<b>1</b>		1277.2	2815.74	1.09	3069.161	14.00
<b>2</b>	20.00%	1278.1	2817.73	1.09	3071.324	15.00
<b>3</b>		1279.3	2820.37	1.09	3074.207	15.00
<b>PROMEDIO</b>					<b>3071.564</b>	<b>14.67</b>
<b>1</b>		1245.2	2745.196	1.09	2992.264	14.00
<b>2</b>	25.00%	1243	2740.346	1.09	2986.977	13.50
<b>3</b>		1244.9	2744.535	1.09	2991.543	13.00
<b>PROMEDIO</b>					<b>2990.261</b>	<b>13.50</b>
<b>1</b>		1205.3	2657.232	1.09	2896.382	13.00
<b>2</b>	30.00%	1203.4	2653.043	1.09	2891.817	13.00
<b>3</b>		1210.2	2668.034	1.09	2908.157	14.00
<b>PROMEDIO</b>					<b>2898.786</b>	<b>13.33</b>

En la tabla No. 43 se presentan los valores de estabilidad y flujo tomados para las muestras elaboradas adicionando fibras tetra pak a la mezcla asfáltica.

Una vez revisados estos parámetros en todas y cada una de las 3 mezclas diseñadas adicionadas con cada uno de los 3 materiales reciclados (limadura metálica, alambre de neumáticos fuera de uso, y fibras tetra pak) se procede a llevar los mismos hacia una

representación gráfica representándolos en curvas a partir de las cuales se determinara los valores óptimos de contenido de cada material reciclado utilizados de acuerdo al valor óptimo de vacíos de aire necesarios en la mezcla asfáltica, valores que se mencionaron anteriormente en este capítulo deben estar entre el 3% y 5% razón por la cual se determina el contenido óptimo de material reciclado en la mezcla al 4% de vacíos de aire necesarios, además se determinan también los valores exactos de VAM, VAF, estabilidad, flujo, todos estos de acuerdo al porcentaje óptimo determinado inicialmente. Estas graficas se elaboran y analizan en el siguiente capítulo.

#### **6.6. ENSAYO DE CHOQUE TÉRMICO EN MEZCLA ASFÁLTICA.**

La aplicación del choque térmico en las probetas elaboradas con mezcla asfáltica se realizan con el objetivo de analizar la respuesta de estas ante los efectos del cambio de temperatura, para esto se realizan 3 especímenes de ensayo (briquetas) por cada porcentaje de material reciclado óptimo utilizado adicionado a la mezcla asfáltica tradicional, y por supuesto también se aplica a esta mezcla.

Debido a la falta de normativa para este tipo de ensayo se realizaran como se mencionó antes 3 especímenes de prueba o briquetas por cada contenido óptimo de material reciclado y mezcla asfáltica tradicional, a los cuales se los elabora y ensaya de la misma manera en que se describió en este capítulo de acuerdo a las normas ASTM D 6926 y ASTM D6927 para el ensayo Marshall.



**Fig. 67:** Briqueta pesada en el aire, saturada superficie seca y sumergida.

Se realizan las briquetas y se determinan sus propiedades volumétricas a través de la medición de sus pesos tanto en aire saturado superficie seca, y sumergido obteniéndose así los siguientes datos:

**Tabla No. 44:** Pesos de las briquetas para ensayo de choque térmico.

<i>Material</i>	<i>Briquet a</i>	<i>% optimo de material</i>	<i>% Asfalt o</i>	<i>% Agregad o</i>	<i>Peso Aire (gr.)</i>	<i>Peso Sat. Sup. Seca (gr.)</i>	<i>Peso en agua (gr.)</i>
PATRON	1	-	6.05%	93.95%	979.29	980.18	523.65
	2		6.05%	93.95%	978.92	979.97	522.88
	3		6.05%	93.95%	980.21	979.56	523.34
LIMADUR A	1	7.05%	6.05%	93.95%	984.21	987.08	530.47
	2		6.05%	93.95%	983.97	986.85	529.33
	3		6.05%	93.95%	984.18	987.21	530.52
ALAMBR E	1	20.50%	6.05%	93.95%	991.34	992.9	532.32
	2		6.05%	93.95%	991.12	992.89	531.8
	3		6.05%	93.95%	992.78	991.99	531.45
TETRA PAK	1	20.00%	6.05%	93.95%	989.45	997.05	515.12
	2		6.05%	93.95%	990.34	997.24	516.56
	3		6.05%	93.95%	990.23	996.97	514.82

En la tabla No. 44 se observan los pesos tomados de cada una de las briquetas elaboradas para ser ensayadas en la prensa Marshall. Ya con estos datos se determinan las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas elaboradas las cuales representan los siguientes datos:

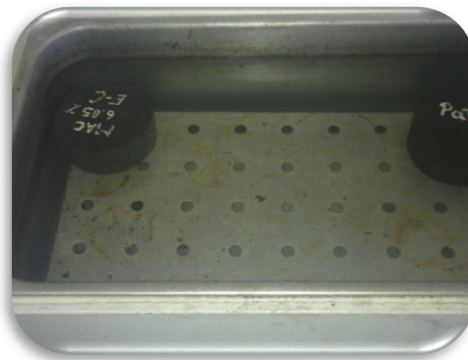
**Tabla No. 45:** Propiedades volumétricas de las briquetas elaboradas para ensayo de choque térmico.

<i>Material</i>	<i>Briqueta</i>	<i>% optimo de Material</i>	<i>Gmb</i>	<i>Gmm (Ensay)</i>	<i>Gse</i>	<i>Gmm (calc)</i>	<i>V. a.</i>	<i>VAM</i>	<i>VAF</i>	<i>Pba</i>	<i>Pbe</i>
			-	-	-	-	%	%	%	%	%
PATRON	1	6.05	2.145	2.248	2.440	2.248	4.565	16.242	71.895	0.587	5.498
	2		2.142	2.248	2.440	2.248	4.718	16.376	71.192	0.587	5.498
	3		2.149	2.248	2.440	2.248	4.410	16.106	72.618	0.587	5.498
			<b>2.145</b>	<b>2.248</b>	<b>2.440</b>	<b>2.248</b>	<b>4.564</b>	<b>16.242</b>	<b>71.902</b>	<b>0.587</b>	<b>5.498</b>
LIMADURA	1	7.05	2.155	2.237	2.427	2.237	3.646	15.836	76.979	0.360	5.712
	2		2.151	2.237	2.427	2.237	3.861	16.024	75.906	0.360	5.712
	3		2.155	2.237	2.427	2.237	3.665	15.853	76.879	0.360	5.712
			<b>2.154</b>	<b>2.237</b>	<b>2.427</b>	<b>2.237</b>	<b>3.724</b>	<b>15.904</b>	<b>76.588</b>	<b>0.360</b>	<b>5.712</b>
ALAMBRE	1	20.50	2.152	2.258	2.453	2.258	4.686	15.957	70.635	0.810	5.289
	2		2.150	2.258	2.453	2.258	4.812	16.069	70.051	0.810	5.289
	3		2.156	2.258	2.453	2.258	4.539	15.828	71.322	0.810	5.289
			<b>2.153</b>	<b>2.258</b>	<b>2.453</b>	<b>2.258</b>	<b>4.679</b>	<b>15.951</b>	<b>70.669</b>	<b>0.810</b>	<b>5.289</b>
TETRA PAK	1	20.00	2.053	2.161	2.332	2.161	4.980	19.833	74.891	-1.338	7.307
	2		2.060	2.161	2.332	2.161	4.647	19.552	76.233	-1.338	7.307
	3		2.054	2.161	2.332	2.161	4.948	19.807	75.017	-1.338	7.307
			<b>2.056</b>	<b>2.161</b>	<b>2.332</b>	<b>2.161</b>	<b>4.858</b>	<b>19.731</b>	<b>75.380</b>	<b>-1.338</b>	<b>7.307</b>



En la tabla No. 45 se aprecian los valores obtenidos mediante las fórmulas propuestas por el Instituto del asfalto para las propiedades volumétricas de las mezclas diseñadas, al observar estas se aprecia que efectivamente todas las mezclas cumplen los parámetros requeridos por el NEVI-12.

Ya con estos datos se procede a preparar los especímenes para su ensayo en la prensa Marshall, pero en este caso se realizara la inmersión de los mismos variando la temperatura de 60°C a 0°C continuamente pasando las briquetas compactadas del baño maría al agua congelada y viceversa en lapsos de 10min durante 5 veces.



**Fig. 68:** Briquetas sometidas en baño maría a 60 °C durante 10 minutos.



**Fig. 69:** Briquetas sometidas en agua a 0 °C durante 10 minutos

Una vez que la briqueta ha sido cambiada cíclicamente cada 10 minutos de 60 °C a 0°C, se procede al ensayo Marshall para determinar la estabilidad y el flujo de las briquetas, de este proceso se obtuvo los siguientes datos:

**Tabla No. 46:** Parámetros de estabilidad-flujo de las briquetas ensayados por choque térmico.

<i>Materia</i>	<i>Briquet</i>	<i>Estabilidad (lb)</i>						
		<i>%</i>	<i>%</i>	<i>Medida</i>	<i>Medida</i>	<i>Correc</i>	<i>Corregida</i>	<i>Flujo</i>
		<i>OPTIMO</i>	<i>Asfalto</i>	<i>Kgf</i>	<i>lbf</i>	<i>-</i>	<i>lbf</i>	<i>0.01''</i>
<b>PATRON</b>	<b>1</b>		6.05%	1278	2817.508	1.19	3352.834	10.00
	<b>2</b>	6.05%	6.05%	1277.5	2816.405	1.19	3351.522	12.00
	<b>3</b>		6.05%	1275.8	2812.658	1.19	3347.062	13.00
		<b>PROMEDIO</b>						<b>3350.473</b>
<b>LIMADURA</b>	<b>1</b>		6.05%	1229.1	2709.702	1.19	3224.545	10.00
	<b>2</b>	7.5%	6.05%	1230.5	2712.788	1.19	3228.218	12.00
	<b>3</b>		6.05%	1231.2	2714.331	1.19	3230.054	12.00
		<b>PROMEDIO</b>						<b>3227.606</b>
<b>ALAMBRE</b>	<b>1</b>		6.05%	1332.1	2936.78	1.19	3494.766	11.00
	<b>2</b>	20.50%	6.05%	1331.4	2935.23	1.19	3492.929	12.00
	<b>3</b>		6.05%	1330.7	2933.69	1.19	3491.093	11.00
		<b>PROMEDIO</b>						<b>3492.929</b>
<b>TETRA PAK</b>	<b>1</b>		6.05%	1121.3	2472.043	1.14	2818.129	14.00
	<b>2</b>	20.00%	6.05%	1123.7	2477.334	1.14	2824.161	14.00
	<b>3</b>		6.05%	1127.5	2485.712	1.14	2833.712	15.00
		<b>PROMEDIO</b>						<b>2825.334</b>

## CAPÍTULO VII

### 7. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS.

#### 7.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS DISEÑADAS POR EL METODO MARSHALL TRADICIONAL, Y USANDO MATERIALES RECICLADOS.

Una vez que la mezcla asfáltica ha sido elaborada, ensayada y sus datos registrados, se procede a analizar los resultados de la misma, con el objetivo de determinar el contenido óptimo de asfalto el cual será utilizado como parámetro de partida en el diseño de las mezclas asfálticas adicionadas con materiales reciclados (limadura metálica, alambre de neumáticos fuera de uso, y fibras tetra pak), para esto se hace necesario el uso del método Marshall el cual muestra los parámetros característicos de la mezcla asfáltica con relación al contenido de asfalto, estos resultados provienen de la determinación de los parámetros volumétricos de la mezcla, así como también de la determinación de los parámetros de estabilidad, flujo, % de vacíos de aire, % de vacíos del agregado mineral, y % de vacíos llenos de asfalto.

Previo a la evaluación de las curvas Marshall, se debe revisar la condición de aceptación de acuerdo a las gravedades específicas que especifica el NEVI-12, la cual especifica que:

$$Gsb < Gse < Gsa$$

Dónde:

Gsb= Gravedad específica bulk para el total de agregado.

Gse= Gravedad específica efectiva del agregado.

Gsa= Gravedad específica aparente del agregado.

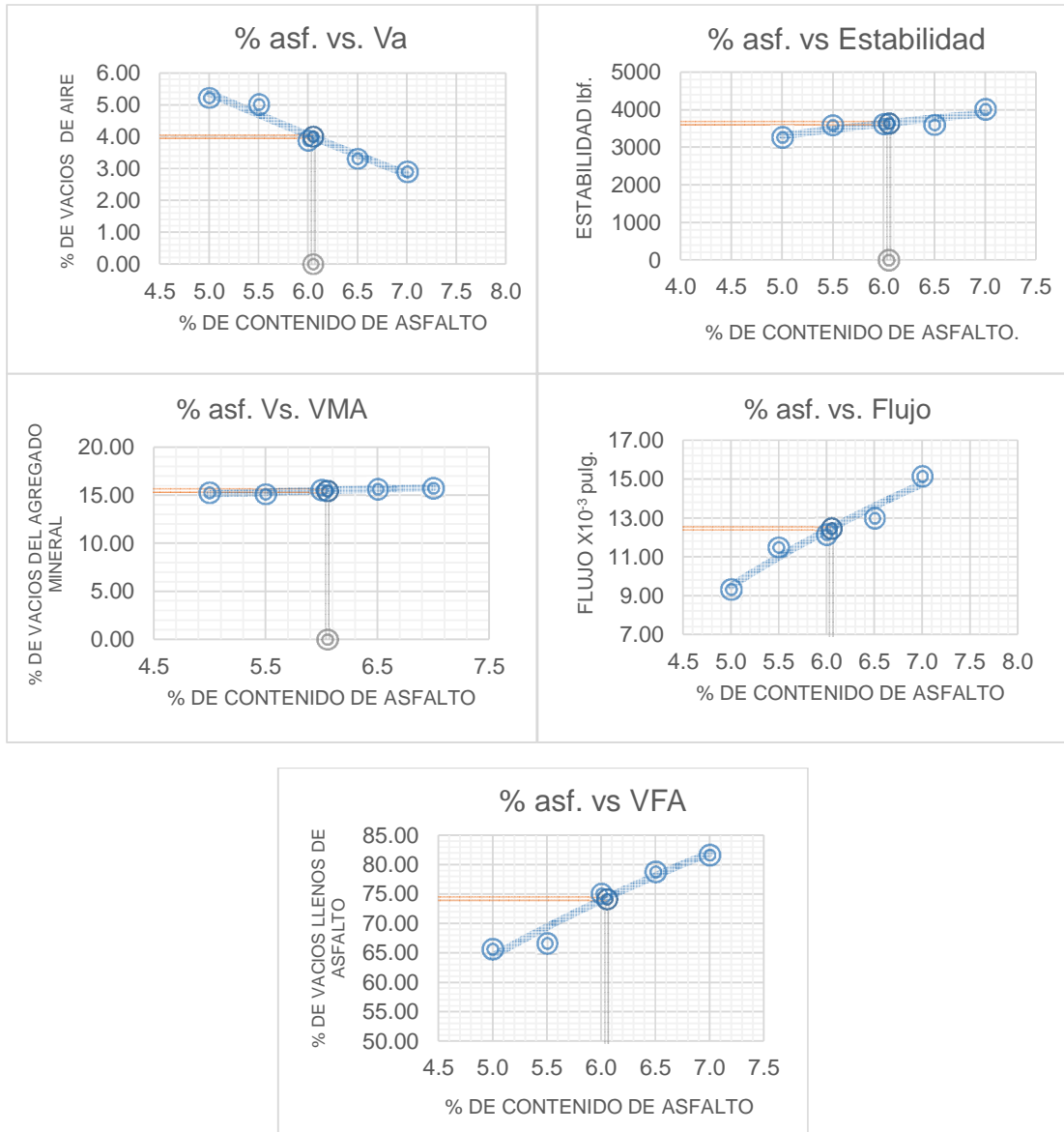
**Tabla No. 47:** Condición de aceptación de acuerdo a las gravedades específicas (the asphalt institute, mix design methods for asphalt concrete, 1974).

Mezcla	Gsb	<	Gse	<	Gsa	CONDICIÓN
Tradicional	2.41	<	2.45	<	2.60	CUMPLE
Limadura metálica	2.41	<	2.43	<	2.60	CUMPLE
Alambre de N.F.U.	2.41	<	2.45	<	2.60	CUMPLE
Fibras tetra pak	2.41	<	2.33	<	2.60	NO CUMPLE

En la tabla No. 47 se observa que todas las mezclas realizadas cumplen con esta condición a excepción de la realizada con fibras tetra pak, lo cual indica una mezcla liviana.

El método Marshall establece los parámetros necesarios para la determinación de la formula maestra a través de las curvas expuestas en la figura No. 62 de esta investigación, las cuales se elaboran a partir de los datos generados por los ensayos aplicados a las briquetas, mediante los cuales se genera una dispersión de puntos comparando los valores obtenidos tanto en el análisis volumétrico de la mezcla, así como también en el ensayo de estabilidad – flujo de la misma vs los contenidos de asfalto con los cuales se elaboraron las briquetas de mezcla asfáltica Marshall.

A continuación se define mediante la figura No. 70, el valor del porcentaje óptimo de asfalto necesario para tener un porcentaje de vacíos de aire entre el 3% y el 5%, y a partir de este valor se determina la estabilidad, flujo, % VAM, % de VAF, de la mezcla asfáltica optima diseñada.



**Fig. 70:** Curvas para diseño de mezcla marshall tradicional.

El valor determinado a un porcentaje de vacíos de aire presente en la mezcla del 4 %, es del 6.05 %, valor con el cual se determina los valores correspondientes a la estabilidad, vacíos del agregado mineral (VAM), flujo, y vacíos llenos de asfalto (VAF), de la mezcla de diseño final.

La estabilidad de la mezcla asfáltica diseñada es de 3642 lbf, una vez obtenido este parámetro se verifica su aprobación de acuerdo con los valores normativos propuestos en el NEVI -12 el cual debe ser superior a los 1800 lbf. (8006 N), los cuales se especifican en la tabla No. 9 Criterios Marshall (NEVI-12 T. C., 2013) de este documento.

De acuerdo a esto, el valor de estabilidad obtenido de 3642 lbf en la mezcla asfáltica Marshall tradicional diseñada cumple con la normativa vigente en el NEVI-12 siendo superior a esta en 1842 lbf.

Los vacíos de agregado mineral VMA, de la mezcla asfáltica diseñada es del 15.49 % , una vez obtenido este parámetro se verifica su aprobación de acuerdo con los valores normativos propuestos en el NEVI -12 el cual especifica que para un valor de tamaño máximo nominal de partícula de 19 mm (3/4”), y un porcentaje de vacíos de aire presentes en la mezcla asfáltica del 4 %, se debe obtener un mínimo de VMA del 13% (NEVI-12 T. 8.-4., 2013)

**Tabla No. 48:** Criterios Marshall para VMA (NEVI-12 T. 8.-4., 2013).

TNM, mm	VMA mínimo %		
	Vacíos de aire de diseño, %		
	3.0	4.0	5.0
4.75	16	17	18
9.5	14	15	16
12.5	13	14	15
19.0	12	13	14

Según la tabla No. 48, el valor de VMA obtenido en la mezcla asfáltica tradicional diseñada cumple con la normativa vigente en el NEVI-12 siendo superior a esta en un 2.49%. El flujo de la mezcla asfáltica diseñada es de  $12.46 \times 10^{-3}$ , una vez obtenido este parámetro se verifica su aprobación de acuerdo con los valores normativos propuestos en el NEVI -12 el cual especifica que el flujo para una mezcla asfáltica en caliente diseñada para tráfico pesado debe estar entre  $8 \times 10^{-3}$  y  $14 \times 10^{-3}$ , como se especifica en la tabla No. 26 Criterios Marshall (NEVI-12 T. C., 2013) de este documento.

El valor de flujo obtenido en la mezcla asfáltica tradicional diseñada cumple con la normativa vigente en el NEVI-12 estando este dentro de los valores mínimos y máximos propuestos por la norma, así:  $8 \times 10^{-3} < 12.46 \times 10^{-3} < 14 \times 10^{-3}$ .

Los vacíos llenos de asfalto VFA, de la mezcla asfáltica diseñada es del 74.2% , una vez obtenido este parámetro se verifica su aprobación de acuerdo con los valores normativos propuestos en el NEVI -12 el cual especifica que los vacíos llenos de asfalto presentes en una mezcla asfáltica en caliente deben estar entre el 65 % y el 75 % del contenido total de la mezcla asfáltica, según se especifica en la tabla No. 26 Criterios Marshall (NEVI-12 T. C., 2013) de esta investigación.

El valor de vacíos llenos de asfalto VFA obtenido en la mezcla asfáltica tradicional diseñada cumple con la normativa vigente en el NEVI-12 estando este dentro de los valores mínimos y máximos propuestos por la norma, así  $65 \% < 74.2 \% < 75 \%$ .

Una vez determinado el porcentaje óptimo de asfalto contenido en la mezcla asfáltica, así como también todos sus parámetros volumétricos y de estabilidad, flujo, se obtiene el producto final del método de diseño de mezclas asfálticas en caliente por el método Marshall del cual se obtuvieron en resumen los siguientes resultados (fórmula maestra F.M.) (NEVI-12 , 2013).

**Tabla No. 49:** Pesos y proporciones exactas para mezcla Marshall tradicional diseñada.

<b>BRIQUETA DE DISEÑO MARSHALL</b>				
<b>Material</b>		<b>Peso en gr.</b>	<b>% con relación a la mezcla total</b>	<b>% con relación al peso de agregados (F.M.)</b>
<b>Agregados</b>	<b>Grueso</b>	409.03	41.51	44.02
	<b>Fino</b>	520.19	52.79	55.98
<b>Ligante asfáltico AC-20</b>		56.22	5.70	6.05
<b>TOTAL</b>		985.44	100.00	106.05

De los resultados detallados en la tabla No. 49, los pesos de agregados tanto gruesos como finos (409.03 gr y 520.19 gr) respectivamente, corresponden a la estabilización granulométrica realizada en el capítulo 6 de esta investigación, mientras que el peso de ligante asfáltico (56.22 gr) corresponde al valor del 6.05 % del peso total de agregados presentes en la mezcla, porcentaje que se definió en el acápite 7.1.1 de este capítulo y corresponde a un valor de 5.7 % del peso total de la mezcla. De esta manera se determina los porcentajes óptimos de cada material (formula maestra) presente en la mezcla asfáltica Marshall tradicional con relación al peso total de agregados.



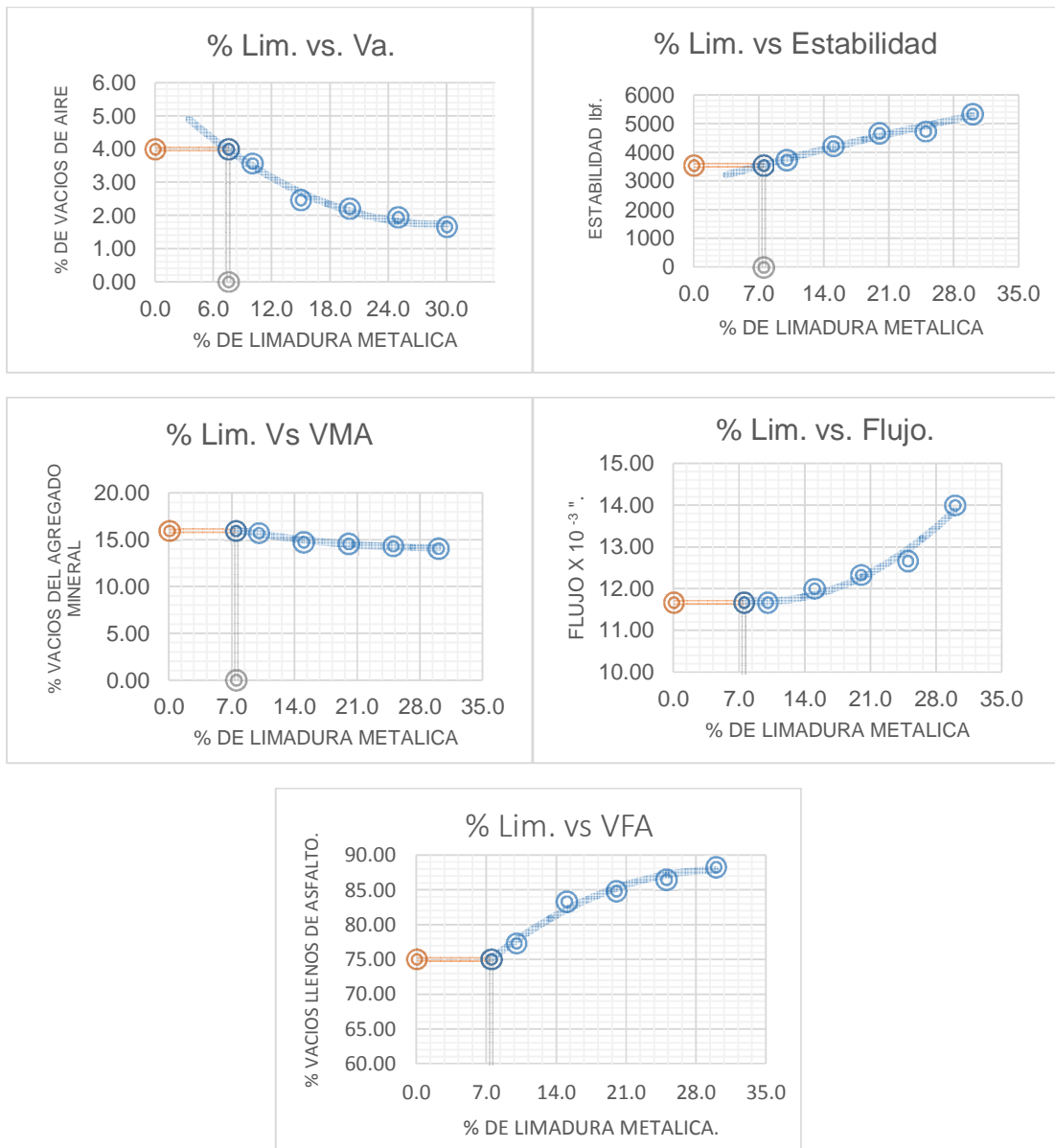
### **7.1.1. Mezcla asfáltica diseñada únicamente con limadura metálica.**

A partir de los resultados obtenidos en la mezcla tradicional y una vez determinado el porcentaje de asfalto óptimo para la mezcla diseñada, se procede a adicionar la limadura metálica en los distintos porcentajes indicados en el capítulo anterior. Siendo así se añade la limadura metálica a la mezcla de agregados y asfalto en los siguientes porcentajes con relación al peso total de ligante asfáltico presente en la mezcla Marshall tradicional siendo estos al 10%, 15%, 20%, 25%, y 30%, se ensayan las muestras para determinar tanto sus propiedades volumétricas, así como también en sus resultados de estabilidad-flujo, para luego ser comparadas con la mezcla Marshall tradicional.

Una vez ensayados los especímenes elaborados con los porcentajes propuestos de limadura metálica se obtienen los resultados a través de los cuales se determinara en primera instancia el porcentaje óptimo de limadura metálica presente en la mezcla de la misma manera en la que se determinó en el acápite anterior el porcentaje óptimo de ligante asfáltico presente en la mezcla Marshall tradicional; Así se compara los resultados según los siguientes parámetros:

- Porcentaje de limadura metálica vs. vacíos de aire.
- Porcentaje de limadura metálica vs. estabilidad.
- Porcentaje de limadura metálica vs. vacíos del agregado mineral.
- Porcentaje de limadura metálica vs. flujo.
- Porcentaje de limadura metálica vs. vacíos llenos de asfalto.

Estas curvas se generan a través de la comparación de los datos calculados y su curva de regresión, realizando la proyección de los valores normativos sobre dicha curva y su consecutiva definición del valor óptimo del parámetro Marshall requerido.



**Fig. 71:** Curvas para diseño de mezcla marshall con limadura metálica.

El valor determinado en porcentaje de limadura metálica a un porcentaje de vacíos de aire presente en la mezcla del 4 %, es del 7.5 % mediante el cual se determina los valores correspondientes a la estabilidad, vacíos del agregado mineral (VMA), Flujo, y vacíos llenos de asfalto (VFA), de la mezcla de diseño final.

La estabilidad de la mezcla asfáltica es de 3550 lbf, una vez obtenido este parámetro se verifica su aprobación de acuerdo con los valores normativos propuestos en el NEVI - 12 el cual indica debe ser superior a los 1800 lbf. (8006 N), los cuales se especifican en la tabla No. 26 Criterios Marshall (NEVI-12 T. C., 2013) de esta investigación.

El valor de estabilidad obtenido en esta mezcla cumple con la normativa vigente en el NEVI-12 siendo superior a su límite en 1750 lbf.

La estabilidad obtenida en esta mezcla asfáltica adicionada con limadura metálica (3550 lbf.) en comparación con la estabilidad obtenida en la mezcla Marshall tradicional (3642 lbf.) es menor en 92 lbf.

Los vacíos de agregado mineral VMA, de la mezcla asfáltica son del 16 % , una vez obtenido este parámetro se verifica su aprobación de acuerdo con los valores normativos propuestos en el NEVI -12 el cual especifica que para un valor de tamaño máximo nominal de partícula de 19 mm (3/4"), y un porcentaje de vacíos de aire presentes en la mezcla asfáltica del 4 %, se debe obtener un mínimo de VMA del 13% descrito en la tabla No. 48 de este documento (NEVI-12 T. 8.-4., 2013)

El valor de VMA obtenido en la mezcla asfáltica tradicional diseñada cumple con la normativa vigente en el NEVI-12 siendo superior a esta en un 3 %.

El flujo de la mezcla asfáltica es de  $11.67 \times 10^{-3}$ , una vez obtenido este parámetro se verifica su aprobación de acuerdo con los valores normativos propuestos en el NEVI -12 el cual especifica que el flujo para una mezcla asfáltica en caliente diseñada para tráfico pesado debe estar entre  $8 \times 10^{-3}$  y  $14 \times 10^{-3}$ , según se especifica en la tabla No. 26 Criterios Marshall (NEVI-12 T. C., 2013) de este documento.

El valor de flujo obtenido en la mezcla asfáltica cumple con la normativa vigente en el NEVI-12 estando este dentro de los valores mínimos y máximos propuestos por la norma, así:  $8 \times 10^{-3} < 12.46 \times 10^{-3} < 14 \times 10^{-3}$ .

El flujo obtenido en esta mezcla asfáltica adicionada con limadura metálica ( $11.67 \times 10^{-3}$ .) en comparación con el flujo obtenido en la mezcla tradicional ( $12.46 \times 10^{-3}$ .) es menor.

Los vacíos llenos de asfalto VFA, de la mezcla asfáltica son del 75 %, una vez obtenido este parámetro se verifica su aprobación de acuerdo con los valores normativos propuestos en el NEVI -12 el cual especifica que los vacíos llenos de asfalto presentes en una mezcla asfáltica en caliente deben estar entre el 65 % y el 75 % del contenido total de la mezcla asfáltica, según se especifica en la tabla No. 26 Criterios Marshall (NEVI-12 T. C., 2013).

El valor de vacíos llenos de asfalto VFA obtenido en la mezcla asfáltica adicionada con limadura metálica cumple con la normativa vigente en el NEVI-12 siendo igual a su valor máximo permitido 75 %.

Una vez determinado el porcentaje óptimo de limadura metálica contenido en la mezcla asfáltica, así como también todos sus parámetros volumétricos y de estabilidad – flujo, se obtiene el producto final del método de diseño de mezclas asfálticas en caliente por el método Marshall del cual se obtuvieron en resumen los siguientes resultados (fórmula maestra F.M.) (NEVI-12 , 2013).

**Tabla No. 50:** Pesos y proporciones exactas para mezcla adicionada con limadura metálica diseñada.

<b>BRIQUETA DE DISEÑO MARSHALL</b>			
<b>Material</b>	<b>Peso en gr.</b>	<b>% con relación a la mezcla total</b>	<b>% con relación al peso total de agregados (F.M.)</b>
<b>Agregados</b>	<b>Grueso</b>	409.03	41.33
	<b>Fino</b>	520.19	52.56
<b>Ligante asfáltico AC-20</b>	56.22	5.68	6.05
<b>Limadura Metálica</b>	4.22	0.43	0.45
<b>TOTAL</b>	989.66	100.00	106.45

De los resultados detallados en la tabla No. 50, los pesos de agregados tanto gruesos como finos (409.03 gr y 520.19 gr) respectivamente, corresponden a la estabilización granulométrica realizada en el capítulo 6 de esta investigación, el peso de ligante asfáltico

(56.22 gr) corresponde al valor del 6.05 % del peso total de agregados presentes en la mezcla, porcentaje que se definió en el acápite 7.1.1 de este capítulo y corresponde a un valor de 5.68 % del peso total de la mezcla, mientras que el peso de limadura metálica (4.22 gr) corresponde a un valor de 0.43% con respecto al peso total de la mezcla.

De esta manera se determina los porcentajes óptimos de cada material (formula maestra) presente en la mezcla asfáltica Marshall tradicional con relación al peso total de agregados.

Cabe destacar que los valores obtenidos con la adición de limadura metálica cumplen con todos los parámetros normativos propuestos por el NEVI-12, pero no superan los valores obtenidos por la mezcla asfáltica Marshall tradicional es decir con la mezcla de agregados y ligante asfáltico.

#### **7.1.2. Mezcla asfáltica diseñada únicamente con alambre de neumáticos fuera de uso.**

Se procede con la adición del segundo material reciclado que es el alambre de neumático fuera de uso, y al igual que se procedió con la limadura metálica se toma como punto de partida los resultados obtenidos en la mezcla Marshall tradicional diseñada, y se procede a evaluar los resultados luego de adicionar el alambre de neumáticos fuera de uso.

Se añade el alambre de neumáticos fuera de uso a la mezcla de agregados y asfalto en porcentajes al 10%, 15%, 20%, 25%, y 30%, del peso total de ligante asfáltico presente en la mezcla Marshall tradicional, se ensaya las muestras para determinar tanto sus

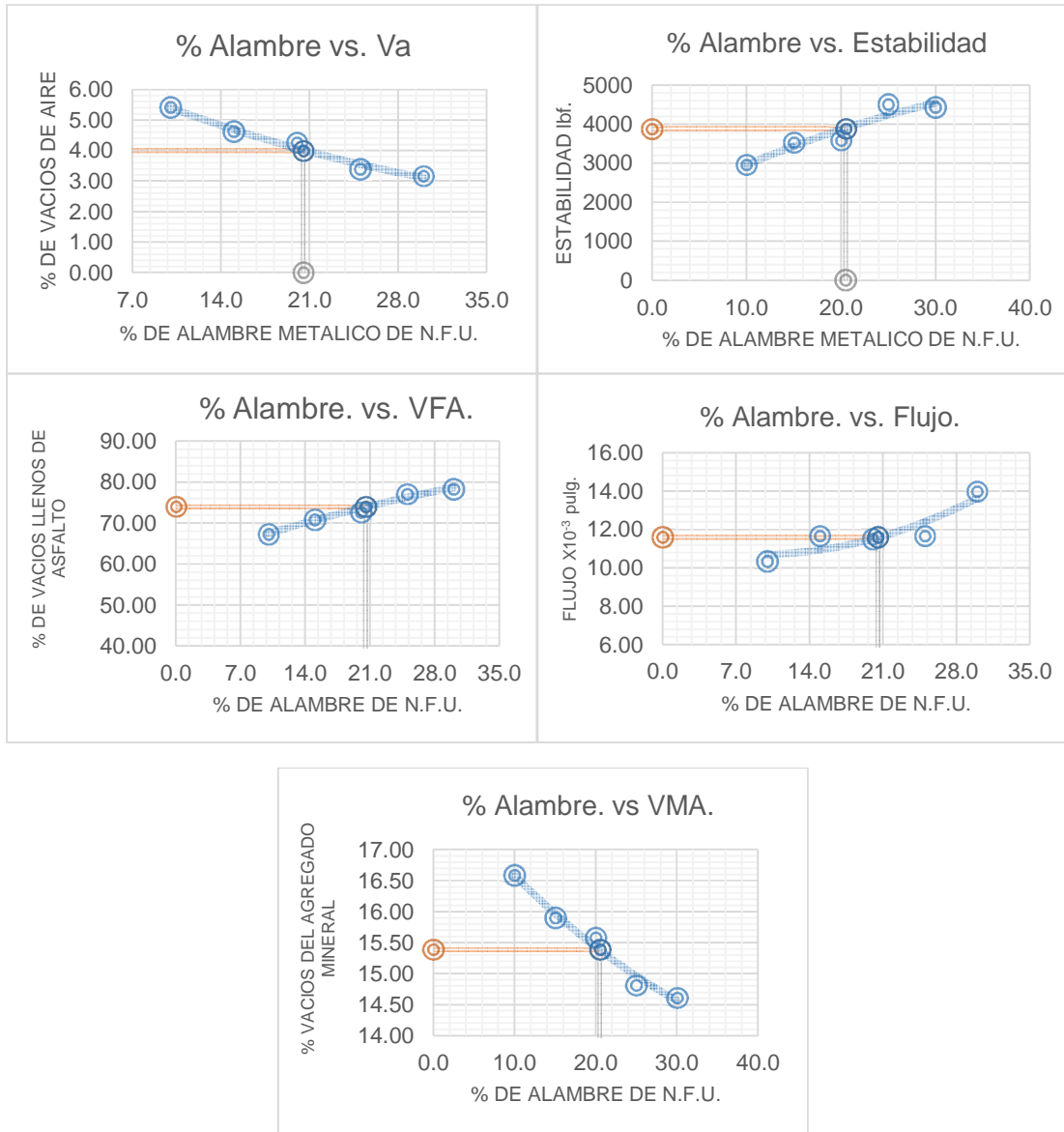
propiedades volumétricas, así como también en sus resultados de estabilidad-flujo y luego compararlas con la mezcla Marshall tradicional.

Una vez ensayados los especímenes elaborados con los porcentajes propuestos de alambre de neumáticos fuera de uso, se obtienen los resultados a través de los cuales se determinara en primera instancia el porcentaje óptimo de alambre de neumáticos fuera de uso presente en la mezcla de la misma manera en la que se determinó en el acápite anterior el porcentaje óptimo de limadura metálica presente en la mezcla.

Así se compara los resultados según los siguientes parámetros:

- Porcentaje de alambre de neumáticos fuera de uso vs. vacíos de aire.
- Porcentaje de alambre de neumáticos fuera de uso vs. estabilidad.
- Porcentaje de alambre de neumáticos fuera de uso vs. vacíos del agregado mineral.
- Porcentaje de alambre de neumáticos fuera de uso vs. flujo.
- Porcentaje de alambre de neumáticos fuera de uso vs. vacíos llenos de asfalto.

Estas curvas se generan a través de la comparación de los promedios de datos calculados y su regresión, realizando la proyección de los valores normativos sobre dicha curva y su consecutiva definición del valor óptimo del parámetro Marshall requerido.



**Fig. 72:** Curvas para diseño de mezcla marshall adicionada alambre de neumáticos fuera de uso



El valor determinado de alambre de neumáticos fuera de uso a un porcentaje de vacíos de aire presente en la mezcla del 4 %, es del 20.5 % valor con el cual se determina los valores correspondientes a la estabilidad, vacíos del agregado mineral (VMA), Flujo, y vacíos llenos de asfalto (VFA), de la mezcla de diseño final.

La estabilidad de la mezcla asfáltica es de 3890 lbf, una vez obtenido este parámetro se verifica su aprobación de acuerdo con los valores normativos propuestos en el NEVI -12 el cual debe ser superior a los 1800 lbf. (8006 N), los cuales se especifican en la tabla No. 26 Criterios Marshall (NEVI-12 T. C., 2013) de este documento.

El valor de estabilidad obtenido en la mezcla asfáltica adicionada con alambre de neumáticos fuera de uso cumple con la normativa vigente en el NEVI-12 siendo superior a esta en 2090lbf.

La estabilidad obtenida en esta mezcla asfáltica adicionada con alambre de neumáticos fuera de uso (3890 lbf.) en comparación con la estabilidad obtenida en la mezcla Marshall tradicional (3642 lbf.) es mayor en 248 lbf.

Los vacíos de agregado mineral VMA, de la mezcla asfáltica son del 15.39 % , una vez obtenido este parámetro se verifica su aprobación de acuerdo con los valores normativos propuestos en el NEVI -12 el cual especifica que para un valor de tamaño máximo nominal de partícula de 19 mm (3/4”), y un porcentaje de vacíos de aire presentes en la mezcla asfáltica del 4 %, se debe obtener un mínimo de VMA del 13% descrito en la tabla No. 48 (NEVI-12 T. 8.-4., 2013)

El valor de VMA obtenido en la mezcla asfáltica cumple con la normativa vigente en el NEVI-12 siendo superior a esta en un 2.39 %.

El flujo de la mezcla asfáltica diseñada es de  $11.6 \times 10^{-3}$ , una vez obtenido este parámetro se verifica su aprobación de acuerdo con los valores normativos propuestos en el NEVI -12 el cual especifica que el flujo para una mezcla asfáltica en caliente diseñada para tráfico pesado debe estar entre  $8 \times 10^{-3}$  y  $14 \times 10^{-3}$ , según se especifica en la tabla No. 26 Criterios Marshall (NEVI-12 T. C., 2013).

El valor de flujo obtenido en la mezcla asfáltica cumple con la normativa vigente en el NEVI-12 estando este dentro de los valores mínimos y máximos propuestos por la norma, así:  $8 \times 10^{-3} < 11.6 \times 10^{-3} < 14 \times 10^{-3}$ .

El flujo obtenido en esta mezcla asfáltica adicionada con alambre de neumáticos fuera de uso ( $11.6 \times 10^{-3}$ .) en comparación con el flujo obtenido en la mezcla tradicional ( $12.46 \times 10^{-3}$ .) es menor.

Los vacíos llenos de asfalto VFA, de la mezcla asfáltica son del 74 %, una vez obtenido este parámetro se verifica su aprobación de acuerdo con los valores normativos propuestos en el NEVI -12 el cual especifica que los vacíos llenos de asfalto presentes en una mezcla asfáltica en caliente deben estar entre el 65 % y el 75 % del contenido total de la mezcla asfáltica, según se especifica en la tabla No. 26 Criterios Marshall (NEVI-12 T. C., 2013) de este documento.

El valor de vacíos llenos de asfalto VFA obtenido en la mezcla asfáltica adicionada con alambre de neumáticos fuera de uso diseñada cumple con la normativa vigente en el

NEVI-12 , ya que esta entre los valores máximos y mínimos normativos, así  $65 \% < 74 \% < 75 \%$ .

Una vez determinado el porcentaje óptimo de alambre de neumáticos fuera de uso contenido en la mezcla asfáltica, así como también todos sus parámetros volumétricos y de estabilidad – flujo, se obtiene el producto final del método de diseño de mezclas asfálticas en caliente por el método Marshall del cual se obtuvieron en resumen los siguientes resultados (fórmula maestra F.M.) (NEVI-12 , 2013).

**Tabla No. 51:** Pesos y proporciones exactas para mezcla adicionada con alambre de neumáticos fuera de uso diseñada.

<b>BRIQUETA DE DISEÑO MARSHALL</b>				
<b>Material</b>		<b>Peso en gr.</b>	<b>% con relación a la mezcla total</b>	<b>% con relación al peso total de agregados (F.M.)</b>
<b>Agregados</b>	<b>Grueso</b>	409.03	41.02	44.02
	<b>Fino</b>	520.19	52.18	55.98
<b>Ligante asfáltico AC-20</b>		56.22	5.64	6.05
<b>Alambre de N.F.U.</b>		11.53	1.16	1.24
<b>TOTAL</b>		996.97	100.00	107.29

De los resultados detallados en la tabla No. 51, los pesos de agregados tanto gruesos como finos (409.03 gr y 520.19 gr) respectivamente, corresponden a la estabilización granulométrica realizada en el capítulo 6 de esta investigación, el peso de ligante asfáltico (56.22 gr) corresponde al valor del 6.05 % del peso total de agregados presentes en la mezcla, porcentaje que se definió en el acápite 7.1.1 de este capítulo y corresponde a un

valor de 5.64 % del peso total de la mezcla, mientras que el peso del alambre de neumáticos fuera de uso (11.53 gr) corresponde a un valor de 1.16% con respecto al peso total de la mezcla. De esta manera se determina los porcentajes óptimos de cada material (formula maestra) presente en la mezcla asfáltica adicionada con alambres de neumáticos fuera de uso con relación al peso total de agregados.

Cabe destacar que los valores obtenidos con la adición de alambre de neumáticos fuera de uso cumplen con todos los parámetros normativos propuestos por el NEVI-12, y superan los valores obtenidos por la mezcla asfáltica Marshall tradicional es decir con la mezcla de agregados y ligante asfáltico.

### **7.1.3. Mezcla asfáltica diseñada únicamente con tetra pak.**

Se procede con la adición del tercer material reciclado que son las fibras tetra pak, y al igual que se procedió con la limadura metálica y el alambre de neumáticos fuera de uso, se toma como punto de partida los resultados obtenidos en la mezcla Marshall tradicional diseñada, y se procede a evaluar los resultados luego de adicionar las fibras tetra pak.

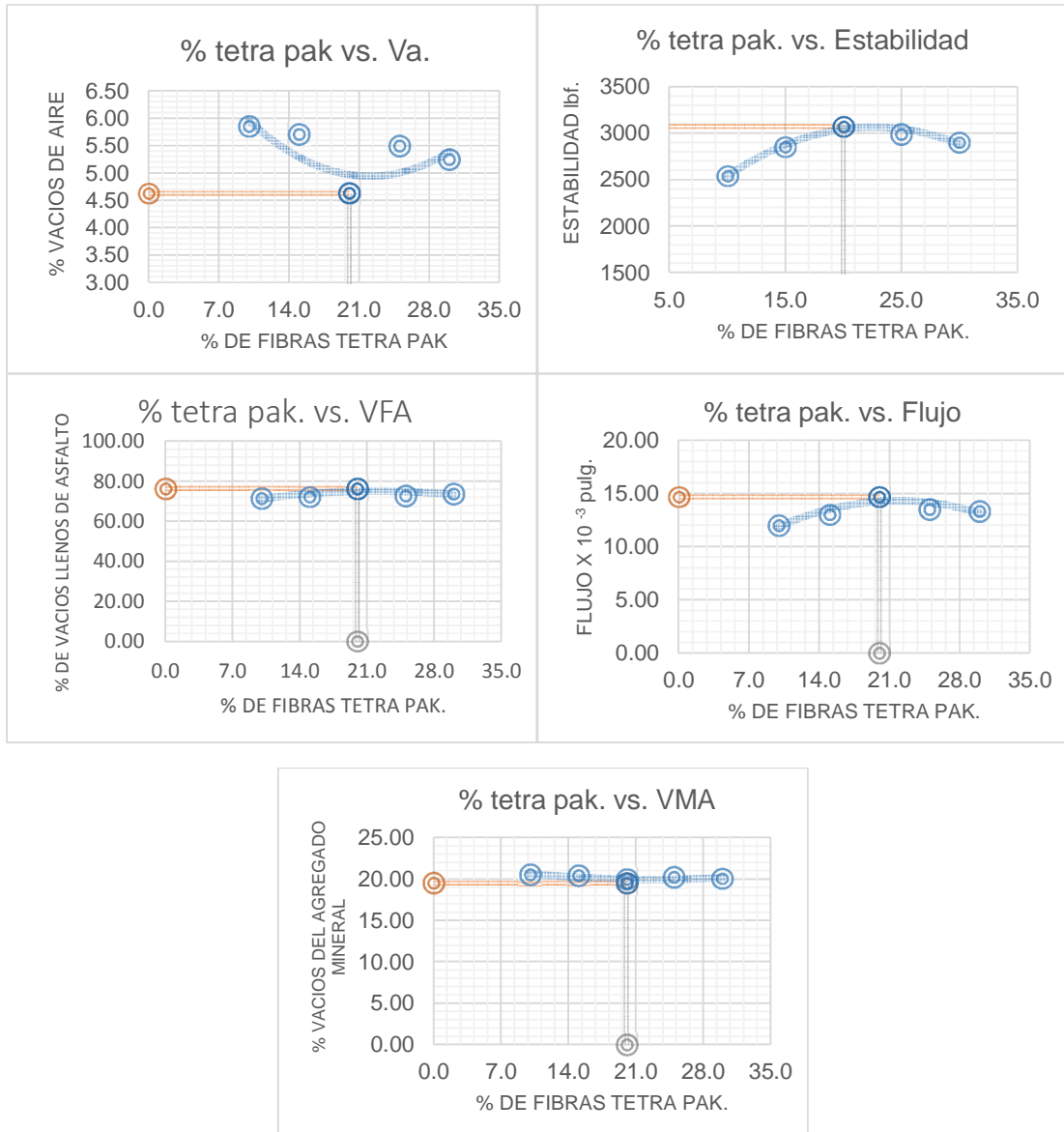
Se añade las fibras tetra pak a la mezcla de agregados y asfalto en porcentajes del 10%, 15%, 20%, 25%, y 30%, del peso total de ligante asfáltico presente en la mezcla Marshall tradicional, se ensaya las muestras para determinar tanto sus propiedades volumétricas, así como también en sus resultados de estabilidad-flujo y luego compararlas con la mezcla Marshall tradicional.

Una vez ensayados los especímenes elaborados con los porcentajes propuestos de fibras tetra pak, se obtienen los resultados a través de los cuales se determinara en primera instancia el porcentaje óptimo de fibras tetra pak presente en la mezcla de la misma manera en la que se determinó en el acápite anterior el porcentaje óptimo de alambre de neumáticos fuera de uso presente en la mezcla.

Así se compara los resultados según los siguientes parámetros:

- Porcentaje de fibras tetra pak vs. vacíos de aire.
- Porcentaje de fibras tetra pak vs. estabilidad.
- Porcentaje de fibras tetra pak vs. vacíos del agregado mineral.
- Porcentaje de fibras tetra pak vs. flujo.
- Porcentaje de fibras tetra pak vs. vacíos llenos de asfalto.

Estas curvas se generan a través de la comparación de los promedios de datos y su regresión, realizando la proyección de los valores normativos sobre dicha curva y su consecutiva definición del valor óptimo del parámetro Marshall requerido.



**Fig. 73:** Curvas para diseño de mezcla marshall adicionada con fibras tetra pak.

El valor determinado a un porcentaje de vacíos de aire presente en la mezcla del 4 %, en este caso no se puede determinar, ya que el menor valor de vacíos de aire registrado por los ensayos se da al contenido de fibras tetra pak del 20 % y es del 4.63 % valor que no sale del rango normativo es decir está dentro de los límites propuestos por el NEVI-12  $3 \% < 4.63 \% < 5 \%$ , con este valor se determina los valores correspondientes a la estabilidad, vacíos del agregado mineral (VMA), Flujo, y vacíos llenos de asfalto (VFA), de la mezcla de diseño final.

La estabilidad de la mezcla asfáltica es de 3071 lbf, una vez obtenido este parámetro se verifica su aprobación de acuerdo con los valores normativos propuestos en el NEVI -12 el cual debe ser superior a los 1800 lbf. (8006 N), los cuales se especifican en la tabla No. 26 Criterios Marshall (NEVI-12 T. C., 2013) de este documento.

El valor de estabilidad obtenido en la mezcla asfáltica adicionada con fibras tetra pak diseñada cumple con la normativa vigente en el NEVI-12 siendo superior a este límite en 1271 lbf.

La estabilidad obtenida en esta mezcla asfáltica adicionada con fibras tetra pak (3071 lbf.) en comparación con la estabilidad obtenida en la mezcla Marshall tradicional (3642 lbf.) es menor en 571 lbf.

Los vacíos de agregado mineral VMA, de la mezcla asfáltica son del 19.54 % , una vez obtenido este parámetro se verifica su aprobación de acuerdo con los valores normativos propuestos en el NEVI -12 el cual especifica que para un valor de tamaño máximo nominal de partícula de 19 mm (3/4”), y un porcentaje de vacíos de aire presentes

en la mezcla asfáltica del 4 %, se debe obtener un mínimo de VMA del 13% descrito en la tabla No. 48 de este documento (NEVI-12 T. 8.-4., 2013)

El valor de VMA obtenido en la mezcla asfáltica adicionada con fibras tetra pak diseñada cumple con la normativa vigente en el NEVI-12 siendo superior en un 6.54 %.

El flujo de la mezcla asfáltica es de  $14.67 \times 10^{-3}$ , una vez obtenido este parámetro se verifica su aprobación de acuerdo con los valores normativos propuestos en el NEVI -12 el cual especifica que el flujo para una mezcla asfáltica en caliente diseñada para tráfico pesado debe estar entre  $8 \times 10^{-3}$  y  $14 \times 10^{-3}$ , según se especifica en la tabla No. 26 Criterios Marshall (NEVI-12 T. C., 2013).

El valor de flujo obtenido en la mezcla asfáltica adicionada con fibras tetra pak no cumple con la normativa vigente en el NEVI-12 estando este fuera del valor máximo propuesto por la norma, así:  $14 \times 10^{-3} < 14.67 \times 10^{-3}$ .

El flujo obtenido en esta mezcla asfáltica con fibras tetra pak ( $14.67 \times 10^{-3}$ ) en comparación con el flujo obtenido en la mezcla tradicional ( $12.46 \times 10^{-3}$ ) es mayor.

Los vacíos llenos de asfalto VFA, de la mezcla asfáltica son del 73.35 % , una vez obtenido este parámetro se verifica su aprobación de acuerdo con los valores normativos propuestos en el NEVI -12 el cual especifica que los vacíos llenos de asfalto presentes en una mezcla asfáltica en caliente deben estar entre el 65 % y el 75 % del contenido total de la mezcla asfáltica, según se especifica en la tabla No. 26 Criterios Marshall (NEVI-12 T. C., 2013).



El valor de vacíos llenos de asfalto VFA obtenido en la mezcla asfáltica adicionada con fibras tetra pak cumple con la normativa vigente en el NEVI-12 , ya que esta entre los valores máximos y mínimos normativos, así  $65 \% < 73.35 \% < 75 \%$ .

Una vez determinado el porcentaje óptimo de fibras tetra pak contenido en la mezcla asfáltica, así como también todos sus parámetros volumétricos y de estabilidad – flujo, se obtiene el producto final del método de diseño de mezclas asfálticas en caliente por el método Marshall que consiste en una mezcla asfáltica capaz de soportar eficientemente todos los esfuerzos y condiciones climáticas para las cuales fue diseñada, de los cuales se obtuvieron en resumen los siguientes resultados (fórmula maestra F.M.)..

**Tabla No. 52:** Pesos y proporciones exactas para mezcla adicionada con fibras tetra pak diseñada.

<b>BRIQUETA DE DISEÑO MARSHALL</b>			
<b>Material</b>	<b>Peso en gr.</b>	<b>% con relación a la mezcla total</b>	<b>% con relación al peso total de agregados (F.M.)</b>
<b>Agregados</b>	<b>Grueso</b>	409.03	44.02
	<b>Fino</b>	520.19	55.98
<b>Ligante asfáltico AC-20</b>	56.22	5.64	6.05
<b>Fibras tetra pak</b>	11.24	1.13	1.21
<b>TOTAL</b>	996.68	100.00	107.26

De los resultados detallados en la tabla No. 52, los pesos de agregados tanto gruesos como finos (409.03 gr y 520.19 gr) respectivamente, corresponden a la estabilización granulométrica realizada en el capítulo 6 de esta investigación, el peso de ligante asfáltico (56.22 gr) corresponde al valor del 6.05 % del peso total de agregados presentes en la mezcla, porcentaje que se definió en el acápite 7.1.1 de este capítulo y corresponde a un valor de 5.64 % del peso total de la mezcla, mientras que el peso de las fibras tetra pak

(11.24 gr) corresponde a un valor de 1.13% con respecto al peso total de la mezcla. De esta manera se determina los porcentajes óptimos de cada material (formula maestra) presente en la mezcla asfáltica adicionada con fibras tetra pak con relación al peso total de agregados.

Cabe destacar que los valores obtenidos con la adición de fibras tetra pak cumplen con los parámetros normativos propuestos por el NEVI-12, a excepción del parámetro de flujo el cual es superior al valor máximo permitido, además estos resultados son inferiores a los valores obtenidos por la mezcla asfáltica Marshall tradicional es decir con la mezcla de agregados y ligante asfáltico.

Para denotar y comparar los resultados obtenidos de las mezclas asfálticas adicionadas con material reciclado se resume los resultados de cada una de ellas en la siguiente tabla.

**Tabla No. 53:** Resumen de resultados en mezclas asfálticas diseñadas.

<b>MEZCLA</b>	<b>V. a. %</b>	<b>VMA %</b>	<b>VFA %</b>	<b>Estabilidad lbf.</b>	<b>Flujo 0.01"</b>
<b>Tradicional</b>	4.0	15.5	74.2	3642	12.5
<b>Limadura Metálica</b>	4.0	16.0	75.0	3550	11.7
<b>Alambre de N.F.U.</b>	4.0	15.4	74.0	<b>3890</b>	11.6
<b>Tetra pak</b>	4.63	20.0	76.4	3071	14.7

Según los resultados expresados en la tabla No. 53, de los 3 materiales reciclados utilizados en esta investigación, los resultados obtenidos mediante la utilización de materiales metálicos presentan resultados similares siendo el alambre de neumáticos fuera de uso el de mejores características con respecto a la limadura metálica y al tetra pak, ya

que presenta un incremento en la estabilidad y una baja disminución del flujo con respecto a la mezcla tradicional.

## **7.2. ANÁLISIS DE COSTOS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS DISEÑADAS.**

La de mezcla asfáltica como producto final es el resultado de un proceso sistemático en el cual interviene tanto recursos humanos como maquinarias y materiales para su elaboración y venta a gran escala, para lo cual sigue un procedimiento en el cual se colocan mediante una pala mecánica se coloca los agregados en las proporciones adecuadas de acuerdo al diseño en tolvas metálicas (Díaz, 2014):



**Fig. 74:** Tolvas metálicas.

Estas desembocan en bandas de caucho las cuales llevan el mix de agregados hasta un tambor secador de áridos, que como su nombre lo indica seca los áridos eliminando el exceso de agua de los mismos (Díaz, 2014):



**Fig. 75:** Bandas transportadoras y tambor secador de áridos.

Luego el material pasa a un sistema en el cual se vierte el ligante asfáltico a la temperatura adecuada al mix de agregados secos, estos son mezclados automáticamente en un mecanismo propicio para el efecto, y finalmente se vierte la mezcla asfáltica en caliente terminada al volquete para ser transportado a obra (Díaz, 2014).



**Fig. 76:** Distribuidor de mezcla asfáltica.

El costo de las mezclas asfálticas hace referencia a los precios unitarios de los materiales utilizados en cada una de ellas, como el agregado y el ligante asfáltico, y en este caso como objeto de esta investigación la limadura metálica, el alambre de N.F.U, y

el tetra pak, como materiales reciclados los cuales deben ser analizados para determinar el precio unitario de la mezcla asfáltica diseñada con el objetivo de poder compararlas entre sí.

### 7.2.1. Análisis de costo de la mezcla asfáltica tradicional.

La mezcla asfáltica tradicional está constituida por agregados tanto finos como gruesos y filler, así como también por ligante asfáltico, y la proporción óptima de estos determinara las características de la mezcla terminada.

Cada uno de estos materiales atribuyen al producto final un costo los cuales deben ser analizados y determinados a fin de conseguir un producto que cubra todas las necesidades para las cuales fue diseñado al menor precio, a fin de que sea competitivo en el mercado.

En el capítulo VI de este documento se han fijado las cantidades óptimas de agregados, así como también de ligante asfáltico que deben estar presentes en la mezcla a fin de que esta sea eficiente tanto para cargas de servicio, así como también ante efectos de intemperismo, cuyos costos unitarios se detalla así.

**Tabla No. 54:** Precios unitarios de materiales en mezcla asfáltica tradicional (CONSTRUARENAS y Vinuesa., 2014).

Material	Unidad	Valor unitario en U.S.D.
Agregado Grueso	m3	21.16
Agregado Fino	m3	22.16
Fíller	m3	21.67
Ligante asfáltico AC-20	Kg	0.32

Como se aprecia en la tabla No. 54, los precios se detallan para cada tipo de agregado por metro cubico, y para el ligante asfaltico se especifica su valor por kilogramo en planta de mezcla asfáltica, cuyos valores están actualizados y referidos a las minas de Palugo sector Pifo, y el ligante asfaltico AC-20 de la refinería de Esmeraldas.

Las cantidades presentes en la mezcla asfáltica tradicional determinaran el precio de la misma, razón por la cual se determina el precio del metro cubico de mezcla asfáltica tradicional en base a las proporciones determinados de cada material transformados de acuerdo a su peso específico, los cuales se detallan en el capítulo V de este documento y se obtuvieron los siguientes datos.

**Tabla No. 55:** Pesos específicos de los materiales presentes en la mezcla asfáltica tradicional.

<b>Material</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Dato</b>
<b>Agregado Grueso</b>	Peso Específico de las partículas secas (bulk)	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.377
<b>Agregado Fino</b>	Peso Específico de las partículas secas (bulk)	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.392
<b>Filler</b>	Peso Específico del material impermeable de las partículas (bulk)	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.700
<b>Ligante asfáltico AC-20</b>	Peso Específico del ligante asfáltico AC-20	(gr/cm <sup>3</sup> )	1.010

En la tabla No. 55 se detallan los pesos específicos de los materiales que intervienen en la mezcla asfáltica mediante los cuales se obtendrán los volúmenes necesarios de cada material para su respectivo análisis de precios unitarios A.P.U.

Para determinar los volúmenes de cada material presentes en la mezcla asfáltica se debe tener en cuenta las cantidades óptimas determinadas la tabla No. 28 de este

documento para la mezcla asfáltica tradicional, y además el valor de Densidad máxima teórica para la correspondiente transformación de unidades de masa a unidades de volumen en el caso de los agregados, generándose así los siguientes datos.

**TABLA NO. 56:** Volúmenes presentes en 1 m<sup>3</sup> de mezcla asfáltica tradicional.

	%	gr.	cm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
<b>Agregado grueso</b>	41.51	932338.03	392233.08	0.39
<b>Agregado fino</b>	45.56	1023285.60	427794.99	0.43
<b>Filler</b>	7.23	162429.18	60158.96	0.06
<b>Ligante asfáltico AC-20</b>	5.71	128147.19	126878.40	0.13
<b>TOTAL</b>	100.00	2246200.00	1000000.00	<b>1.00</b>

En la tabla No. 56 se detallan las proporciones necesarias para elaborar 1 metro cubico de la mezcla asfáltica tradicional diseñada en este trabajo de investigación.

A partir de estos valores se elabora el análisis de precio unitario para la mezcla asfáltica tomando en cuenta los valores de mano de obra, herramientas, equipos y materiales necesarios para llevar a cabo su elaboración, así como también las unidades en las cuales se proveen cada uno de los insumos en el país.

“El A.P.U. (Análisis de Precios Unitarios) es un modelo matemático que adelanta el resultado, expresado en moneda, de una situación relacionada con una actividad sometida a estudio” (Valera, s.f.), en este caso la elaboración de mezcla asfáltica en caliente.

**Tabla No. 57:** A.P.U. de mezcla asfáltica Marshall tradicional.

<b>RUBRO:</b>	Preparación de mezcla asfáltica Marshall tradicional en caliente				<b>UNID.:</b>	$m^3$
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>Unid.</b>	<b>Cuadrilla</b>	<b>Rend. m<sup>3</sup>/día</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Hora</b>	<b>Costo</b>
<b>MANO DE OBRA</b>						
OPERADOR DE PALA DE CASTILLO	H.H.	1	193.04	0.041	3.38	\$0.14
OPERADOR RESPONSABLE DE LA PLANTA ASFÁLTICA	H.H.	1	193.04	0.041	3.21	\$0.13
PEÓN	H.H.	12	193.04	0.497	3.01	\$1.50
<b>SUB TOTAL M.</b>						<b>\$1.77</b>
<b>MAQUINARIA</b>						
CALENTADOR DE ACEITE	H.M.	1	193.04	0.041	4.08	\$0.17
CARGADOR FRONTAL CAT 950 G	H.M.	1	193.04	0.041	35	\$1.45
CONSUMO ENERGIA ELECTRICA	KW./H.	1	193.04	0.041	9.77	\$0.40
PLANTA ASFALTICA EN CALIENTE	H.M.	1	193.04	0.041	35	\$1.45
SECADOR DE ARIDOS	H.M.	1	193.04	0.041	35	\$1.45
<b>SUB TOTAL N.</b>						<b>\$4.93</b>
<b>HERRAMIENTAS</b>						
HERRAMIENTAS MANUALES	%			5	1.77	\$0.09
<b>SUB TOTAL O.</b>						<b>\$0.09</b>
<b>MATERIALES</b>						
AGREGADOS FINOS	$m^3$			0.43	21.67	\$9.27
CEMENTO ASFÁLTICO AC-20	Kg			128.15	0.32	\$41.01
FÍLLER	$m^3$			0.06	22.16	\$1.33
DIESEL	Gl.			5.5	1.03	\$5.67
AGREGADO GRUESO	$m^3$			0.39	21.16	\$8.30
<b>SUB TOTAL P.</b>						<b>\$65.58</b>
<b>TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P):</b>						<b>\$72.36</b>
<b>INDIRECTOS Y UTILIDADES %:</b>						14% \$10.13
<b>OTROS INDIRECTOS %:</b>						0% \$0.00
<b>I.V.A. %</b>						12% \$9.90
<b>COSTO TOTAL DEL RUBRO (CD+CI):</b>						<b>\$92.39</b>
<b>VALOR OFERTADO:</b>						<b>\$92.39</b>



### 7.2.2. Análisis de costo de la mezcla asfáltica adicionada con limadura metálica.

Esta mezcla asfáltica requiere del uso de materiales que forman parte de una mezcla asfáltica tradicional además de la adición de limadura metálica en su constitución.

Cada uno de estos materiales atribuye al producto final un costo los cuales deben ser analizados y determinados a fin de conseguir un producto que cubra todas las necesidades para las cuales fue diseñado, a fin de que sea competitivo en el mercado.

En el capítulo VI de este documento se han fijado las cantidades óptimas de agregados, así como también de ligante asfáltico y limadura metálica que deben estar presentes en la mezcla a fin de que esta sea eficiente tanto para cargas de servicio, así como también ante efectos de intemperismo, cuyos costos unitarios se detalla así.

**Tabla No. 58:** Precios unitarios de materiales en mezcla asfáltica adicionada con limadura metálica (CONSTRUARENAS, Vinueza y Diario El Tiempo, 2013).

<b>Material</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor unitario en U.S.D.</b>
<b>Agregado Grueso</b>	m <sup>3</sup>	21.16
<b>Agregado Fino</b>	m <sup>3</sup>	22.16
<b>Fíller</b>	m <sup>3</sup>	21.67
<b>Limadura Metálica</b>	Kg	2.50
<b>Ligante asfáltico AC-20</b>	Kg	0.32

Como se aprecia en la tabla No. 58, los precios se detallan para cada tipo de agregado por metro cubico, y para el ligante asfáltico se especifica su valor por kilogramo en planta, así también para la limadura metálica se especifica su valor por kilogramo de chatarra, cuyos valores están actualizados y referidos a las minas de Palugo sector Pifo,

el ligante asfáltico AC-20 de la refinera de Esmeraldas, y la limadura metálica a los negocios de compra y venta de chatarra de Totoracocha provincia del Azuay.

Al igual que en la elaboración de la mezcla asfáltica tradicional son necesarias las cantidades óptimas para la mezcla asfáltica adicionada con limadura metálica, y además el valor de densidad máxima teórica para la correspondiente transformación de unidades de masa a unidades de volumen en el caso de los agregados, generándose así los siguientes datos.

**Tabla No. 59:** Volúmenes presentes en 1 m<sup>3</sup> de mezcla asfáltica adicionada con limadura metálica.

	%	gr.	cm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
<b>Agregado grueso</b>	41.33	924560.06	388960.90	0.39
<b>Agregado fino</b>	45.36	1014748.91	424226.14	0.43
<b>Fíller</b>	7.20	161074.13	59657.08	0.06
<b>Limadura Metálica</b>	0.43	9538.77	-	-
<b>Ligante asfáltico AC-20</b>	5.68	127078.13	-	-
<b>TOTAL</b>	100.00	2237000	-	-

En la tabla No. 59 se detallan las proporciones necesarias para elaborar 1 metro cúbico de la mezcla asfáltica adicionada con limadura metálica diseñada en este trabajo de investigación.

A partir de estos valores se elabora el análisis de precio unitario para la mezcla asfáltica tomando en cuenta los valores de mano de obra, herramientas, equipos y materiales necesarios para llevar a cabo su elaboración, así como también las unidades en las cuales se proveen cada uno de los insumos en el país.

**Tabla No. 60:** A.P.U. de mezcla asfáltica adicionada con limadura metálica.

<b>RUBRO:</b>	Preparación de mezcla asfáltica en caliente con limadura metálica				<b>UNID.</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>Uni.</b>	<b>Cuadri lla</b>	<b>Rend. m<sup>3</sup>/día</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unit.</b>	<b>Costo</b>
<b>MANO DE OBRA</b>						
OPERADOR DE PALA DE CASTILLO	H.H.	1	193.04	0.041	3.38	\$0.14
OPERADOR RESPONSABLE DE LA PLANTA ASFALTICA	H.H.	1	193.04	0.041	3.21	\$0.13
PEÓN	H.H.	12	193.04	0.497	3.01	\$1.50
<b>SUB TOTAL M.</b>						<b>\$1.77</b>
<b>MAQUINARIA</b>						
CALENTADOR DE ACEITE	H.M.	1	193.04	0.041	4.08	\$0.17
CARGADOR FRONTAL CAT 950 G	H.M.	1	193.04	0.041	35	\$1.45
CONSUMO ENERGIA ELECTRICA	KW./ H.	1	193.04	0.041	9.77	\$0.40
PLANTA ASFÁLTICA EN CALIENTE	H.M.	1	193.04	0.041	35	\$1.45
SECADOR DE ARIDOS	H.M.	1	193.04	0.041	35	\$1.45
<b>SUB TOTAL N.</b>						<b>\$4.93</b>
<b>HERRAMIENTAS</b>						
HERRAMIENTAS MANUALES	%			5	1.77	\$0.09
<b>SUB TOTAL O.</b>						<b>\$0.09</b>
<b>MATERIALES</b>						
AGREGADOS FINOS	m3			0.43	21.67	\$9.27
CEMENTO ASFÁLTICO AC-20	Kg			128.15	0.32	\$41.01
LIMADURA METÁLICA	Kg			9.54	2.50	\$23.85
FILLER	m3			0.06	22.16	\$1.33
DIESEL	Gl.			5.5	1.03	\$5.67
AGREGADO GRUESO	m3			0.39	21.16	\$8.30
<b>SUB TOTAL P.</b>						<b>\$89.43</b>
<b>TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P):</b>						\$96.21
<b>INDIRECTOS Y UTILIDADES %:</b>					14%	\$13.47
<b>OTROS INDIRECTOS %:</b>					0%	\$0.00
<b>I.V.A. %</b>					12%	\$13.16
<b>COSTO TOTAL DEL RUBRO (CD+CI):</b>						<b>\$122.84</b>
<b>VALOR OFERTADO:</b>						<b>\$122.84</b>

### 7.2.3. Análisis de costo de la mezcla asfáltica adicionada con fibras metálicas de Neumáticos fuera de uso.

Esta mezcla asfáltica requiere del uso de materiales que forman parte de una mezcla asfáltica tradicional además de la adición de fibras metálicas de N.F.U. en su constitución.

Cada uno de estos materiales atribuye al producto final un costo los cuales deben ser analizados y determinados a fin de conseguir un producto que cubra todas las necesidades para las cuales fue diseñado, a fin de que sea competitivo en el mercado.

En el capítulo VI de este documento se han fijado las cantidades óptimas de agregados, así como también de ligante asfáltico y fibras metálicas de N.F.U. que deben estar presentes en la mezcla a fin de que esta sea eficiente tanto para cargas de servicio, así como también ante efectos de intemperismo, cuyos costos unitarios se detalla así.

**Tabla No. 61:** Precios unitarios de materiales en mezcla asfáltica adicionada con fibras metálicas de N.F.U. (CONSTRUARENAS, Vinuesa y Diario El Tiempo, 2013).

Material	Unidad	Valor unitario en U.S.D.
Agregado Grueso	m3	21.16
Agregado Fino	m3	22.16
Filler	m3	21.67
Fibras de N.F.U.	Kg	1.40
Ligante asfáltico AC-20	Kg	0.32

Como se aprecia en la tabla No. 61, los precios se detallan para cada tipo de agregado por metro cúbico, y para el ligante asfáltico se especifica su valor por kilogramo en planta, así también para la fibras metálicas de N.F.U. se especifica su valor por kilogramo de

chatarra, cuyos valores están actualizados y referidos a las minas de Palugo sector Pifo, el ligante asfáltico AC-20 de la refinería de Esmeraldas, y la fibras metálicas de N.F.U. a los negocios de vulcanizadoras de la ciudad de Quito provincia de Pichincha.

Al igual que en la elaboración de la mezcla asfáltica tradicional son necesarias las cantidades óptimas para la mezcla asfáltica adicionada con fibras metálicas de N.F.U., y además el valor de densidad máxima teórica para la correspondiente transformación de unidades de masa a unidades de volumen en el caso de los agregados, generándose así los siguientes datos:

**Tabla No. 62:** Volúmenes presentes en 1 m<sup>3</sup> de mezcla asfáltica adicionada con fibras metálicas de N.F.U.

	%	gr.	cm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
<b>Agregado grueso</b>	41.02	886723.31	373043.04	0.37
<b>Agregado fino</b>	45.03	973221.27	406865.08	0.41
<b>Filler</b>	7.14	154482.32	57215.67	0.06
<b>Limadura Metálica</b>	1.16	24995.53	-	-
<b>Ligante asfáltico AC-20</b>	5.64	121877.58	-	-
<b>TOTAL</b>	100.00	2161300	-	-

En la tabla No. 61 se detallan las proporciones necesarias para elaborar 1 metro cúbico de la mezcla asfáltica adicionada con fibras metálicas de N.F.U. diseñada en este trabajo de investigación. A partir de estos valores se elabora el análisis de precio unitario para la mezcla asfáltica tomando en cuenta los valores de mano de obra, herramientas, equipos y materiales necesarios para llevar a cabo su elaboración, así como también las unidades en las cuales se proveen cada uno de los insumos en el país.

**Tabla No. 63:** A.P.U. de mezcla asfáltica con fibras metálicas de N.F.U.

<b>RUBRO:</b>	Preparación de mezcla asfáltica en caliente con alambre de N.F.U.				<b>UNID.</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>Unid.</b>	<b>Cuadri lla</b>	<b>Rend. m<sup>3</sup>/día</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unit.</b>	<b>Costo</b>
<b>MANO DE OBRA</b>						
OPERADOR DE PALA DE CASTILLO	H.H.	1	193.04	0.041	3.38	\$0.14
OPERADOR RESPONSABLE DE LA PLANTA ASFÁLTICA	H.H.	1	193.04	0.041	3.21	\$0.13
PEÓN	H.H.	12	193.04	0.497	3.01	\$1.50
<b>SUB TOTAL M.</b>						<b>\$1.77</b>
<b>MAQUINARIA</b>						
CALENTADOR DE ACEITE	H.M.	1	193.04	0.041	4.08	\$0.17
CARGADOR FRONTAL CAT 950 G	H.M.	1	193.04	0.041	35	\$1.45
CONSUMO ENERGIA ELECTRICA	KW./ H.	1	193.04	0.041	9.77	\$0.40
PLANTA ASFALTICA EN CALIENTE	H.M.	1	193.04	0.041	35	\$1.45
SECADOR DE ARIDOS	H.M.	1	193.04	0.041	35	\$1.45
<b>SUB TOTAL N.</b>						<b>\$4.93</b>
<b>HERRAMIENTAS</b>						
HERRAMIENTAS MANUALES	%			5	1.77	\$0.09
<b>SUB TOTAL O.</b>						<b>\$0.09</b>
<b>MATERIALES</b>						
AGREGADOS FINOS	m3			0.43	21.67	\$9.27
CEMENTO ASFÁLTICO AC-20	Kg			128.15	0.32	\$41.01
FIBRAS METALICAS DE N.F.U.	Kg			26.11	1.4	\$36.55
FÍLLER	m3			0.06	22.16	\$1.33
DIESEL	Gl.			5.5	1.03	\$5.67
AGREGADO GRUESO	m3			0.39	21.16	\$8.30
<b>SUB TOTAL P.</b>						<b>\$102.13</b>
<b>TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P):</b>						<b>\$108.91</b>
<b>INDIRECTOS Y UTILIDADES %:</b>						<b>14% \$15.25</b>
<b>OTROS INDIRECTOS %:</b>						<b>0% \$0.00</b>
<b>I.V.A. %</b>						<b>12% \$14.90</b>
<b>COSTO TOTAL DEL RUBRO (CD+CI):</b>						<b>\$139.06</b>
<b>VALOR OFERTADO:</b>						<b>\$139.06</b>

#### 7.2.4. Análisis de costo de la mezcla asfáltica adicionada con tetra pak.

Esta mezcla asfáltica requiere del uso de materiales que forman parte de una mezcla asfáltica tradicional además de la adición de fibras tetra pak en su constitución.

Cada uno de estos materiales atribuye al producto final un costo los cuales deben ser analizados y determinados a fin de conseguir un producto que cubra todas las necesidades para las cuales fue diseñado, a fin de que sea competitivo en el mercado.

En el capítulo VI de este documento se han fijado las cantidades óptimas de agregados, así como también de ligante asfáltico y fibras tetra pak que deben estar presentes en la mezcla a fin de que esta sea eficiente tanto para cargas de servicio, así como también ante efectos de intemperismo, cuyos costos unitarios se detalla así.

**Tabla No. 64:** Precios unitarios de materiales en mezcla asfáltica adicionada con fibras tetra pak (CONSTRUARENAS, Vinuesa y Diario El Tiempo, 2013).

<b>Material</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor unitario en U.S.D.</b>
<b>Agregado Grueso</b>	m3	21.16
<b>Agregado Fino</b>	m3	22.16
<b>Filler</b>	m3	21.67
<b>Fibras tetra pak</b>	Kg	0.10
<b>Ligante asfáltico AC-20</b>	Kg	0.32

Como se aprecia en la tabla No. 64, los precios se detallan para cada tipo de agregado por metro cubico, y para el ligante asfaltico se especifica su valor por kilogramo en planta, así también para la fibras tetra pak se especifica su valor por kilogramo de reciclado, cuyos valores están actualizados y referidos a las minas de Palugo sector Pifo, el ligante asfaltico

AC-20 de la refinera de Esmeraldas, y las fibras tetra pak a los negocios de compra y venta de plástico y cartón del Valle de los Chillos provincia de Pichincha.

Al igual que en la elaboración de la mezcla asfáltica tradicional son necesarias las cantidades óptimas determinadas la tabla No. 31 de este documento para la mezcla asfáltica adicionada con fibras tetra pak., y además el valor de Densidad máxima teórica para la correspondiente transformación de unidades de masa a unidades de volumen en el caso de los agregados, generándose así los siguientes datos.

**Tabla No. 65:** Volúmenes presentes en 1 m<sup>3</sup> de mezcla asfáltica adicionada con fibras tetra pak.

	%	gr.	cm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
<b>Agregado grueso</b>	41.04	886981.32	373151.59	0.37
<b>Agregado fino</b>	45.04	973504.44	406983.46	0.41
<b>Filler</b>	7.15	154527.27	57232.32	0.06
<b>Limadura Metálica</b>	1.13	24373.93	-	-
<b>Ligante asfáltico AC-20</b>	5.64	121913.04	-	-
<b>TOTAL</b>	100.00	2161300	-	-

En la tabla No. 65 se detallan las proporciones necesarias para elaborar 1 metro cubico de la mezcla asfáltica adicionada con fibras tetra pak diseñada en este trabajo de investigación.

A partir de estos valores se elabora el análisis de precio unitario para la mezcla asfáltica tomando en cuenta los valores de mano de obra, herramientas, equipos y materiales necesarios para llevar a cabo su elaboración, así como también las unidades en las cuales se proveen cada uno de los insumos en el país.



**Tabla No. 66:** A.P.U. de mezcla asfáltica adicionada con fibras tetra pak.

<b>RUBRO:</b>	Preparación de mezcla asfáltica en caliente con fibras tetra pak				<b>UNID.</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>Unid.</b>	<b>Cuadri lla</b>	<b>Rend. m<sup>3</sup>/día</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unit.</b>	<b>Costo</b>
<b>MANO DE OBRA</b>						
OPERADOR DE PALA DE CASTILLO	H.H.	1	193.04	0.041	3.38	\$0.14
OPERADOR RESPONSABLE DE LA PLANTA ASFÁLTICA	H.H.	1	193.04	0.041	3.21	\$0.13
PEÓN	H.H.	12	193.04	0.497	3.01	\$1.50
<b>SUB TOTAL M.</b>						<b>\$1.77</b>
<b>MAQUINARIA</b>						
CALENTADOR DE ACEITE	H.M.	1	193.04	0.041	4.08	\$0.17
CARGADOR FRONTAL CAT 950 G	H.M.	1	193.04	0.041	35	\$1.45
CONSUMO ENERGIA ELECTRICA	KW./ H.	1	193.04	0.041	9.77	\$0.40
PLANTA ASFALTICA EN CALIENTE	H.M.	1	193.04	0.041	35	\$1.45
SECADOR DE ARIDOS	H.M.	1	193.04	0.041	35	\$1.45
<b>SUB TOTAL N.</b>						<b>\$4.93</b>
<b>HERRAMIENTAS</b>						
HERRAMIENTAS MANUALES	%			5	1.77	\$0.09
<b>SUB TOTAL O.</b>						<b>\$0.09</b>
<b>MATERIALES</b>						
AGREGADOS FINOS	m3			0.43	21.67	\$9.27
CEMENTO ASFÁLTICO AC-20	Kg			128.15	0.32	\$41.01
FIBRAS TETRA PAK	Kg			24.37	0.10	\$2.44
FÍLLER	m3			0.06	22.16	\$1.33
DIESEL	gl			5.5	1.03	\$5.67
AGREGADO GRUESO	m3			0.39	21.16	\$8.30
<b>SUB TOTAL P.</b>						<b>\$68.01</b>
<b>TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P):</b>						<b>\$74.80</b>
<b>INDIRECTOS Y UTILIDADES %:</b>						<b>14% \$10.47</b>
<b>OTROS INDIRECTOS %:</b>						<b>0% \$0.00</b>
<b>I.V.A. %</b>						<b>12% \$10.23</b>
<b>COSTO TOTAL DEL RUBRO (CD+CI):</b>						<b>\$95.50</b>
<b>VALOR OFERTADO:</b>						<b>\$95.50</b>

### 7.3. COMPARACIÓN DE COSTOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DISEÑADAS CON REFERENCIA AL COSTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TRADICIONALES EN EL MERCADO.

En el mercado ecuatoriano actualmente existen plantas que dedican su actividad a la elaboración venta y comercialización de mezcla asfáltica, estas plantas sirven como referencia para la presente investigación en cuanto al precio que manejan para la venta de este producto, el cual es comparado de acuerdo a los valores obtenidos en los A.P.U. desarrollados en el apartado anterior, cuyos resultados se exponen en la siguiente tabla:

**Tabla No. 67:** Costo unitario de mezclas asfálticas.

	<b>Mezcla asfáltica tradicional (Ing. Juan Díaz)</b>	<b>Mezcla asfáltica tradicional</b>	<b>Mezcla asfáltica con limadura metálica</b>	<b>Mezcla asfáltica con fibra metálica de N.F.U.</b>	<b>Mezcla asfáltica con fibra tetra pak</b>
<b>Costo /m<sup>3</sup></b>	\$90.00	\$92.39	\$122.84	\$139.06	\$95.50

En la tabla No. 67 se aprecia los costos de las diferentes mezclas asfálticas tanto de aquellas que están desarrolladas en la presente investigación, así como también el costo de la mezcla asfáltica elaborada en la planta del Ing. Juan Díaz, ubicada en la Parroquia de Guayllabamba, ciudad de Quito, provincia de Pichincha, en la cual el costo de la mezcla asfáltica tradicional es de 90 dólares por cada metro cúbico.

De acuerdo a este precio se puede interpretar la diferencia existente entre los precios definidos en esta investigación para cada una de las mezclas asfálticas desarrolladas, con relación al precio actual del mercado, representándolo en porcentaje.

**Tabla No. 68:** Diferencia en porcentaje de mezclas asfálticas diseñadas con relación al precio del mercado.

	<b>Mezcla asfáltica tradicional</b>	<b>Mezcla asfáltica con limadura metálica</b>	<b>Mezcla asfáltica con fibra metálica de N.F.U.</b>	<b>Mezcla asfáltica con fibra tetra pak</b>
<b>Costo /m3</b>	2.66%	36.49%	54.51%	6.11 %

Según la tabla No. 68 la diferencia entre la mezcla tradicional elaborada en esta investigación dista del precio del mercado en un 2.66%, un valor que representa a una mezcla asfáltica de iguales características a la existente en el mercado en la actualidad en el sector de Guayllabamba, mientras que debido al costo de los materiales usados en esta investigación provenientes del sector de Pifo el costo varía en un porcentaje bajo, por ende el valor de la diferencia al ser de 2.39 dólares es un valor aceptable en cuanto a la definición del precio unitario.

De acuerdo al resultado obtenido en la mezcla elaborada con limadura metálica, con relación al costo de mercado, distan en un 34.49%, presentando esta características menores en cuanto a la estabilidad con respecto a la mezcla asfáltica existente en el mercado actualmente, por ende representa un gasto innecesario.

Con relación a la mezcla asfáltica elaborada con fibras de N.F.U. su valor dista del valor de mercado en un 54.51%, para una mezcla de mejores características en cuanto a la estabilidad y flujo, por ende su valor es aceptable de acuerdo al costo de mezclas elaboradas con polímeros que mejoren las características de las mezclas asfálticas

tradicionales existentes en el mercado hasta valores similares a los presentados en esta investigación mediante la adición de fibras de N.F.U.

Con respecto a la mezcla diseñada con fibras tetra pak, su valor dista del valor de mercado en un 6.11 %, para una mezcla de características de estabilidad menores a las presentes en el mercado actualmente, por ende este costo se hace innecesario.

#### 7.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE CHOQUE TÉRMICO

En el ensayo de choque térmico se presentaron resultados inferiores en cuanto a los parámetros de las muestras diseñadas en esta investigación relacionada a la estabilidad y flujo de las mismas los cuales se presentan en las tablas N0. 68 y No.69:

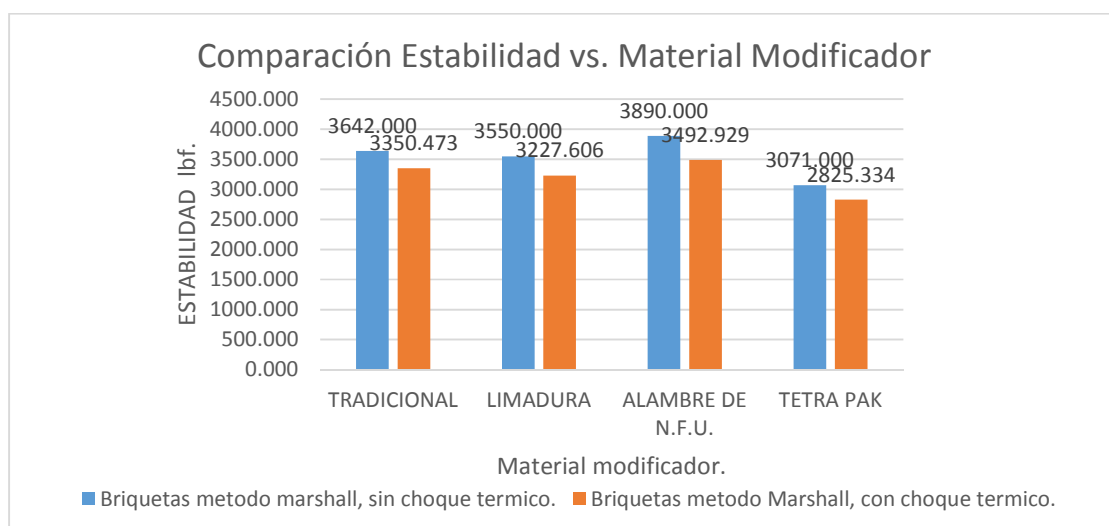
**Tabla No. 69:** Resultados de los parámetros evaluados en las muestras ensayadas por choque térmico.

	#	Mezcla	%			Estabilidad	Flujo
			M.Recic	Asfalto	Agregado	lbf	0.01"
CHOQUE TERMICO	1	TRADICIONAL	6.05%	6.05%	93.95%	3352.834	10.00
	2		6.05%	6.05%	93.95%	3351.522	12.00
	3		6.05%	6.05%	93.95%	3347.062	13.00
	<b>PROMEDIO</b>					<b>3350.473</b>	<b>11.67</b>
	1	LIMADURA	7.50%	6.05%	93.95%	3224.545	10.00
	2		7.50%	6.05%	93.95%	3228.218	12.00
	3		7.50%	6.05%	93.95%	3230.054	12.00
	<b>PROMEDIO</b>					<b>3227.606</b>	<b>11.33</b>
	1	ALAMBRE DE N.F.U.	20.50%	6.05%	93.95%	3494.766	11.00
	2		20.50%	6.05%	93.95%	3492.929	12.00
	3		20.50%	6.05%	93.95%	3491.093	11.00
	<b>PROMEDIO</b>					<b>3492.929</b>	<b>11.33</b>
1	TETRA PAK	20.00%	6.05%	93.95%	2818.129	14.00	
2		20.00%	6.05%	93.95%	2824.161	14.00	
3		20.00%	6.05%	93.95%	2833.712	15.00	
<b>PROMEDIO</b>					<b>2825.334</b>	<b>14.33</b>	

**Tabla No. 70:** Resultados de los parámetros analizados en las muestras diseñadas en el capítulo VI.

Mezcla	%	%	%	Estabilidad	Flujo	V. a.	VAM	VAF
	M.Recic.	Asfalto	Agregado	lbf	0.01''	%	%	%
TRADICIONAL	6.05%	6.05%	93.95%	3642.000	12.46	4.00	15.49	74.20
LIMADURA	7.50%	6.05%	93.95%	3550.000	11.67	4.00	16.00	75.00
ALAMBRE DE N.F.U.	20.50%	6.05%	93.95%	3890.000	11.60	4.00	15.39	74.00
TETRA PAK	20.00%	6.05%	93.95%	3071.000	14.67	4.63	20.00	76.35

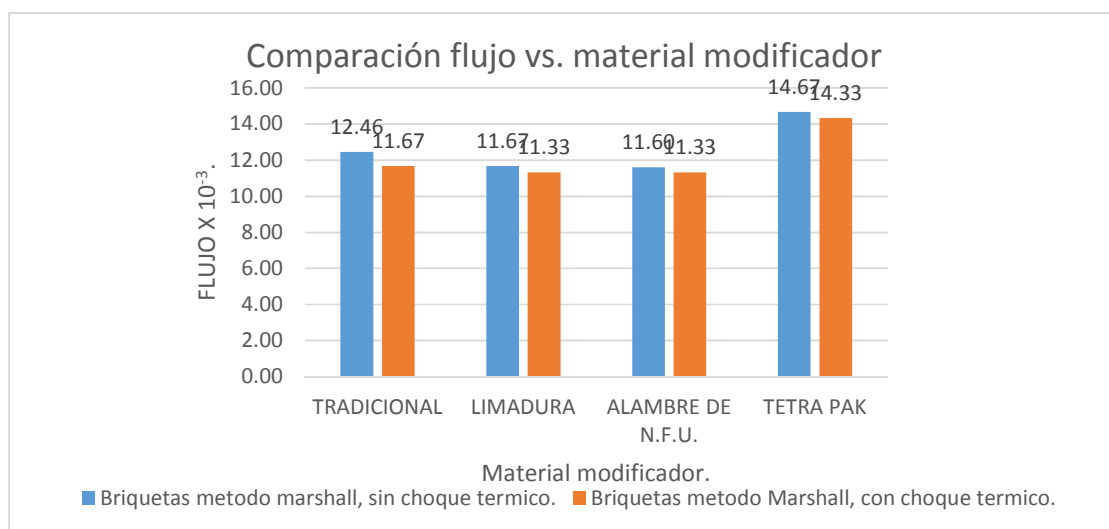
**Análisis de la estabilidad en las mezclas asfálticas sometidas a choque térmico con respecto a las ensayadas a temperatura constante.**



**Fig. 77:** Comparación de estabilidad vs. material reciclado modificador usado en la mezcla asfáltica.

Según estos datos en las mezclas asfálticas sometidas a choque térmico se produjo una pérdida de estabilidad con respecto a aquellas ensayadas de forma tradicional es decir de acuerdo al método Marshall sin variar su temperatura de ensayo, lo cual indica una pérdida de su capacidad para soportar cargas.

**Análisis del flujo en las mezclas asfálticas sometidas a choque térmico con respecto a las ensayadas a temperatura constante.**



**Fig. 78:** Comparación de flujo vs. material reciclado modificador usado en la mezcla asfáltica.

Según estos datos en las mezclas asfálticas sometidas a choque térmico se produjo una disminución en su flujo con respecto a aquellas ensayadas de forma tradicional es decir de acuerdo al método Marshall sin variar su temperatura de ensayo, lo cual indica que la mezcla se tornó más rígida debido al cambio de temperatura.

## CAPÍTULO VIII

### 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 8.1 ANTECEDENTES DE CONCLUSIONES

Al iniciar el proyecto de investigación se utilizó los agregados (finos y gruesos) de las minas de Píntag para continuar el estudio de mezclas asfálticas modificadas en caliente que la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE ha venido realizando, pero conforme se ejecutaba los ensayos de caracterización de los agregados se pudo determinar que la gravedad específica de la grava de Píntag es de 2.23 y no está dentro del rango de aceptación como se encuentra detallado en el capítulo 5 (Ensayo de caracterización de agregados), lo que suponía un material liviano. Por lo tanto se elevó los valores sobre los rangos de aceptación definidos en el NEVI-12 en cuanto a sus valores de densidad (bulk, rice) y % vacíos de aire.

Esto se confirmó con la determinación de la gravedad específica aparente del agregado grueso de la misma mina que es de 2.55, lo que significa que el material es muy poroso, por lo tanto la estabilidad de la mezcla bituminosa disminuiría considerablemente al aumentar el índice de vacíos. Por esta razón se utilizó otros agregados, esta vez de las minas de Pifo sector Palugo, para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente elaboradas de forma tradicional (agregados y ligante asfáltico), y las mezclas modificadas con tetra pak, alambre de neumático fuera de uso y limadura metálica reciclados, que como se pudo observar en el capítulo 5 cumplen con todas las especificaciones de las normas ASTM y NEVI-12.

En el rango de franja (huso) granulométrica a usarse de acuerdo al NEVI-12, se elaboró un proceso de estabilización granulométrico según se detalla en el capítulo VI de este documento y con la granulometría estabilizada según norma el NEVI -12 para mezcla MAC-2, en la elaboración de los especímenes de ensayo (briquetas).

La mezcla Marshall tradicional diseñada en esta investigación produjo resultados de estabilidad en un rango de 3520 lbf a 3670 lbf y flujos en el orden de  $12 \times 10^{-3}$  pulg. a  $12.5 \times 10^{-3}$  pulg, la mezcla elaborada con limadura metálica originó una estabilidad en un rango de 3500 lbf a 3600 lbf, y flujos en el orden de  $11 \times 10^{-3}$  pulg a  $12 \times 10^{-3}$  pulg, la mezcla elaborada con alambre de neumáticos fuera de uso diseñada originó resultados de estabilidad en un rango de 3540 lbf a 3610 lbf, y flujos en el orden de  $11.5 \times 10^{-3}$  pulg a  $12 \times 10^{-3}$  pulg, finalmente la mezcla elaborada con tetra pak trajo resultados de estabilidad en un rango de 3060 lbf a 3075 lbf, y flujos en el orden de  $14 \times 10^{-3}$  pulg a  $15 \times 10^{-3}$  pulg.

La definición de las cantidades apropiadas de agregados presentes en la mezcla asfáltica dieron como resultado una mezcla densa o cerrada, ya que predomina la presencia de finos (55.98%) sobre gruesos (44.02%), en una medida tolerable. Además, se pudo observar que el desgaste del agregado grueso según el ensayo de abrasión es del 25.53 %, siendo inferior al 40 % como lo indica el NEVI-12 (NEVI-12, 2013).

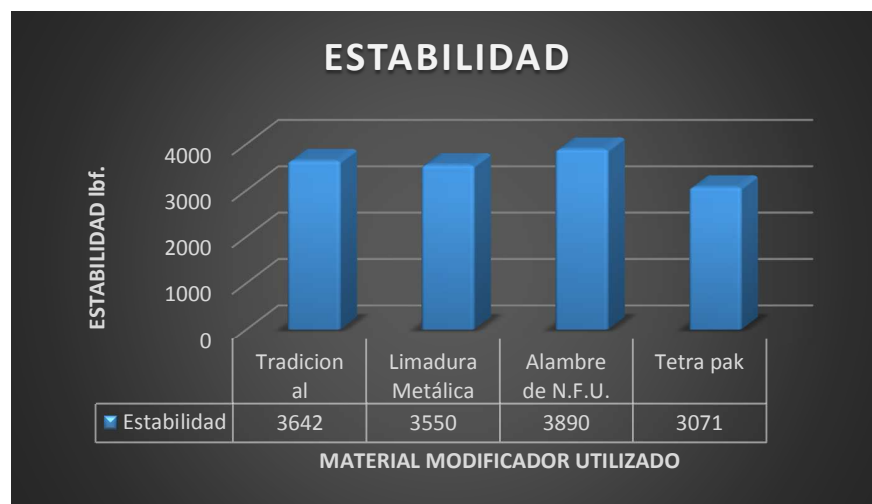
## **8.2 CONCLUSIONES**

- El porcentaje óptimo de asfalto para la elaboración de la mezcla Marshall tradicional expuesto en el capítulo VII de este documento definió un valor de 6.05% de ligante asfáltico presente en la mezcla con relación al peso total de agregados según la fórmula maestra presentada en el mismo capítulo de este documento, valor que concuerda con



investigaciones previas en la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de las Fuerzas armadas para agregados de similares características en un rango del 6% al 7%.

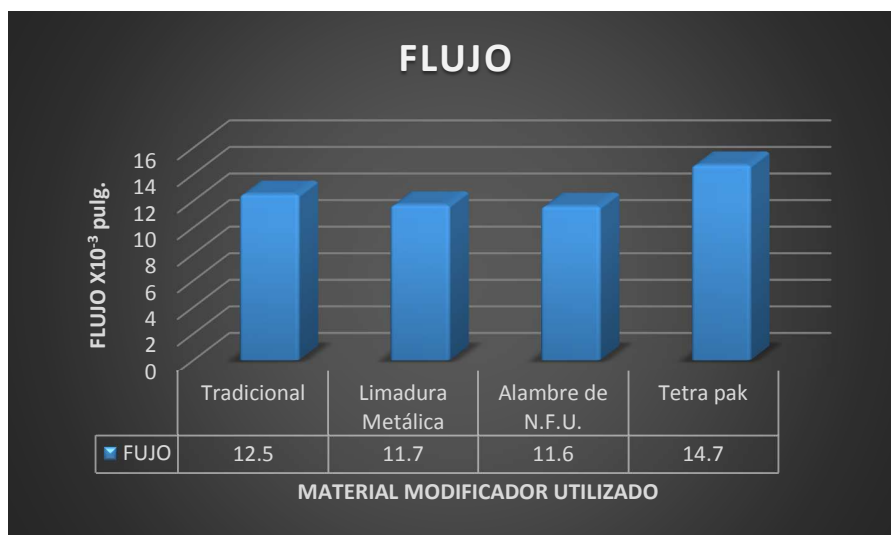
- Como se pudo observar en la tabla No. 52, los mejores resultados obtenidos de estabilidad y flujo en este proyecto de investigación se presentaron en la mezcla asfáltica en caliente modificada con el 20.5% de alambre de neumático fuera de uso con respecto al ligante asfáltico utilizado en la mezcla Marshall, con un valor de 3890 lbf. siendo esta superior en 248 lbf comparado con las 3642 lbf. que presenta la mezcla Marshall tradicional según se puede ver en la fig. 79, lo cual indica una mezcla asfáltica más resistente a las sollicitaciones a las que sea sometida.



**Fig. 79:** Valores de estabilidad en las diferentes mezclas realizadas.

- El flujo obtenido en la mezcla asfáltica elaborada con alambre de neumáticos fuera de uso obtuvo un valor  $11.6 \times 10^{-3}$  pulg., el cual está más cerca del valor promedio del rango de aceptación de este parámetro propuesto por el NEVI-12 ( $11 \times 10^{-3}$  pulg.), que

el de la mezcla Marshall tradicional de  $12.5 \times 10^{-3}$  pulg., por supuesto que ambos valores son aceptables de acuerdo a la norma, según se puede ver en la fig. 80.



**Fig. 80:** Valores de flujo en las diferentes mezclas realizadas.

- De acuerdo a las figuras 79 y 80, se observa que el tetra pak no generó ninguna variación positiva en la mezcla asfáltica Marshall tradicional, al contrario disminuyó el valor de estabilidad y aumentó el flujo de la misma, produciendo una mezcla plástica, es decir afectó a una mezcla óptima debido al carácter voluminoso que presenta este material el cual elevó el espesor de los especímenes elaborados y por ende el contenido de vacíos en la mezcla.
- La limadura metálica adicionada a la mezcla Marshall tradicional provocó que los vacíos en la mezcla se cerraran, es decir produjo una composición aún más cerrada que la original, pero a porcentajes mayores al óptimo de este material presente en la mezcla definida en el capítulo VI de este documento; la estabilidad de la mezcla sube

de manera considerable, manteniendo valores de flujo en un rango prácticamente constante sin sobrepasar los límites propuestos por el NEVI-12 pero sin cumplir con los límites relacionados al contenido de vacíos de aire en la mezcla asfáltica.

- De acuerdo al análisis de choque térmico realizado a los especímenes de ensayo (briquetas), la estabilidad y flujo de las mezclas asfálticas ensayadas a una temperatura constante de 60°C, se ven reducidos debido al cambio brusco de temperatura (0°C a 60°C), pero a pesar de esta reducción, la estabilidad y flujo presentes en estas muestras sometidas a choque térmico, no se encuentran fuera de los límites normativos (NEVI-12), por ende no incide, ni se ven afectados por los efectos de intemperismo presentes en las vías y cumplirán de manera eficiente con el soporte de las sobrecargas actuantes.
- El hecho de utilizar reciclados para las mezclas asfálticas en caliente, ha permitido que su uso sea amigable con el medio ambiente, siendo los mismos reutilizados y no desechados a los botaderos como se lo hace comúnmente, sin embargo en la tabla No. 67 se puede notar la diferencia de costos de las mezclas diseñadas en este proyecto de investigación con relación al costo de las mezclas existentes en el mercado nacional (\$ 90.00 c/m<sup>3</sup>).

### **8.3 RECOMENDACIONES**

- Respecto al uso de alambre de neumático fuera de uso en mezclas asfálticas en caliente se recomienda usar un porcentaje del 20.5% de este material con respecto al peso total de ligante asfáltico presente en la mezcla según la fórmula maestra definida en el capítulo VII de este documento, en una longitud de aproximadamente

$\frac{3}{4}$  de pulgada para lograr un aumento en la estabilidad en un rango de 3642 lbf a 3890 lbf, y una disminución en el flujo en un rango de  $11.6 \times 10^{-3}$  pulg a  $12.5 \times 10^{-3}$  pulg.

- Con respecto al uso de limadura metálica en mezclas asfálticas en caliente, no se recomienda su uso ya que este material provocó una reducción del porcentaje de vacíos de aire y una disminución de la estabilidad en 92 lbf. con respecto al valor de estabilidad de la mezcla Marshall tradicional. Dicha mezcla se tornó más frágil.
- Con respecto al uso de tetra pak, no se recomienda su uso ya que este material provocó una reducción de la estabilidad de 571 lbf, con respecto al valor de estabilidad de la mezcla Marshall tradicional, además provocó un aumento en el flujo provocando que este salga del límite superior que propone el NEVI-12 para este parámetro; en síntesis este material provocó que la mezcla se torne más blanda.
- De utilizarse la mezcla modificada con fibras tetra pak es recomendable usarla en vías de tráfico liviano (CLASE B) en donde el rango de variación del flujo es de 8 a 16 décimas de pulgada, debido a que la misma mezcla presenta un flujo de 14.7 (0.01") y sobrepasa el límite superior de 14 décimas de pulgada que el NEVI-12 en su volumen 3 lo detalla en la tabla 405-5.9 (Requisitos para Mezcla de hormigón Bituminoso).
- Se recomienda realizar los ensayos dinámicos a la mezcla, en especial el ensayo de ahuellamiento mediante la rueda cargada, ya que este permite efectuar medidas adicionales para estudiar tasas de compactación y deformación plástica de mezclas bituminosas de una o varias capas. No hay que olvidar que el ahuellamiento es un tipo de defecto o falla que se produce en pavimentos asfálticos y consiste en una

depresión canalizada en la huella de circulación de vehículos, de allí la necesidad de conocer más a fondo estos factores de gran importancia sobre todo en este proyecto investigativo de varios estudios que realiza la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE para diseño de mezclas asfálticas en caliente adicionando materiales reciclados.

- También es fundamental darle continuidad a esta investigación con la realización de tramos de prueba, para evaluar el desempeño que tendrían las mezclas asfálticas en caliente diseñadas en este proyecto y conocer su comportamiento frente a las inclemencias de las cargas del tránsito y el medio ambiente en campo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Secretaría Nacional de Planificación y desarrollo. (2013). Buen Vivir Plan Nacional 2013 - 2017. Recuperado el 31 de Julio de 2014, de <http://www.buenvivir.gob.ec/objetivo-7.-garantizar-los-derechos-de-la-naturaleza-y-promover-la-sostenibilidad-ambiental-territorial-y-global>*
- AASHTO T 228-78. (s.f.). Standard Method of Test for Specific Gravity of Semi-Solid Bituminous Materials.*
- AASHTO T-176. (s.f.). PLASTIC FINES IN GRADED AGGREGATES AND SOILS BY USE OF THE SAND EQUIVALENT TEST.*
- AASHTO T49-03. (s.f.). Standard Method of Test for Penetration of Bituminous Materials.*
- AASHTO T-53. (s.f.). Standard Method of Test for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus).*
- AASHTO T-84. (s.f.). SPECIFIC GRAVITY AND ABSORPTION OF FINE AGGREGATE.*
- AASHTO T-85. (s.f.). SPECIFIC GRAVITY AND ABSORPTION .*
- AASHTO T-96. (s.f.). Standard Method of Test for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine .*
- ADELCA. (2011). [www.adelca.com](http://www.adelca.com). Obtenido de [http://www.adelca.com/sitio/esp/reciclaje\\_lachatarra.php](http://www.adelca.com/sitio/esp/reciclaje_lachatarra.php)*
- Algosa full tires. (2014). Estructura de una llanta. Obtenido de <http://www.llantasalgosacr.com/index.php?id cms=2&controller=cms>*
- ANDES. (31 de octubre de 2012). Agencia Pública de Noticias del Ecuador y Suramérica. Obtenido de <http://www.andes.info.ec/es/sociedad/8327.html>*
- ASTM C 127-12. (2012). Método de Ensayo Normalizado para Determinar la Densidad, la Densidad Relativa (Gravedad Específica), y la Absorción de Agregados Gruesos. West Conshohocken.*
- ASTM C 136-03. (2003). Método de Ensayo Normalizado para la Determinación Granulométrica de Agregados Finos y Gruesos. West Conshohocken: ASTM International.*
- ASTM C128-12. (2012). Método de Ensayo Normalizado para Determinar la Densidad, la Densidad Relativa (Gravedad Específica), y la Absorción de Agregados Finos. West Conshohocken.*

- ASTM C131. (s.f.). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.*
- ASTM C-136-03. (2003). Granulometría por tamizado de agregados gruesos y finos. En A. A. Materials, American Association for Testing Materials.*
- ASTM D 1559. (1998). Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus (Withdrawn 1998). U.S.A.*
- ASTM D 70-76. (s.f.). Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method).*
- ASTM D-2041 . (1996). Gravedad Específica Máxima Teórica en Mezclas Bituminosas.*
- ASTM D-2419. (s.f.). Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate.*
- ASTM D-3625 . (1996). Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water. En A. S. Materials, Normas ASTM.*
- ASTM D-5. (s.f.). Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. American Association for testing Materials.*
- ASTM D-946. (1982). Obtenido de <http://www.pavementinteractive.org/article/penetration-grading/>*
- ASTM D-95. (s.f.). Standard Test Method for Water in Petroleum Products and Bituminous Materials by Distillation.*
- BITUMIXCVV. (Junio de 2005). bitumix cvvcl. Obtenido de <http://www.bitumixcvv.cl/articulos/2005/julio/archivos/superpave.pdf>*
- BORJA, C. (13 de mayo de 2010). Viviendo en la tierra. Obtenido de Techos hechos de tetra pak en Brasil: <http://viviendoenlatierra.com/2010/05/13/techos-hechos-de-tetrapack-en-brasil/>*
- Bustamante, X. (2011). Reciclaje de llantas fuera de uso. Fundación Natura.*
- Caceres Alejandro. (2007). Análisis de la Metodología Superpave para el Diseño de Mezclas Asfálticas en México. Mexico.*
- CARLOS CURCO, BYRON LEÓN. (2013). INFLUENCIA DE ADITIVOS MEJORADORES DE ADHERENCIA EN LA RESISTENCIA DE HORMIGONES ASFÁLTICOS DISEÑADOS CON AGREGADOS DE LAS CANTERAS DE PINTAG Y GUAYLLABAMBA. QUITO.*
- CONSTRUARENAS y Vinuesa. (Junio de 2014). Precios de materiales para mezcla asfáltica tradicional. Quito, Pichincha, Ecuador.*

- CONSTRUARENAS, Vinuesa y Diario El Tiempo. (01 de Agosto de 2013). Precios unitarios de materiales en mezcla asfáltica adicionada con limadura metálica. La Chatarra sostiene Familias. Quito y Cuenca, Pichincha, Azuay, Ecuador.*
- D-3625, A. (1996). Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water. En A. S. Materials.*
- Dean Orestes Carrasco Flores. (2004). Estudio comparativo entre mezclas asfálticas en caliente y mezclas asfálticas con emulsiones tibias. Piura.*
- Diario El Telégrafo. (2014). Con envases multicapas se construyen tejas. Obtenido de <http://www.telegrafo.com.ec/sociedad/item/con-envases-multicapas-se-construyen-tejas.html>*
- Díaz, J. (11 de Julio de 2014). Planta de producción de mezcla asfáltica. Quito-Guayllabamba, Pichincha, Ecuador.*
- Ecuaplástico. (2012). Noticias Ecuador. Obtenido de [http://www.noticiastetrapak.com/ECONOTICIAS/2012/Quinta\\_edicion/ecu-1.html](http://www.noticiastetrapak.com/ECONOTICIAS/2012/Quinta_edicion/ecu-1.html)*
- EMCOCABLES. (2014). Alambres. emcocables.*
- ESPOL. (2013). Proyecto de inversión para la implementación de una planta recicladora de neumáticos fuera de uso en la ciudad de Guayaquil. Obtenido de [http://www.cib.espol.edu.ec/Digipath/D\\_Tesis\\_PDF/D-94975.pdf](http://www.cib.espol.edu.ec/Digipath/D_Tesis_PDF/D-94975.pdf)*
- Genrariat de Catalunya Gencat.cat. (2012). Novedad mundial en reciclaje, en Castellbisbal. Obtenido de <http://www20.gencat.cat/portal/site/territori/menuitem.bd76c203a0da08645f13ae92b0c0e1a0/?vgnextoid=5c1bc3be04fbb210VgnVCM1000008d0c1e0aRCRD&vgnnextchannel=5c1bc3be04fbb210VgnVCM1000008d0c1e0aRCRD&vgnnextfmt=detall2&contentid=b3cc391c18c4310VgnVCM2000009b0c>*
- GIC CUENCA. (2011). Reciclaje de llantas. Grupo Innovador del Caucho.*
- Globalenvironment. (febrero de 2011). Reciclado de envases tetra pak Argentina y Chile. Obtenido de [http://www.esquel.org.ar/gobierno/images/descargas/10\\_horacio\\_martino\\_tetrapak.pdf](http://www.esquel.org.ar/gobierno/images/descargas/10_horacio_martino_tetrapak.pdf)*
- Hidalgo, A. (2013). DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA ELABORACIÓN DE TABLEROS AGLOMERADOS A PARTIR DE TETRA PAK. En A. Hidalgo. Riobamba.*
- Instituto de Investigaciones Oceanológicas de Mexico. (2007). Ficha de Seguridad Química del hierro en Limaduras. En I. d. Mexico, Ficha de Seguridad Química del hierro en Limaduras. Mexico.*



- INSTRON. (2014). INSTRON La diferencia se puede medir. Obtenido de [http://www.instron.com.es/wa/solutions/California\\_Test\\_Method\\_366\\_Stabilometer.aspx](http://www.instron.com.es/wa/solutions/California_Test_Method_366_Stabilometer.aspx)*
- INTEREMPRESAS. (15 de Septiembre de 2008). [www.interempresas.net](http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/23996-Espana-recicla-mas-de-un-millon-de-toneladas-de-metales-al-ano-a-traves-de-fragmentadoras.html). Obtenido de <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/23996-Espana-recicla-mas-de-un-millon-de-toneladas-de-metales-al-ano-a-traves-de-fragmentadoras.html>*
- MAE. (2013).*
- MAE. (2013). Reciclaje de llantas.*
- Martino, H. (2011). Cómo se reciclan los envases Tetra Pak. Obtenido de <http://www.quiminet.com/articulos/el-ensado-tetra-pak-2641575.htm>*
- METROGAS. (2013). Reutilización y arte a partir del Tetra Pak. Cambia Hoy.*
- Mora, I. E. (2012). Planvhas de cubierta con polialumnio reciclado. Quito.*
- NEVI-12 . (2013). Procedimientos de trabajo. En M. d. publicas, Formula Maestra de obra (Vol. 3, pág. 415). Quito.*
- NEVI-12. (2012). Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Obtenido de <http://www.obraspublicas.gob.ec/norma-ecuatoriana-vial-nevi-12/>*
- NEVI-12. (2013). Propiedades de origen requeridas para agregados gruesos en mezclas asfálticas densas. En M. d. publicas, Agregados para mezclas asfálticas de graduacion densa (Vol. 3, pág. 904).*
- NEVI-12, M. d. (2013). NEVI-12 Norma Ecuatoriana Vial (Vol. 3 Especificaciones generales para la construccion de caminos y puentes ). (MTOPE., Ed.) Quito, Pichincha, Ecuador. Recuperado el 8 de Julio de 2014*
- NEVI-12, T. 8.-4. (2013). Tabla 812-4.2 Criterios Marshall para VMA. En M. d. publicas, Norma ecuatoriana vial 2012 (Vol. 3, pág. 922). Quito.*
- NEVI-12, T. C. (2013). Tabla 812-4.1 Criterios Marshall. En M. d. Publicas, Especificaciones generales para la construccion de caminos y puentes (2013 ed., Vol. 3, pág. 922). Quito, Pichincha, Ecuador. Recuperado el 8 de Julio de 2014*
- Norma Mexicana. (2004, párr.22). NMX-T-118-SCFI.*
- Norma Mexicana. (2004, párr.24). NMX-T-118-SCFI.*
- Padilla, A. (2004). Obtenido de Materiales Básicos: <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3334/13/34065-13.pdf>*

- Padilla, A. (2004). *Obtenido de Materiales Básicos:*  
<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3334/13/34065-13.pdf>
- Padilla, A. (2007). *UPCommons. Obtenido de*  
<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3334/13/34065-13.pdf>
- QUMINET. (2011). *El envasado Tetra Pak. Obtenido de* <http://www.quiminet.com/articulos/el-ensado-tetra-pak-2641575.htm>
- RECICLAMETAL. (2011). *RECICLAMETAL. Obtenido de*  
<http://www.reciclametal.com/index.php/servicios/reciclaje-de-metales>
- Revista Líderes. (24 de 12 de 2012). *Tetra Pak y Ecuaplastic se unen para cuidar el ambiente. Obtenido de* [http://www.revistalideres.ec/mercados/Tetra\\_Pak-Ecuaplastic-cuidar-ambiente-estrategia\\_0\\_834516566.html](http://www.revistalideres.ec/mercados/Tetra_Pak-Ecuaplastic-cuidar-ambiente-estrategia_0_834516566.html)
- Sanchez, I. N. (2012). *CIVILGEEKS. Obtenido de* <http://civilgeeks.com/2014/02/10/asfalto-ecologico-fabricado-a-base-de-productos-reciclados/>.
- Tetrapak España. (2014). *Polietileno y aluminio. Obtenido de*  
<http://www.tetrapak.com/es/medio-ambiente/reciclado/polietileno-y-aluminio>
- the asphalt institute, m. d. (1974). *ASPHALT ABSORPTION. En t. a. institute, mix design methods for asphalt concrete and other hot mix - types (pág. 73 y 74). Maryland.*
- the asphalt institute, m. d. (1974). *BULK SPECIFIC GRAVITIES OF AGGREGATE. En t. a. institute, mix design methods for asphalt concrete and other hot - mix types (pág. 71). Maryland.*
- the asphalt institute, m. d. (1974). *EFFECTIVE ASPHALT CONTENT OF A PAVING MIXTURE. En t. a. institute, mix design methods for asphalt concrete and other hot - mix types (pág. 74). Maryland.*
- the asphalt institute, m. d. (1974). *EFFECTIVE SPECIFIC GRAVITY OF AGGREGATE. En t. a. institute, mix design methods for asphalt concrete (pág. 71). Maryland.*
- the asphalt institute, m. d. (1974). *GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE . En t. a. institute, mix design methods for asphalt concrete and other hot mix types (pág. 72). Maryland.*
- the asphalt institute, m. d. (1974). *MAXIMUM SPECIFIC GRAVITIES OF MIXTURES WITH DIFFERENT ASPHALT CONTENTS. En t. a. institute, mix design methods for asphalt concrete (pág. 73). Maryland.*
- the asphalt institute, m. d. (1974). *mix design methods for asphalt concrete. College Park, Maryland 20740.*

- the asphalt institute, m. d. (1974). TABLE III-1-STABILITY CORRELATION RATIOS. En t. a. institute, mix design methods for asphalt concrete and other hot mix types (pág. 28). Maryland.*
- Trinidad, J. (04 de Abril de 2011). Asfalto. Obtenido de <http://www.scribd.com/doc/52283919/asfalto>*
- UNICON. (2012). UNICON historias de exito. Obtenido de [www.unicon.com.pe](http://www.unicon.com.pe).*
- UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE. (03 de marzo de 2013). Control de calidad de agregados pétreos y agua. Obtenido de <http://es.slideshare.net/YdanQuirozAtenas/control-de-calidad-de-agregados-petres-y-agua>*
- Universidad Técnica Federico Santa María. (2013). Reutilización de envases de Tetra Pak para la construcción de Marquesinas. Gestores de Residuos.*
- Valera, F. (s.f.). Monografías.com. Obtenido de Monografías.com: <http://www.monografias.com/trabajos75/analisis-precios-unitarios/analisis-precios-unitarios.shtml>*
- VAXASOFTWARE. (s.f.). VAXASOFTWARE. Obtenido de [http://www.vaxasoftware.com/doc\\_edu/qui/denh2o.pdf](http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/denh2o.pdf)*
- Vistazo, E. (2014). El Negocio de la Basura. Vistazo.*
- VIVO EN ITALIA. (5 de enero de 2009). Reciclaje de llantas usadas: la nueva economía ecológica en México. Obtenido de <http://www.vivoenitalia.com/linea-de-reciclaje-de-llantas-usadas/>*
- VIVO EN ITALIA. (enero de 2009). VIVO EN ITALIA. Obtenido de <http://www.vivoenitalia.com/linea-de-reciclaje-de-llantas-usadas/>*
- WIKIPEDIA. (3 de Noviembre de 2013). WIKIPEDIA. Obtenido de [http://es.wikipedia.org/wiki/Limaduras\\_de\\_hierro](http://es.wikipedia.org/wiki/Limaduras_de_hierro)*
- WIKIPEDIA Metal. (16 de Junio de 2014). WIKIPEDIA. Obtenido de <http://es.wikipedia.org/wiki/Metales>*