

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.

Design of Hot Asphalt Mixtures Modified with Tetra Pak, wire tire out of use and metal filings recycled  
with sphalt binder AC-20

**Patricio Romero Flores** <sup>(1)</sup>, **Hugo Bonifaz García** <sup>(2)</sup>, **Freddy Cedeño** <sup>(3)</sup>, **Patricio Espín** <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Director del Proyecto de Grado

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-Ecuador, peromero@espe.edu.ec

<sup>(2)</sup> Codirector del Proyecto de Grado

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-Ecuador, hfbonifaz@espe.edu.ec

<sup>(3)</sup> Estudiante de Ingeniería Civil

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-Ecuador, freddyalejandrocenedo@hotmail.com

<sup>(4)</sup> Estudiante de Ingeniería Civil

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-Ecuador, patogol666@hotmail.com

## 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 clave:** Mezcla Asfáltica, Tetra Pak, Fibras Metálicas, Limadura Metálica, Ligante Asfáltico.

## ABSTRACT

The thesis project "DESIGN OF HOT ASPHALT MIXTURES MODIFIED WITH TETRA PAK, WIRE TIRE 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 have been used aggregates from the plant CONSTRUARENAS located in Palugo, Quito Ecuador, and cement or asphalt binder from the company's plant CHOVA of Ecuador located in Rumiñahui Cashapamba Ecuador.

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

## 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.

## 2. METODOLOGÍA

1. 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.
2. Establecer los ensayos de caracterización de los agregados (granulometría, equivalente de arena, abrasión, peso específico y porcentaje de absorción), aplicando las normas ASTM.
3. Determinar las propiedades físicas y mecánicas del ligante asfáltico mediante los ensayos de penetración, punto de ablandamiento y peso específico, empleando las normas ASTM.
4. Diseñar una mezcla asfáltica en caliente sin añadir materiales reciclados (modificadores), mediante el Método Marshall, adquiriendo el porcentaje óptimo de asfalto.

5. Diseñar mezclas asfálticas en caliente modificadas con tetra pak, alambre de neumáticos fuera de uso y limadura metálica reciclados con ligante asfáltico AC-20.
6. Determinar el porcentaje adecuado del material usado en la mezcla que resultase más efectiva a partir de la comparación de resultados obtenidos de los ensayos.
7. Realizar el ensayo de choque térmico en las mezclas asfálticas en caliente (mezcla tradicional y con modificadores) y establecer el respectivo análisis comparativo.
8. Analizar el costo de la mezcla asfáltica más eficiente y compararlo con el precio de una mezcla asfáltica tradicional polimerizada, demostrando así la diferencia monetaria frente a los productos usados actualmente.
9. Los ensayos aplicables para este proyecto de investigación de acuerdo a Normas para ensayos de laboratorio ASTM (American Society for Testing Materials) y Normas del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), son las siguientes:

Tabla 1. Normas ASTM utilizadas en el presente proyecto

ENSAYOS	Normas ASTM
<b>CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS</b>	
Muestreo de áridos	D 75
Reducción de muestras a tamaños de ensayo	C 702
Granulometría de agregados finos y gruesos	C 136-06
Gravedad específica y absorción para agregado grueso	C 127-12
Gravedad específica y absorción para agregado fino	C 128-12
Resistencia a la abrasión del árido grueso	C 131
Equivalente de arena	D 2419
<b>CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE ASFÁLTICO</b>	
Muestreo de ligante asfáltico	D140
Punto de ablandamiento del asfalto	D 95
Penetración	D 5
Peso específico	D 70
<b>ESPECÍMENES MARSHALL</b>	
Elaboración de especímenes	D 6926
Densidad Bulk	D 2726
Estabilidad y fluencia Marshall	D 6927
Gravedad específica teórica máxima	D 2041

## 3. 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). [1]

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 ¾ de pulgada, la mezcla será referida a un huso granulométrico de Mezcla Asfáltica Normal MAC 2 (NEVI-12 M. d., 2013). [2]

**Tabla No.2:** Husos Granulométricos MAC

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

En la Tabla No. 2 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 ¾ “ (19 mm.), la mezcla asfáltica es diseñada para un huso granulométrico MAC-2.

**Tabla No.3:** Husos Granulométricos MAC

ABERTURA DE TAMIZ	PESO RETENIDO	Especificación NEVI MAC-2		PASANTE MEZCLA	RET. ACUM. MEZCLA	PESO ACUM. MEZCLA		
		FN.	GR.					
Pulg.	mm.	gr.	gr.	>	<	%	%	gr.
3/4"	19.05	0.00	0.00	100	100	100.00	0.00	0.00
1/2"	12.7	0.00	117.67	100	80	87.34	12.66	117.67
3/8"	9.5	0.00	100.52	88	70	76.52	23.48	218.19
4	4.76	0.00	190.84	68	51	55.98	44.02	409.03
10	2	119.1	0.00	52	38	43.16	56.84	528.17
40	0.425	175.4	0.00	28	17	24.28	75.72	703.59
80	0.18	75.1	0.00	17	8	16.20	83.80	778.70
200	0.08	79.3	0.00	8	5	7.67	92.33	857.96
Pasante 200	<0.08	71.3	0.00	-	-	0.00	100.00	929.22
	Σ =	520.2	409.03					

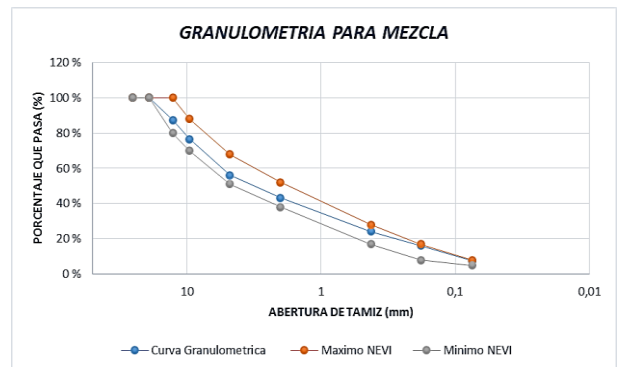
En los husos granulométricos del MAC existe un proceso iterativo para lo cual es necesario imponerse los porcentajes pasantes de mezcla que recaigan dentro de los límites propuestos por el NEVI-12, inicialmente se adopta un

peso de 930 gr (peso total de agregados en la mezcla) para cada briqueta. Después de varias repeticiones (tabla No.3), se obtuvo la estabilización granulométrica para diseño MAC-2.

**Tabla No.4:** Pesos y porcentajes iniciales para mezcla asfáltica.

	Grosos pasante ¾, 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%

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. 1).



**Fig. 1:** Granulometría definida para mezcla asfáltica.

#### 4. MÉTODO MARSHALL.

##### *Mezcla asfáltica en caliente – Método tradicional*

Una vez revisados los parámetros de estabilidad flujo en la tabla No.5, 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.

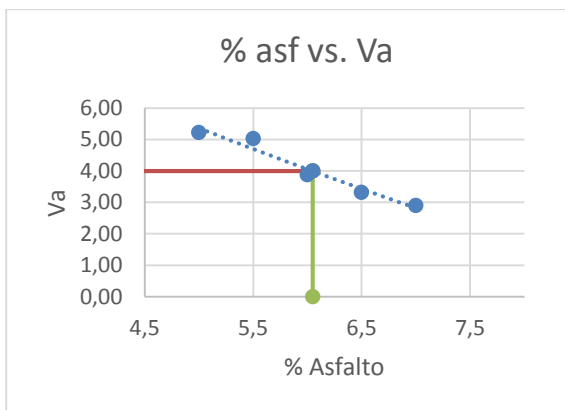
Estos valores que se mencionaron anteriormente deben estar entre el 3% y 5% razón por la cual se determina el contenido óptimo de asfalto en la mezcla necesario, además se determinan también los valores exactos de VAM, VAF, estabilidad, flujo, todos estos de acuerdo al porcentaje óptimo determinado inicialmente.

**Tabla No. 5:** Valores de estabilidad – flujo en mezcla asfáltica.

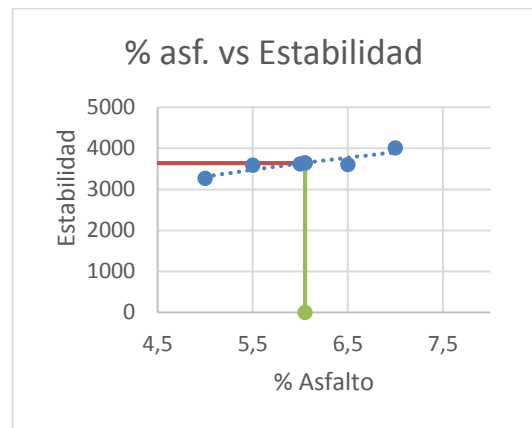
Briqueta	Porcentaje Asfalto (Pb)	Estabilidad.				Flujo 0.01"
		Medida	Medida	Factor de Corrección.	Corregida	
		Kgf	lbf	-	lbf	
1	5.00%	1270.4	2800.753	1.19	3332.896	9.00
2	5.00%	1269.2	2798.107	1.19	3329.747	9.00
3	5.00%	1197.3	2639.595	1.19	3141.118	10.00
<b>PROMEDIO</b>					<b>3267.920</b>	<b>9.33</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>

**Curvas Marshall para determinación de parámetros óptimos de porcentaje de asfalto – Mezcla tradicional.**

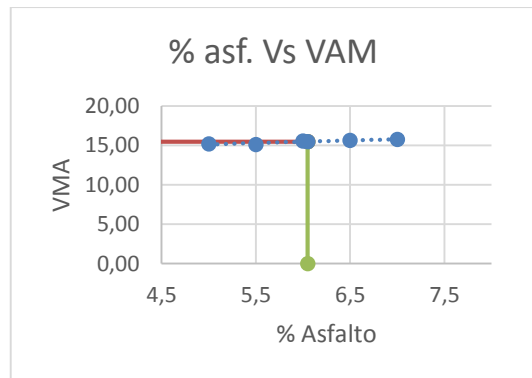
El valor determinado a un porcentaje de vacíos de aire presente en la mezcla del 4 %, es del 6.05 %, valor con el cual se determina los valores correspondientes a la estabilidad, vacíos del agregado mineral (VAM), flujo, y vacíos llenos de asfalto (VAF), de la mezcla de diseño final.



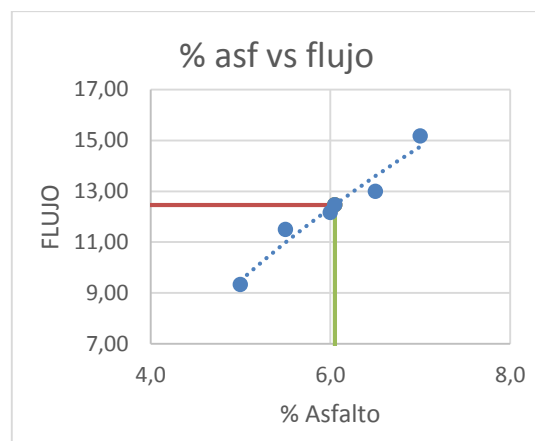
**Fig. 2:** Porcentaje de asfalto vs vacíos de aire.



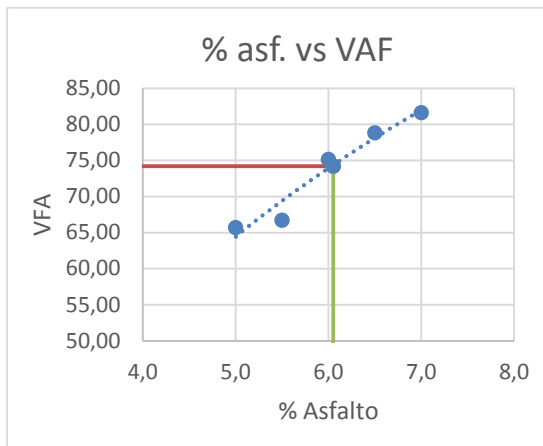
**Fig. 3:** Porcentaje de asfalto vs estabilidad.



**Fig. 4:** Porcentaje de asfalto vs vacíos de agregado mineral.



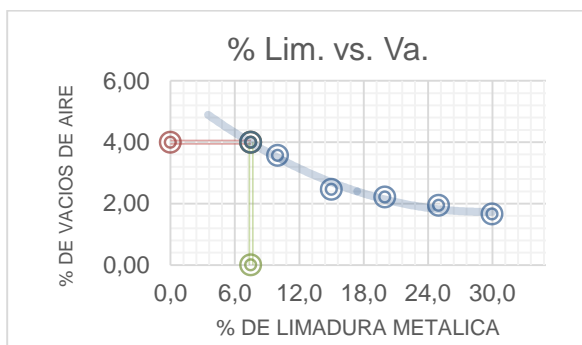
**Fig. 5:** Porcentaje de asfalto vs flujo.



**Fig. 6:** Porcentaje de asfalto vs vacíos llenos de asfalto.

**Mezcla asfáltica en caliente diseñada únicamente con limadura metálica.**

Se adiciona 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%.



**Fig. 7:** Porcentaje de fibras limadura metálica vs porcentaje de vacíos de aire.

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.

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.

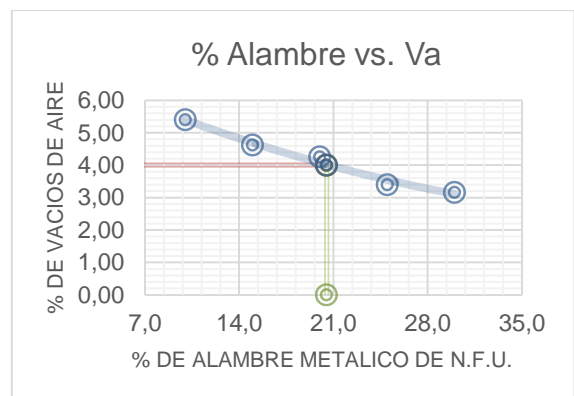
- Porcentaje de Limadura Metálica vs. Vacíos llenos de asfalto.

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. 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).

**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



**Fig. 8:** Porcentaje de alambre de neumático fuera de uso vs porcentaje de vacíos de aire.

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.

De igual manera se compara los resultados según los siguientes parámetros:

- Porcentaje de Alambre de NFU vs. Vacíos de aire.
- Porcentaje de Alambre de NFU vs. Estabilidad.

- Porcentaje de Alambre de NFU vs. Vacíos del agregado mineral.
- Porcentaje de Alambre de NFU vs. Flujo.
- Porcentaje de Alambre de NFU vs. Vacíos llenos de asfalto.

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.

El flujo de la mezcla asfáltica diseñada es de  $11.6 \times 10^{-3}$  y cumple con la normativa vigente en el NEVI-12 estando este dentro de los valores mínimos y máximos propuestos por la norma, así:  $8 \times 10^{-3} < 11.6 \times 10^{-3} < 14 \times 10^{-3}$ .

### Mezcla asfáltica en caliente modificada con 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.

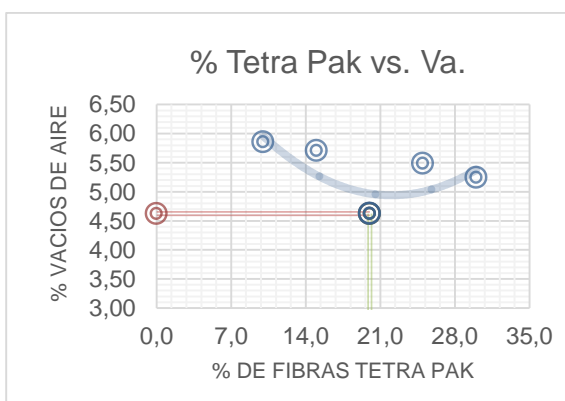


Fig. 6: Porcentaje de fibras tetra pak vs porcentaje de vacíos de aire.

El valor determinado a un porcentaje de vacíos de aire presente en la mezcla del 4 % 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. 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.

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.

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:  $14 \times 10^{-3} < 14.67 \times 10^{-3}$ .

### RESUMEN DE RESULTADOS

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.6: Resumen de resultados en mezclas asfálticas diseñadas.

MEZCLA	V. a. %	VMA %	VFA %	Estabilidad lbf.	Flujo 0.01"
Tradicional	4.0	15.5	74.2	3642	12.5
Limadura Metálica	4.0	16.0	75.0	3550	11.7
Alambre de N.F.U.	4.0	15.4	74.0	3890	11.6
Tetra pak	4.63	20.0	76.4	3071	14.7

Según los resultados expresados en la tabla No. 6, 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.

### 5. 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

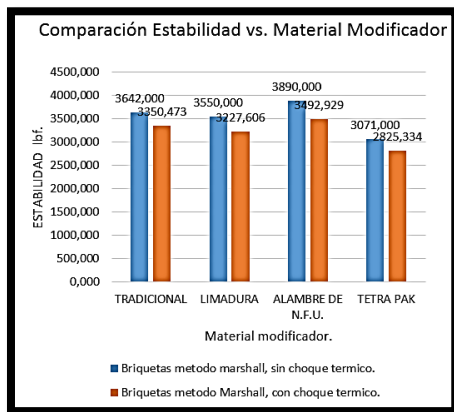
como referencia para la presente investigación en cuanto al precio que manejan para la venta de este producto, el cual es comparado de acuerdo a los valores obtenidos en los A.P.U. desarrollados en el capítulo 7 del proyecto de grado, cuyos resultados se exponen en la siguiente tabla:

**Tabla No.6:** Costo unitario de mezclas asfálticas.

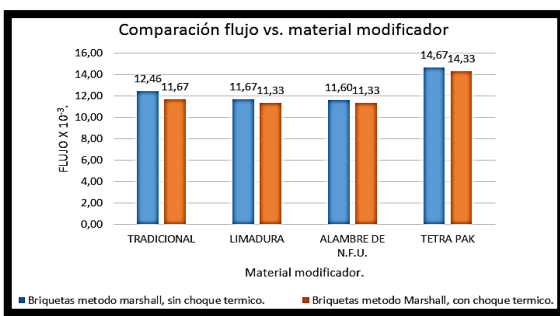
	Mezcla asfáltica tradicional (Ing. Juan Díaz)	Mezcla asfáltica tradicional	Mezcla asfáltica con limadura metálica	Mezcla asfáltica con fibra metálica de N.F.U.	Mezcla asfáltica con fibra tetra pak
Costo /m3	\$90.00	\$92.39	\$122.84	\$139.06	\$95.50

### 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE CHOQUE TERMICO (INNOVACIÓN).

En el ensayo de choque térmico se presentaron resultados inferiores en cuanto a los parámetros de las muestras diseñadas en esta investigación (estabilidad y flujo), a continuación se detallará el análisis de la estabilidad y flujo en mezclas asfálticas sometidas a choque térmico con respecto a las ensayadas a temperatura constante:



**Fig. 7:** Comparación de estabilidad vs. material reciclado modificador usado en la mezcla asfáltica.



**Fig. 8:** Comparación de flujo vs. material reciclado modificador usado en la mezcla asfáltica.

### 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

#### 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 que es de 2.23 no está dentro del rango de aceptación que se encuentra detallado en el capítulo 5, (Ensayo de caracterización de agregados) lo que suponía un material liviano, el cual elevó los valores sobre los rangos de aceptación definidos en el NEVI-12 en cuanto a sus valores de densidad (bulk, rice), % vacíos de aire. Esto se confirmó con la determinación de la gravedad específica aparente del agregado grueso de la misma mina el cual 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 cumplen con todas las especificaciones de las normas ASTM y NEVI-12 [3].
- En el rango de franja (huso) granulométrica a usarse de acuerdo al NEVI-12, se elaboró un proceso de estabilización granulométrica según se detalló en el capítulo VI (proyecto de grado) y con la granulometría estabilizada según norma el NEVI -12 para mezcla MAC-2, elaborar 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 diseñada en esta investigación produjo resultados de 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 en esta investigación produjo 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, y la mezcla elaborada con tetra pak diseñada en esta investigación produjo 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 de 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).
- Como se pudo observar en la tabla No. 6, 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. 7, lo cual indica una mezcla asfáltica más resistente a las sollicitaciones a las que sea sometida.
- 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, que es del  $11 \times 10^{-3}$  pulg., que el de la mezcla Marshall tradicional que es del  $12.5 \times 10^{-3}$  pulg.
- 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 presente en estas muestras sometidas a choque térmico no se encuentran fuera de los límites normativos (NEVI-12), por ende no se ven afectados por los efectos de intemperismo presentes en las vías y cumplirán de manera eficiente con el soporte de las sobrecargas actuantes.

#### **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 proyecto en una longitud de aproximadamente % 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.

- En cuanto 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 respectiva disminución de la estabilidad de 92 lbf, con respecto al valor de estabilidad de la mezcla Marshall tradicional, ya que la 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.

- 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).

## **8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

[1] NEVI-12 405-5.02.3. (s.f de s.f de 2013). Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Obtenido de Ministerio de Transporte y Obras Públicas: [http://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/12/01-12-2013\\_Manual\\_NEVI-12\\_VOLUMEN\\_3.pdf](http://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/12/01-12-2013_Manual_NEVI-12_VOLUMEN_3.pdf)

[2] NEVI-12 405-5.04. (s.f de s.f de 2013). Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Obtenido de Ministerio de Transporte y Obras Públicas: [http://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/12/01-12-2013\\_Manual\\_NEVI-12\\_VOLUMEN\\_3.pdf](http://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/12/01-12-2013_Manual_NEVI-12_VOLUMEN_3.pdf)