

c) Toma de datos.

Tabla N°61. Toma de datos Carga de las Partículas de Emulsión asfáltica.

		UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO			
		FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA			
		ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL			
TESIS:					
“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019”.					
Ensayo: Carga de las partículas emulsión asfáltica.					
Fecha: 19/12/2018		Norma técnica: MTC E-407			
Tipo de asfalto: Emulsión CSS-1h		Provincia: Cusco		Distrito: Wánchaq	
N° de Muestra	AMPERAJE INICIO (miliamperios)	AMPERAJE FINAL (miliamperios)	TIEMPO (minutos)	ELECTRODO NEGATIVO (CÁTODO)	ELECTRODO POSITIVO (ÁNODO)
1	8 mA	2 mA	30 min	Si hay recubrimiento	No hay recubrimiento
2	8 mA	2 mA	30 min	Si hay recubrimiento	No hay recubrimiento
3	8 mA	2 mA	30 min	Si hay recubrimiento	No hay recubrimiento
4	8 mA	2 mA	30 min	Si hay recubrimiento	No hay recubrimiento
5	8 mA	2 mA	30 min	Si hay recubrimiento	No hay recubrimiento
Observaciones: _____					
_____		_____		_____	
Tesisistas		Jefe Laboratorio		Asesor Tesis	

Fuente: Elaboración propia.



3.5.14. Recolección de datos, Recubrimiento y adherencia manual americano MS-19.

a) Equipos utilizados en la prueba.

Equipo:

- Estufa eléctrica.
- Horno de secado 110°C +/- 5°C

Herramientas:

- Vaso de precipitado de 500 a 600ml.
- Recipientes metálicos o bandejas.

Adicional:

- Agua desionizada y/o destilada.

b) Procedimiento.

Procedimiento para recubrimiento.

- Determine el contenido de humedad para una muestra representativa del agregado, debe tenerse cuidado en conservar la humedad de la muestra de campo, si el agregado está seco o se ha secado, se debe agregar agua (% humedad) a la muestra de agregado o de los agregados individuales combinados, 24 horas antes de realizar el ensayo.
- Pese el equivalente de 500 gramos de agregado seco (500 gramos + humedad) en un recipiente.
- De ser necesario pese el agua de premezclado y mezcle durante 10 segundos o hasta que tenga apariencia de dispersión uniforme.
- Pese el contenido de emulsión asfáltica, a la temperatura de uso prevista y agréguelo al agregado húmedo, mezcle manualmente en forma vigorosa durante 60 segundos o hasta que dé lugar una dispersión suficiente en la totalidad de la mezcla.
- Coloque la mezcla sobre una superficie plana y estime visualmente el grado de recubrimiento.
- Si se desea puede evaluarse la resistencia de una fracción de la mezcla fresca, sumerja totalmente la mezcla en agua (un volumen dos veces el volumen de mezcla) y luego vacíe el agua colocando la muestra sobre una superficie plana y estimando visualmente el grado de recubrimiento retenido. Si es satisfactorio verifique la adherencia del asfalto, si el

recubrimiento No es aceptable, entonces debería modificarse la emulsión empleada o elegirse otro grado.

Procedimiento adherencia.

- Cure una fracción de 100 gramos de la mezcla producida anteriormente (no la fracción sumergida en agua) lleve la mezcla al horno de secado por 24 horas a 60°C.
- Coloque la mezcla curada en un vaso precipitado de 600ml conteniendo 400ml de agua destilada, lleve el agua a su punto de ebullición y manténgalo, agite el agua a una revolución por segundo durante 3 minutos.
- Saque el agua y coloque la mezcla sobre un trozo de papel blanco absorbente.
- Luego de que la mezcla se ha secado (secado al aire), evalúe visualmente el porcentaje de recubrimiento asfáltico retenido, de ser satisfactorio continúe el diseño de la mezcla, de no ser aceptable la emulsión deberá ser cambiada.



Figura 44. Se muestra el cubrimiento y adherencia de los agregados gruesos, así como el equipo y materiales utilizados, (Fuente: Elaboración propia).

c) Toma de datos.

Tabla N°62. Toma de datos Recubrimiento y Adherencia de Emulsión asfáltica.

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL					
TESIS: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019”.						
Ensayo: <u>Recubrimiento y adherencia de emulsión asfáltica</u>						
Fecha: <u>15/11/2018</u>	Norma técnica: <u>Manual MS-19</u>					
Tipo de asfalto: <u>Emulsión CSS-1h</u>	Provincia: <u>Cusco</u>	Distrito: <u>S. Jerónimo</u>				
N° de muestra	Peso agregado + humedad	Grado de recubrimiento aceptable	Grado de recubrimiento inaceptable	Peso mezcla curada 24 horas	Grado de adherencia aceptable	Grado de adherencia inaceptable
1	502.1 g	aceptable				
2	508.3 g	aceptable				
3	510.5 g		Inaceptable			
4				105.6 g	aceptable	
5				109.4 g	aceptable	
Observaciones: _____ _____						
Tesistas		Jefe Laboratorio		Asesor Tesis		

Fuente: Elaboración propia.



3.5.15. Recolección de datos, Viscosidad Saybolt Furol de emulsiones asfálticas, norma MTC E-403.

a) Equipos utilizados en la prueba.

Equipo:

- Viscosímetro del tipo Saybolt Furol, similar al utilizado para ensayos de viscosidad Saybolt.
- Baño María, a temperatura de 25°C.

Herramientas:

- Tamiz N° 20.
- Termómetro, para pruebas a 25°C y ASTM N° 19C para pruebas a 50°C.
- Cronómetro: Graduado en decimos de un segundo, y exacto hasta dentro del 0,1% cuando es probado sobre un intervalo de 60 minutos.

Adicional:

- Muestra de emulsión asfáltica.

b) Procedimiento.

Ensayo a 25 ° C.

- Agite bien la muestra para que no se formen burbujas y viértala en un frasco de 100 mililitros, el cual se coloca en baño maría a 25 ° C \pm 0,1 ° C durante 30 min, mezclando al final la muestra, para lo cual se invierte el frasco varias veces, pero lentamente para evitar que se forme espuma.
- Vierta la mezcla en el viscosímetro a través del tamiz N° 20, permitiendo que una pequeña porción fluya por el tubo de salida para desecharse.
- Coloque el tapón, el cual debe estar unido a un cordel que facilite su remoción, en la cámara de aire del viscosímetro; se vierte la muestra a través del tamiz N° 20 directamente en el tubo del viscosímetro hasta que sobrepase el borde de rebose del tubo.
- Se agita la muestra con un termómetro de viscosidad equipado con soporte, mediante un movimiento circular de 30 a 50 rpm en el plano horizontal, hasta que la temperatura de la



emulsión alcance la del ensayo y permanezca durante un minuto dentro de $\pm 0,05$ °C de la misma.

- Se saca el termómetro de la muestra, se retira la emulsión utilizando la pipeta extractora, hasta que quede por debajo del borde de rebose, teniendo mucho cuidado y que la punta de la pipeta no lo toque.
- Se coloca el frasco receptor de tal manera que la emulsión que cae del viscosímetro golpee el cuello del mismo.
- Se retira rápidamente el tapón del fondo del viscosímetro y en el mismo instante se pone en funcionamiento el cronómetro, el cual se detiene en el momento en que el fondo del menisco alcance la marca de graduación del frasco receptor, anotándose la lectura del cronómetro.

Ensayo a 50 ° C.

- Se agita bien la muestra sin incorporar burbujas, se echan unos 100 mililitros en un vaso de 400 mililitros. El vaso con la emulsión se sumerge en baño maría, de manera que el fondo quede a 50 mm de la superficie y se mantiene en posición vertical. La temperatura del baño debe ser de 71.3 ° C.
- Con objeto de tener una distribución uniforme de la temperatura, se agita la emulsión con el termómetro del viscosímetro mediante un movimiento circular de 60 vueltas por minuto (el termómetro deberá ir tocando las paredes y el fondo del vaso), con cuidado para no producir burbujas.
- La emulsión que se va a ensayar se calienta, dentro del baño maría, mantenido la temperatura a $71 \pm 2,5$ ° C, hasta que alcance $51,5 \pm 0,3$ ° C.
- Se coloca el tapón de la forma indicada anteriormente, una vez que la emulsión alcance la temperatura indicada, se vierte inmediatamente a través del tamiz N° 20, en el tubo del viscosímetro, hasta que rebose en el interior del aparato.
- Se sigue agitando la emulsión con el termómetro, a las mismas revoluciones hasta alcanzar la temperatura del ensayo. Se tendrá cuidado de no producir burbujas durante la agitación. La temperatura del baño se regula para lograr que la emulsión se mantenga, por lo menos durante 1 minuto, a $50 \pm 0,05$ ° C.
- Se saca el termómetro y se determina la viscosidad de la forma antes indicada del otro ensayo.

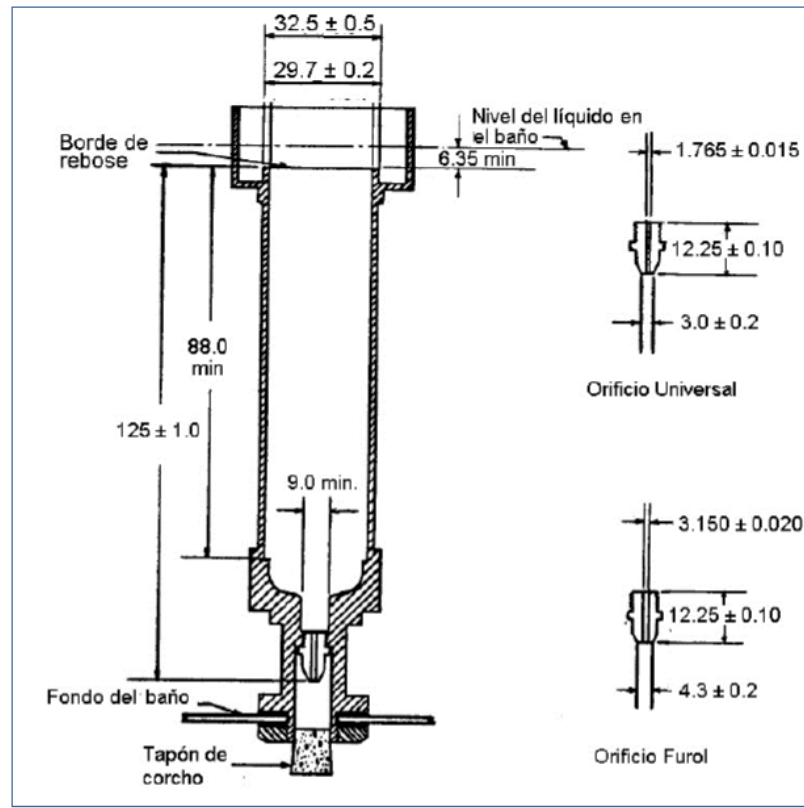


Figura 45. Viscosímetro Saybolt con orificio universal y Furol, (Fuente: Manual de ensayo de materiales EM 2000, edición 2016, pág. 511).



Figura 46. Izquierda equipo de ensayo Viscosímetro Saybolt Furol; Derecha, salida del viscosímetro llenando el picnómetro de 60 ml. Se controla el tiempo de aforo

c) Toma de datos.

Tabla N°63. Toma de datos Viscosidad de saybolt furol para Emulsión asfáltica.

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL						
TESIS: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019”.						
Ensayo: Viscosidad Saybolt Furol						
Fecha: 18/07/2019		Norma técnica: MTC E-403				
Tipo de asfalto: Emulsión CSS-1h		Provincia: Lima		Distrito: Rímac		
N° muestra	Tipo de asfalto	Peso (g)	Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Volumen (cm3)	Viscosidad (SSU)
1	CSS-1h	57	25	110	60	15.8
2	CSS-1h	57	25	110	60	15.8
3	CSS-1h	57	25	110	60	15.8
4	CSS-1h	57	25	110	60	15.8
5	CSS-1h	57	25	110	60	15.8
6	CSS-1h	57	25	110	60	15.8
7	CSS-1h	57	25	110	60	15.8
Observaciones: _____						
_____		_____		_____		
Tesistas		Jefe Laboratorio		Asesor Tesis		

Fuente: Elaboración propia.



3.5.16. Recolección de datos, Destilación de emulsiones asfálticas, Norma MTC E-401.

a) Equipos utilizados en la prueba.

Equipo:

- Aparato de destilación compuesto por; Una retorta cilíndrica de aluminio, de aproximadamente 240 mm de altura y 95 mm de diámetro interior, provista de un mechero anular con orificios en su superficie interior, las superficies de contacto entre la retorta y su tapa deben tener un acabado que proporcione un cierre lo más hermético posible.
- Aparato de conexión; es un tubo de conexión de metal o de vidrio, de la forma y dimensiones indicadas en la **Figura 47**, sirve de conexión entre el condensador y la retorta.
- Condensador; elemento refrigerante recto, con camisa metálica.
- Probeta de 100 mililitros de capacidad con intervalos de graduación.
- Protector de zinc para cubrir el tubo de desprendimiento.
- Tampones; Corcho envuelto en papel de aluminio para sellar los agujeros de la cubierta de la destiladora, mantiene el dispositivo del medidor de temperatura en posición, y asegura el tubo de conexión a la cubierta de la destiladora.
- Balanza de precisión de $\pm 0,1$ gramos.

Herramientas:

- Tamiz N° 50.
- Termómetro.

Adicional:

- Muestra de emulsión asfáltica.

b) Procedimiento.

- Se instala el aparato conforme se indica en la **Figura 47**, teniendo cuidado que las conexiones queden bien ajustadas.
- Se pesa $200 \pm 0,1$ gramos de la emulsión, en el tarado se incluyen la retorta, la tapa, la abrazadera, los termómetros y la junta de papel impregnada.
- Una junta de papel impregnada en aceite mineral puede emplearse entre la retorta y su tapa, la tapa se aprieta firmemente sobre la retorta.

- Los termómetros se acoplan en los orificios más pequeños de la tapa por medio de tapones perforados, de manera que la parte inferior del bulbo de uno de ellos quede a una distancia de 6,0 mm del fondo de la retorta.
- Se coloca el mechero anular alrededor de la retorta, aproximadamente a 150 mm de su fondo, se enciende este mechero y se ajusta de manera que se obtenga una llama pequeña. También se calienta el tubo de conexión por medio de un mechero Bunsen, para evitar que el agua se condense en él.
- Cuando pueda leerse la temperatura en el termómetro más bajo, aproximadamente a 215°C, se baja el mechero anular hasta una posición a nivel del fondo de la retorta. Se sube la temperatura hasta $260 \pm 5 \text{ } ^\circ\text{C}$, se mantiene ésta durante 15 minutos. La destilación se llevará a cabo en un tiempo de 60 ± 15 minutos desde el comienzo de la aplicación de calor.
- Se quita la tapa de la retorta, se agita el residuo e inmediatamente verter las porciones adecuadas del residuo dentro de un recipiente o dentro de los moldes adecuados para realizar cualquier prueba requerida, dejando enfriar el residuo en éstos, sin cubrirlos, a la temperatura ambiente.

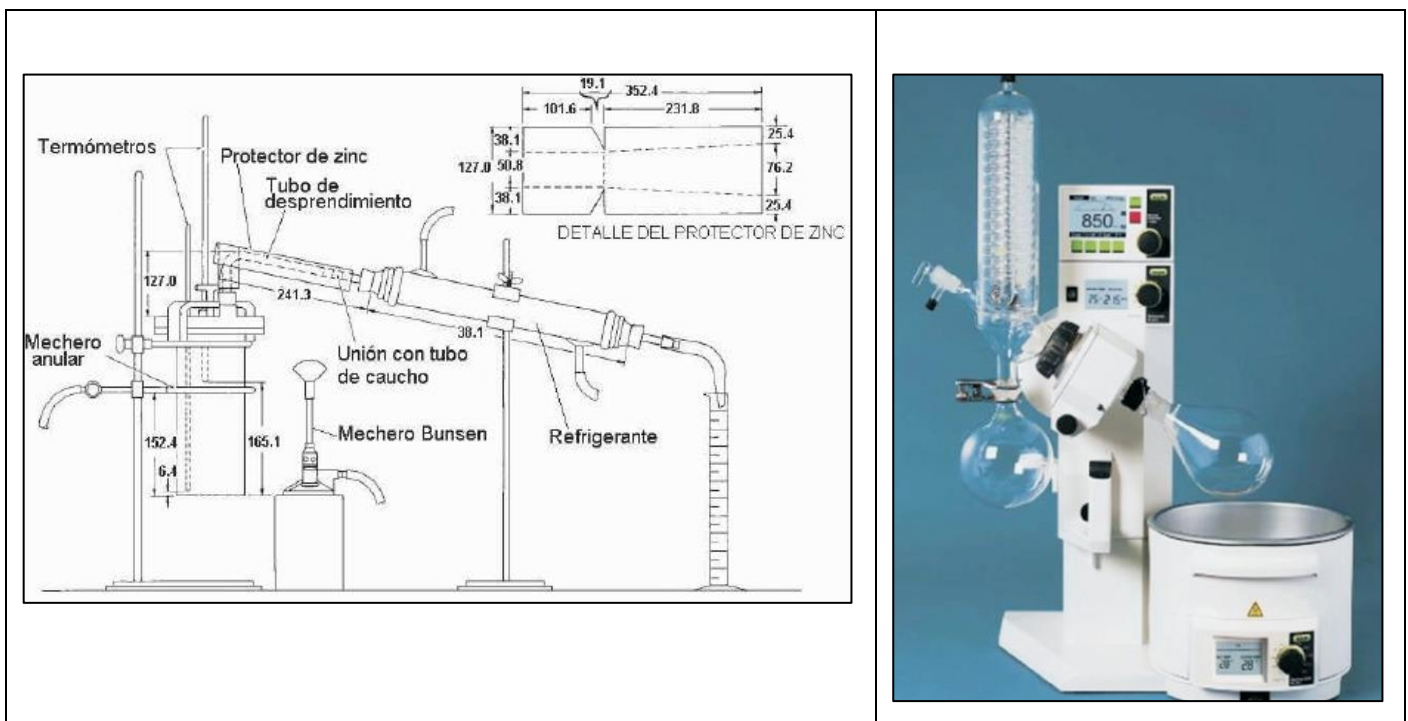


Figura 47. Izquierda, Aparato para destilación de emulsiones asfálticas, Derecha, Equipo Rotavapor también para destilación de asfalto y otros fluidos, (Fuente: Manual de ensayo de materiales EM 2000, edición 2016, pág. 503).

c) Toma de datos.

Tabla N°64. Toma de datos Porcentaje de residuo de asfalto por destilación.

					
UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL					
TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MÉCANICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".					
Ensayo: % de residuo de asfalto por destilación					
Fecha: 18/07/2019		Norma técnica: MTC E-403			
Tipo de asfalto: Emulsión CSS-1h		Provincia: Lima		Distrito: Rímac	
N° muestra	Tipo de asfalto	Peso retorta + accesorios	Peso retorta + accesorios + emulsión	Peso retorta + accesorios + residuo	% residuo por destilación
1	CSS-1h	500.00 g	560.50 g	532.50 g	56.198 %
2	CSS-1h	500.00 g	560.50 g	532.50 g	56.198 %
3	CSS-1h	500.00 g	560.50 g	532.50 g	56.198 %
4	CSS-1h	500.00 g	560.50 g	532.50 g	56.198 %
5	CSS-1h	500.00 g	560.50 g	532.50 g	56.198 %
Observaciones: _____					
_____		_____		_____	
Tesisistas		Jefe Laboratorio		Asesor Tesis	

Fuente: Elaboración propia.



3.5.17. Recolección de datos, Peso específico aparente y peso unitario de mezclas asfálticas compactadas saturadas con superficie seca, Norma MTC E-514.

a) Equipos utilizados en la prueba.

Equipo:

- Balanza de flotabilidad, precisión 0.1 gramos.
- Baño María, a temperatura de 25°C.

Herramientas:

- Vernier.
- Termómetro, para pruebas a 25°C.
- Recipientes, bandejas, franela.

Adicional:

- Canastilla de flotabilidad.

b) Procedimiento.

- Primeramente se mide el diámetro y la altura de cada espécimen, para nuestro caso se tienen 3 especímenes por porcentaje, se tiene 5 porcentajes de emulsión asfáltica proyectados, por tanto son 15 especímenes solo para el diseño patrón, con se tiene 3 porcentajes de reciclado, se tiene un total de 60 especímenes a ensayar.
- Luego de medir los especímenes se pesan cada uno en seco, se registran los pesos (peso A), para después sumergirlos en baño maría a 25 °C, por un espacio de 5 minutos.
- Transcurrido el tiempo de 5 minutos se extrae uno por uno de baño maría y se lleva a pesar a la balanza de flotabilidad, previamente se coloca la canastilla y se tara la balanza con la canastilla para obviar el peso de la misma.
- Se registran los pesos de cada espécimen sumergidos (peso C), la temperatura del estanque de inmersión debe ser también de 25 °C +/- 2 °C.
- Luego cada espécimen es secado superficialmente con la ayuda de una franela, una vez secos se vuelven a pesar (peso B).
- Con los peso A, B, C, se realizan los cálculos y se determina la densidad aparente y el peso unitario o densidad de las briquetas.



Figura 48. Se observa las briquetas sumergidas en baño maría, la inmersión en la balanza de flotabilidad, el secado superficial y el grupo de briquetas ensayadas en este caso las de contenido de agregado reciclado al 25%, (Fuente: Elaboración propia).

c) Toma de datos.

Tabla 65. Toma de datos peso específico aparente y peso unitario de mezclas asfálticas.

		UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL			
TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MÉCANICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".					
Peso específico aparente(bulk) y peso unitario de mezclas asfálticas compactadas empleando especímenes de					
Ensayo: superficie seca					
Fecha: 25/03/19		Norma técnica:		MTC E-514	
Emulsión: CSS-1h		Provincia: Cusco		Distrito: San Jerónimo	
Mezcla reciclada 25% a 4.75% de emulsión asfáltica					
N° de muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso seco en gramos (A)	Peso sumergido en agua a 25°C en gramos (C)	Peso superficialmente seco SSS en gramos (B)
A1	10.32	7.09	1252.20 g	678.00 g	1253.00 g
A2	10.33	7.13	1259.00 g	686.60 g	1259.70 g
A3	10.27	7.09	1258.90 g	680.00 g	1260.40 g
Mezcla reciclada 25% a 5.25% de emulsión asfáltica					
N° de Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso seco en gramos (A)	Peso sumergido en agua a 25°C en gramos (C)	Peso superficialmente seco SSS en gramos (B)
A4	10.34	7.03	1270.30 g	694.30 g	1272.10 g
A5	10.33	7.00	1267.20 g	693.10 g	1269.20 g
A6	10.16	7.06	1212.80 g	654.30 g	1214.20 g
Mezcla reciclada 25% a 5.75% de emulsión asfáltica					
N° de Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso seco en gramos (A)	Peso sumergido en agua a 25°C en gramos (C)	Peso superficialmente seco SSS en gramos (B)
A7	10.33	7.15	1268.90 g	693.90 g	1272.20 g
A8	10.31	7.14	1276.10 g	700.50 g	1278.50 g
A9	10.27	7.12	1280.50 g	701.20 g	1282.70 g
Mezcla reciclada 25% a 6.25% de emulsión asfáltica					
N° de Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso seco en gramos (A)	Peso sumergido en agua a 25°C en gramos (C)	Peso superficialmente seco SSS en gramos (B)
A10	10.33	7.19	1274.60 g	689.90 g	1277.90 g
A11	10.32	7.20	1267.00 g	689.40 g	1272.60 g
A12	10.20	7.18	1286.70 g	699.00 g	1289.10 g
Mezcla patrón 6.75% de emulsión asfáltica					
N° de Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso seco en gramos (A)	Peso sumergido en agua a 25°C en gramos (C)	Peso superficialmente seco SSS en gramos (B)
A13	10.34	7.17	1280.70 g	693.50 g	1284.10 g
A14	10.28	7.26	1277.70 g	683.40 g	1279.80 g
A15	10.19	7.41	1291.80 g	700.30 g	1294.40 g

Fuente: Elaboración propia.



3.5.18. Recolección de datos, Peso específico teórico máxima de mezclas asfálticas, Norma MTC E-508.

a) Equipos utilizados en la prueba.

Equipo:

- Bomba de vacío, con capacidad de evacuación de aire de hasta una presión de 4 kpa.
- Baño María, a temperatura de 25°C.
- Equipo Desionizador de agua.

Herramientas:

- Matraz con capacidad de 1000 ml.
- Platos de transferencia de metal, descartables.
- Bandejas y recipientes de mezcla, espálala, brocha.

Adicional:

- Agua desionizada y/o destilada.

b) Procedimiento.



- Se separa las partículas de la muestra de tal manera que las de la porción fina del agregado no sean mayores de 6,3 mm. Se pesa este es el peso A.
- Pese el picnómetro vacío y lleno de agua a 25 °C, agréguese agua suficiente aproximadamente a 25 °C para cubrir la muestra.
- Se remueve el aire atrapado llevando a un vacío parcial de 30 mm de Hg 4 kPa de presión absoluta, durante un tiempo de 5 a 15 minutos, se agita el recipiente ya sea mediante un dispositivo mecánico o manualmente de forma vigorosa, alrededor de dos minutos. El vacío puede aplicarse y disminuirse gradualmente empleando la válvula de control.
- Inmediatamente después de la remoción del aire atrapado (numeral 6.2.1), procédase a una de las siguientes determinaciones:
- Peso en agua. Suspéndase el recipiente que se esté utilizando con su contenido, sea la cubeta (Tipo A) o el frasco (Tipo B), dentro del baño de agua y determínese su peso después de una inmersión de 10 ± 1 minuto. Mídase la temperatura del baño y si fuere diferente de 25 ± 1 ° C, corríjase el peso a 25 ° C empleando el ajuste por temperatura de calibración desarrollado, désígnese el peso neto de la muestra en el agua a 25° C como C.
- Terminado el tiempo de 10 minutos completar el aforo de agua y pesar, este peso es E.



Figura 49. Muestras preparadas de mezclas asfálticas patrón, agregados reciclados al 25%, 33.33%, 50%; ensayo de peso específico máximo con bomba de vacío, (Fuente: Elaboración propia).

c) Toma de datos.

Tabla 66. Toma de datos peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas.

		UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL				
TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MÉCANICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".						
Ensayo: <u>Peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas</u>						
Fecha: <u>22/04/19</u>		Norma técnica: <u>MTC E-508</u>				
Tipo de asfalto: <u>Emulsión CSS-1h</u>		Provincia: <u>Cusco</u>		Distrito: <u>San Jerónimo</u>		
% emulsión asfáltica	Peso muestra seca (Wmuestra) (g.)	Peso picnómetro seco y vacío (Wpicnómetro) (g.)	Peso picnómetro + muestra (Wpicnómetro + muestra) (g.)	Peso picnómetro lleno de agua a 25°C (Wpicnómetro + agua) (g.)	Peso picnómetro + muestra + agua a 25°C (Wdespués del ensayo) (g.)	Peso específico máximo de la muestra (Gmm)
Mezcla patrón						
4.75	914.20	273.40	1187.60	1140.80	1680.00	2.438
5.25	917.80	273.40	1191.20	1140.80	1676.20	2.400
5.75	928.90	273.40	1202.30	1140.80	1670.60	2.327
6.25	937.80	273.40	1211.20	1140.80	1671.10	2.301
6.75	928.80	273.40	1202.20	1140.80	1669.20	2.320
Mezcla reciclada 25%						
4.75	924.00	273.40	1197.40	1140.80	1681.70	2.412
5.25	924.50	273.40	1197.90	1140.80	1675.30	2.371
5.75	924.90	273.40	1198.30	1140.80	1671.40	2.346
6.25	938.70	273.40	1212.10	1140.80	1672.70	2.308
6.75	935.40	273.40	1208.80	1140.80	1670.50	2.306
Mezcla reciclada 33.33%						
4.75	932.90	273.40	1206.30	1140.80	1680.00	2.370
5.25	940.90	273.40	1214.30	1140.80	1686.30	2.380
5.75	936.20	273.40	1209.60	1140.80	1682.60	2.374
6.25	960.60	273.40	1234.00	1140.80	1681.50	2.288
6.75	946.70	273.40	1220.10	1140.80	1681.40	2.331
Mezcla reciclada 50%						
4.75	904.40	273.40	1177.80	1140.80	1670.50	2.414
5.25	910.10	273.40	1183.50	1140.80	1664.90	2.358
5.75	906.90	273.40	1180.30	1140.80	1662.90	2.357
6.25	922.40	273.40	1195.80	1140.80	1665.00	2.316
6.75	915.90	273.40	1189.30	1140.80	1654.50	2.277

Fuente: Elaboración propia.



3.5.19. Recolección de datos, Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas densas, Norma E-505.

a) Equipos utilizados en la prueba.

Equipo:

- Fórmulas que relacionan el peso específico aparente y peso específico teórico máximo para la determinación del porcentaje de vacíos.

b) Procedimiento.

- Para determinar el porcentaje de vacíos de una mezcla asfáltica densa que es el que se evalúa en la presente investigación, previamente se debe de determinar el Peso específico aparente o bulk de las briquetas compactadas, todo el procedimiento se indica en la norma MTC E-514.
- Luego se determina los pesos específicos teóricos máximos para cada diseño en porcentaje de agregado reciclado y porcentaje de emulsión asfáltica, para el presente se evalúan 20 muestras, todo el procedimiento se indica en la norma MTC E-508, previamente desarrollado.
- Cabe indicar que previo al ensayo de peso específico teórico, las muestras deben de curar al aire por lo menos 7 días, tiempo estimado de rotura de la emulsión asfáltica.
- Según el manual MS-19 el porcentaje de vacíos en emulsiones asfálticas está comprendido entre 4% y 6%.
- Teniendo estos dos ensayos desarrollados se establece la ecuación de relación para la determinación del porcentaje de vacíos el cual es la siguiente.

$$\% \text{ vacíos de aire} = 100 \times (1 - (\text{peso específico aparente} / \text{peso específico teórico máximo}))$$



Figura 50. Se observa los elementos para determinar el % de vacíos, Ensayo de Peso Específico aparente con briquetas sumergidas y los de Peso Específico máximo en platos descartables.

c) Toma de datos.

Tabla 67. Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas densas.

		UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL			
TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MÉCANICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".					
Ensayo: <u>Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas.</u>					
Fecha: <u>12/04/2019</u>		Norma técnica: <u>MTC E-505</u>			
Tipo de asfalto: <u>Emulsión CSS-1h</u>		Provincia: <u>Cusco</u>		Distrito: <u>S. Jerónimo</u>	
% emulsión asfáltica	Peso específico máximo de la muestra (Gmm)	Peso específico aparente (Bulk)	Vacíos de aire mezcla compactada (Pa) %		
Mezcla patrón					
4.75	2.401	2.245	6.493		
5.25	2.364	2.283	3.433		
5.75	2.293	2.170	5.366		
6.25	2.267	2.180	3.822		
6.75	2.285	2.151	5.872		
Mezcla reciclada 25%					
4.75	2.364	2.179	7.821		
5.25	2.323	2.186	5.916		
5.75	2.299	2.199	4.343		
6.25	2.261	2.171	3.989		
6.75	2.260	2.159	4.433		
Mezcla reciclada 33.33%					
4.75	2.353	2.220	5.652		
5.25	2.363	2.218	6.133		
5.75	2.357	2.204	6.499		
6.25	2.272	2.210	2.715		
6.75	2.315	2.191	5.363		
Mezcla reciclada 50%					
4.75	2.414	2.228	7.699		
5.25	2.358	2.228	5.510		
5.75	2.357	2.223	5.698		
6.25	2.316	2.213	4.458		
6.75	2.277	2.192	3.761		

Fuente: Elaboración propia.



3.5.20. Recolección de datos, Resistencia a la compresión de mezclas bituminosas compactadas, Norma MTC E-518.

a) Equipos utilizados en la prueba.

Equipo:

- Prensa de compresión de velocidad 0.05mm/mm o 0.05 pulgadas/mim. pulgadas.
- Baño María, a temperatura de 25°C y 60°C.
- Horno de secado temperatura 135 +/- 5°C.
- Balanza de precisión 0.1 gramos de sensibilidad.
- Compactador de briquetas Marshall.
- Eyector de Briquetas de mezclas asfálticas compactadas.

Herramientas:

- Recipientes para traslado de briquetas.
- Termómetro de laboratorio.
- Moldes Marshall de 4" de diámetro x 4" de altura, collarín y base.
- Varilla lisa de acero de 5/8".
- Bandejas y recipientes de mezcla, espátula, brocha, guantes de cuero y quirúrgicos.
- Vernier y cinta métrica.

Adicional:

- Agua desionizada y/o destilada.

b) Procedimiento.

Se elaboró 24 briquetas de prueba, para lo cual previamente se preparó la mezcla de agregados, emulsión asfáltica y agua, la dosificación es para una briqueta de aproximadamente 1800 gramos (de acuerdo al diseño de mezcla pre-establecida). El cual se llena en el molde en tres parte que se van apisonando con la varilla de 5/8" en forma circular 25 veces, luego es llevado al equipo de compactación Marshall aplicando 50 golpes en cada cara, se deja curar al aire libre en el molde por 24 horas.

Se procede a extraer la briqueta en el equipo eyector, todo esto se realizó para cada briqueta de ensayo; cabe indicar que todo lo indicado se realizó a temperatura ambiente.

Una vez elaboradas las briquetas y curadas al aire por 7 días, se las clasifica en dos grupos de tres briquetas cada una de tal forma que el peso específico de las briquetas del grupo 1 sea el mismo que el grupo 2, se realiza el ensayo de la siguiente forma:

Grupo 1.- Se llevó las briquetas de prueba a la temperatura de ensayo $25 \pm 1^\circ\text{C}$ a un baño de aire en el horno de calentamiento, manteniendo a la temperatura de ensayo por 4 horas. Se mide la resistencia a compresión en seco llevando cada briqueta al equipo de compresión axial y se someta a la carga a la velocidad de compresión establecida, se toma la medida de la fuerza máxima cuando falla la briqueta.

Grupo 2.- Se sumergió las briquetas de prueba en agua por un tiempo de 24 horas a $60 \pm 1^\circ\text{C}$, luego se llevan a un segundo baño de agua a una temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$ por un tiempo de 2 horas. Se mide la resistencia a compresión llevando cada briqueta al equipo de compresión axial y se someta a la carga a la velocidad de compresión establecida, se toma la medida de la fuerza máxima cuando falla la briqueta.



Figura 51. Extracción de briquetas en el eyector muestras compactadas, sometimiento de briqueta a carga por compresión, equipo de compresión.

c) Toma de datos.

Tabla 68. Resistencia a inmersión-compresión de mezclas asfálticas compactadas.

		UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL			
TESIS:					
"ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MÉCANICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".					
Ensayo: Resistencia a inmersión - compresión de mezclas bituminosas					
Fecha: 14/05/2019		Norma técnica: MTC E-518			
Tipo de asfalto: E.A. CSS-1h		Provincia: Cusco		Distrito: San Jerónimo	
Reciclado 33.33% seco					
Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Carga (kg-f)	Resistencia (kg-f/cm2)
BC1A	10.50	10.20	1928.00	1332	15.38
BC1B	10.50	10.32	1923.00	1210	13.97
BC1C	10.50	10.00	1904.20	758	8.75
Promedio	10.50	10.17	1918.40	1100.00	12.70
Reciclado 33.33% en inmersión					
Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Carga (kg-f)	Resistencia (kg-f/cm2)
BC2A	10.54	9.96	1919.60	1294	14.83
BC2B	10.52	10.20	1928.00	1136	13.07
BC2C	10.55	10.26	1937.00	1410	16.13
Promedio	10.54	10.14	1928.20	1280.00	14.68
Reciclado 50% seco					
Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Carga (kg-f)	Resistencia (kg-f/cm2)
CC1A	10.55	10.10	1941.00	1050	12.01
CC1B	10.56	10.21	1920.00	1034	11.81
CC1C	10.58	10.20	1932.00	1090	12.40
Promedio	10.56	10.17	1931.00	1058.00	12.07
Reciclado 50% en inmersión					
Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Carga (kg-f)	Resistencia (kg-f/cm2)
CC2A	10.58	9.80	1009.50	1464	16.65
CC2B	10.61	10.14	1914.40	1250	14.14
CC2C	10.63	10.16	1937.60	1486	16.74
Promedio	10.61	10.03	1620.50	1400.00	15.84

Fuente: Elaboración propia.



3.5.21. Recolección de datos, Estabilidad y Flujo ensayo Marshall, Norma MTC E-504

a) Equipos utilizados en la prueba.

Equipo:

- Prensa Marshall de medida Estabilidad y flujo 50.8 +/- 5 mm/min de velocidad.
- Baño María, a temperatura de 25°C.
- Horno de secado temperatura 135 +/- 5°C.
- Balanza de precisión 0.1 gramos de sensibilidad.
- Compactador de briquetas Marshall.
- Eyector de Briquetas de mezclas asfálticas compactadas.

Herramientas:

- Recipientes para transporte de materiales.
- Termómetro de laboratorio.
- Moldes Marshall de 4" de diámetro x 3" de altura, collarín y base.
- Varilla lisa de acero de 5/8".
- Bandejas y recipientes de mezcla, espálala, brocha.

Adicional:

- Agua desionizada y/o destilada.

b) Procedimiento.

- Se elaboró 15 briquetas de prueba de cinco proporciones de emulsión asfáltica: 4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25%, 6.65% tres de cada una, un total de 60 briquetas por tener 4 diseños; para lo cual previamente se prepara la mezcla de agregados, emulsión asfáltica y agua, la dosificación es para una briqueta de aproximadamente 1200 gramos (de acuerdo al diseño de mezcla pre-establecida). El cual se llena en el molde en tres partes que se van apisonando con la varilla de 5/8" en forma circular 25 veces, luego es llevado al equipo de compactación Marshall aplicando 50 golpes en cada cara, se deja curar al aire libre en el molde por 24 horas, luego se procede a extraer la briqueta en el equipo eyector de muestras compactadas, todo esto se realizó para cada briqueta de ensayo; cabe indicar que todo lo indicado se efectúa a temperatura ambiente.
- Una vez elaboradas las briquetas y curadas al aire libre por 7 días, se las clasifica en 5 grupos de 3 briquetas cada uno se miden los diámetros y alturas el error promedio admisible es de 2.5% para corrección con factor en tablas, se realizó el ensayo de la siguiente forma:

- Las briquetas son colocadas en baño maría de 30 a 40 minutos o en un horno de calentamiento por 2 horas, a una temperatura de $60^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$.
- Se limpia y lubrica las barras guías y las superficies interiores de las mordazas de ensayo antes de ejecutar los ensayos, de tal manera que la mordaza superior se deslice libremente. La temperatura de las mordazas se deberá mantener entre 21.1°C y 37.8°C .
- Se saca una briqueta del baño maría u horno y se coloca centrada en la mordaza inferior; se monta la mordaza superior con el medidor de deformación y el conjunto se sitúa centrado en la prensa.
- Se pone el medidor de flujo en posición y se ajusta a cero, mantener su vástago firmemente contra la mordaza superior mientras se aplica la carga.
- La prensa Marshall aplica una carga de deformación constante de 50.8 mm (2") por minuto, hasta que se produzca la falla de la briqueta; es decir cuando se alcanza la carga máxima, según el dial respectivo, se anota este valor máximo, si fuese el caso este es multiplicado por la constante del anillo (Newton o kg-f) siendo este el valor de Estabilidad Marshall.
- Toda esta operación no debe durar más de 30 segundos, se repite el procedimiento para todas las briquetas a ensayar.
- **Previo al ensayo de deformación y flujo Marshall, se deben de realizar los ensayos de Gravedad específica Bulk, Densidad de mezclas asfálticas, gravedad específica máxima y porcentaje de vacíos de aire, con todos ellos de tiene el porcentaje óptimo de asfalto o emulsión asfáltica de la mezcla.**



Figura 52. Briquetas de ensayo marcadas para ensayo en equipo Estabilidad y Flujo Marshall, control de temperatura en baño maría de las briquetas de ensayo.



Figura 53. Se observa el equipo Marshall cargado con la briqueta de ensayo, al costado el resultado del ensayo, abajo el retiro de la briqueta ensayada y como queda esta después del ensayo.

c) Toma de datos.

Tabla 69. Estabilidad y Flujo Marshall.

		UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL				
TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".						
ENSAYO:	ESTABILIDAD Y FLUJO		NORMA TÉCNICA:	MTC E-504		
FECHA:	14/05/2019	PROVINCIA:	Cusco	DISTRITO:	San Jerónimo	
TIPO DE ASFALTO:	E.A. CSS-1h					
% DE EMULSIÓN ASFÁLTICA 4.75						
MUESTRA REC 25%	DIÁMETRO	ALTURA	PESO	ESTABILIDAD	FLUJO	
AM1	10.195	7.275	1250.40	30.25	2.562	
AM2	10.155	7.335	1245.00	19.49	3.340	
AM3	10.325	7.135	1250.30	13.69	3.253	
PROMEDIO	10.225	7.248	1248.57	21.14	3.052	
% DE EMULSIÓN ASFÁLTICA 5.25						
MUESTRA REC 25%	DIÁMETRO	ALTURA	PESO	ESTABILIDAD	FLUJO	
AM4	10.295	7.055	1244.90	23.29	3.218	
AM5	10.335	7.055	1248.50	10.82	3.774	
AM6	10.135	7.255	1266.30	18.87	4.468	
PROMEDIO	10.255	7.122	1253.23	17.66	3.820	
% DE EMULSIÓN ASFÁLTICA 5.75						
MUESTRA REC 25%	DIÁMETRO	ALTURA	PESO	ESTABILIDAD	FLUJO	
AM7	10.155	7.195	1260.20	34.34	3.029	
AM8	10.275	7.085	1260.10	17.85	4.179	
AM9	10.245	7.165	1265.60	18.43	4.321	
PROMEDIO	10.225	7.148	1261.97	23.54	3.843	
% DE EMULSIÓN ASFÁLTICA 6.25						
MUESTRA REC 25%	DIÁMETRO	ALTURA	PESO	ESTABILIDAD	FLUJO	
AM10	10.315	7.175	1255.30	13.78	3.621	
AM11	10.285	7.155	1261.20	8.84	3.382	
AM12	10.145	7.385	1258.10	14.52	4.787	
PROMEDIO	10.248	7.238	1258.20	12.38	3.930	
% DE EMULSIÓN ASFÁLTICA 6.75						
MUESTRA REC 25%	DIÁMETRO	ALTURA	PESO	ESTABILIDAD	FLUJO	
AM13	10.275	7.185	1263.20	11.22	3.689	
AM14	10.305	7.215	1257.80	9.45	4.365	
AM15	10.115	7.395	1252.40	12.19	4.414	
PROMEDIO	10.232	7.265	1257.80	10.95	4.156	

Fuente: Elaboración propia.



3.5.22. Recolección de datos, Resistencia a tracción indirecta de mezclas de materiales bituminosos en frío, norma INV E-785.

a) Equipos utilizados en la prueba.

Equipo:

- Prensa Marshall de medida Estabilidad y flujo 50.8 +/- 5 mm/min de velocidad.
- Baño María, a temperatura de 25°C y 60°C.
- Horno de secado temperatura 135 +/- 5°C.
- Balanza de precisión 0.1 gramos de sensibilidad.
- Compactador de briquetas Marshall
- Eyector de Briquetas de mezclas asfálticas compactadas.

Herramientas:

- Recipientes para el transporte de muestras.
- Termómetro de laboratorio.
- Moldes Marshall de 4" de diámetro x 3" de altura, collarín y base.
- Varilla lisa de acero de 5/8".
- Bandejas y recipientes de mezcla, espálala, brocha.
- Vernier.
- Mordazas Marshall par ensayo de tracción indirecta.

Adicional:

- Agua desionizada y/o destilada.

b) Procedimiento.

Se elabora 24 briquetas de prueba para los 4 diseños establecidos ya con el porcentaje de emulsión asfáltica óptimo, tres serán secos y tres saturados (sumergidos en agua); para lo cual previamente se prepara la mezcla de agregados, emulsión asfáltica y agua, la dosificación es para una briqueta de aproximadamente 1200 gramos (de acuerdo al diseño de mezcla pre-establecida). El cual se llena en el molde en tres parte que se van apisonando con la varilla de 5/8" en forma circular 25 veces, luego es llevado al equipo de compactación Marshall aplicando 50 golpes en cada cara, se deja curar al aire en el molde por 24 horas, luego se procede a extraer la briqueta en el equipo



eyector de muestras compactadas, todo esto se realizó para cada briqueta de ensayo; cabe indicar que todo lo indicado se efectúa a temperatura ambiente, una vez elaboradas las briquetas son curadas al aire por 7 días.

La resistencia a la tracción indirecta se determina midiendo la carga última a la cual falla la briqueta sometida a una carga de deformación constante de 50.8 mm/minuto sobre su eje diametral (transversal).

Las briquetas se dejan reposar a temperatura ambiente durante una noche, antes de ser ensayadas, se mide la altura de cada briqueta en cuatro puntos diferentes y se calcula su altura promedio (**L**); de la misma forma se hace con el diámetro (**D**).

Se llevan las briquetas al horno de calentamiento a una temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$ durante un tiempo de 1 a 2 horas.

Se toma una briqueta del horno de calentamiento y se coloca en el equipo de carga con las franjas de carga, centradas y paralelas en el plano diametral vertical.

Se aplica la carga a la briqueta sin impactos a una velocidad de 50.8 mm/minuto hasta alcanzar la máxima carga (**carga última (P)**).

Para determinar la resistencia a la tensión indirecta de probetas saturadas, se ponen las briquetas curadas en un sistema de vacío donde se llenan con agua a $25 \pm 1^\circ\text{C}$. Se aplica un vacío de 50 mm de Hg durante 60 ± 1 minutos, desde el instante que marca vacío total, se extrae una briqueta, se seca superficialmente con una franela y se coloca en el equipo de carga de la forma descrita anteriormente y se determina la tracción indirecta en la briqueta saturada.

De no contar con el equipo de vacío y lo indicado en el anterior párrafo; el proceso de saturación es hecho de acuerdo a lo indicado en la saturación de briquetas sometido a inmersión-compresión; es decir se sumergen las briquetas en agua por 24 horas a una temperatura de 60°C y luego por media hora a 25°C antes de realizar el ensayo.



Figura 54. Se observa el equipo compactador Marshall y la operación de carga de la briqueta a compactar, también se observa la falla transversal de la briqueta sometida a tracción indirecta, así como las mordazas y el proceso de carga en el equipo Marshall para tracción indirecta.

c) Toma de datos.

Tabla 70. Resistencia a tracción indirecta de mezclas asfálticas compactadas.

		UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO				
		FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA		ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL		
TESIS:						
"ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MÉCANICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".						
Ensayo: Resistencia a tracción indirecta						
Fecha: 14/05/19 Norma técnica: INV E-785						
Tipo de asfalto: E.A. CSS-1h Provincia: Cusco Distrito: San Jerónimo						
Patrón seco						
Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Carga (KN)	Resistencia (KN/cm ²)	kg-f/cm ²
PT1A	10.17	7.35	1280.00	9.76	0.0831	8.47
PT1B	10.16	7.41	1300.00	11.26	0.0952	9.71
PT1C	10.12	7.38	1284.00	10.52	0.0897	9.14
Promedio	10.15	7.38	1288.00	10.51	0.0893	9.11
Patrón saturado						
Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Carga (KN)	Resistencia (KN/cm ²)	kg-f/cm ²
PT2A	10.23	7.05	1275.00	7.49	0.0661	6.74
PT2B	10.26	7.22	1283.00	9.57	0.0822	8.38
PT2C	10.25	7.25	1276.00	10.29	0.0882	8.99
Promedio	10.25	7.17	1278.00	9.12	0.0788	8.04
Reciclado 25% seco						
Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Carga (KN)	Resistencia (KN/cm ²)	kg-f/cm ²
R25T1A	10.31	6.89	1240.30	9.55	0.0856	8.72
R25T1B	10.35	7.05	1254.60	7.26	0.0633	6.46
R25t1c	10.32	7.08	1269.50	8.23	0.0717	7.31
Promedio	10.33	7.01	1254.80	8.35	0.0735	7.50
Reciclado 25% saturado						
Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Carga (KN)	Resistencia (KN/cm ²)	kg-f/cm ²
R25T2A	10.32	7.01	1261.60	6.70	0.0590	6.01
R25T2B	10.35	7.15	1273.00	7.54	0.0649	6.61
R25T2C	10.35	7.12	1279.00	6.92	0.0598	6.09
Promedio	10.34	7.09	1271.20	7.05	0.0612	6.24

Fuente: Elaboración propia.



3.5.23. Recolección de datos, Volumetría de mezclas asfálticas compactadas, Norma INV E-799.

a) Equipos utilizados en la prueba.

Equipo:

- Horno de secado temperatura 135 +/- 5°C.
- Balanza de precisión 0.1 gramos de sensibilidad.
- Balanza de flotabilidad con canastilla.
- Bomba de vacío.
- Calculadora científica.

Herramientas:

- Recipientes para el transporte de muestras.
- Termómetro de laboratorio.
- Fiola, o matraz de 500 ml.
- Varilla lisa de acero de 5/8".
- Bandejas y recipientes de mezcla, espálala, brocha, franela.

Adicional:

- Agua desionizada y/o destilada.

b) Procedimiento.

Se toma una muestra de 500 gramos de cada agregado fino, es decir de las mallas N° 50, N°200 y mayor a N° 200; tanto de los agregados finos nuevos (fino 1 y 2) y los reciclados finos (reciclado 1 y 2); se desarrolla el mismo procedimiento para determinación de pesos específicos de agregado fino descrita en el ensayo MTC E-206.

De la misma forma se realiza para los agregados gruesos nuevos y reciclados siguiendo los pasos descritos en la norma MTC E-205, para cada malla, es decir 3/4", 3/8", N°4, N°8.

Una vez encontrados todos los pesos específicos, se procede al cálculo por aplicación de fórmula del peso específico de los agregados combinados de acuerdo a la norma INV E-128.

También se considera la cantidad de emulsión asfáltica para cada diseño y su respectivo peso específico que es aproximadamente 0.95.

Teniendo la gravedad específica de la combinación de agregados y la emulsión asfáltica y la gravedad específica aparente o bulk de las briquetas compactadas (norma MTC E-514) y los porcentajes en peso de los agregados aplica la formula respectiva descrita en la presente norma se determina el porcentaje de vacíos en el agregado mineral VMA.

Seguidamente se relaciona este valor VMA, con el de vacíos de aire (P_a) en otra ecuación y se determina el porcentaje de vacíos llenos de ligante asfáltico VFA, descrito en esta norma.



Figura 55. Se observa ensayo de peso específico para agregados finos, secado superficial de agregados gruesos para determinación de peso específico de agregados gruesos y todos los agregados gruesos utilizados.

c) Toma de datos.

Tabla 71. Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas.

		UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL				
TESIS:						
"ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MÉCANICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".						
Ensayo: Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas						
Fecha: <u>14/05/19</u>		Norma técnica: _____		INV E-799		
Tipo de asfalto: <u>E.A. CSS-1h</u>		Provincia: <u>Cusco</u>		Distrito: <u>San Jerónimo</u>		
Reciclado 33.33%						
% emulsión asfáltica	Gmb	Ps (%)	Gbs	VMA (%)	Pa (%)	VFA(%)
4.75	2.22	100.00	2.43	8.81	5.65	35.83
5.25	2.22	100.00	2.44	9.27	6.13	33.87
5.75	2.20	100.00	2.43	9.33	6.50	30.32
6.25	2.21	100.00	2.42	8.56	2.71	68.28
6.75	2.19	100.00	2.40	8.84	5.36	39.33
Reciclado 50%						
% emulsión asfáltica	Gmb	Ps (%)	Gbs	VMA (%)	Pa (%)	VFA(%)
4.75	2.23	100.00	2.42	8.05	7.70	4.34
5.25	2.23	100.00	2.45	9.00	5.51	38.80
5.75	2.22	100.00	2.44	8.74	5.70	34.80
6.25	2.21	100.00	2.42	8.66	4.46	48.51
6.75	2.19	100.00	2.41	9.09	3.76	58.62

Fuente: Elaboración propia.



3.5.24. Recolección de datos, Modelos de predicción matemáticos para obtener el módulo de rigidez o dinámico de mezclas asfálticas compactadas (Método correlacional).

a) Equipos utilizados en la prueba.

Equipo:

- Calculadora científica.
- Computadora, laptop.

Herramientas:

- Hojas de datos y apuntes para cálculos.

b) Procedimiento.

Primeramente se llevan las ecuaciones a una hoja Excel para ambos métodos: modelo 1 de Hwaing-Witczak y modelo 2 de Witczak.

De acuerdo al modelo 1; se tienen 7 ecuaciones que van de atrás hacia adelante, las primeras 5 están denominadas por β_1 , β_2 , β_3 , β_4 , β_5 ; se empieza el análisis de la ecuación con β_5 , el cual es una ecuación lineal simple, donde se define el valor hallando la frecuencia de trabajo, en este caso se trabajó 5 frecuencias la cuales son: 1, 3, 5, 10, 20.

β_4 ; también es una ecuación lineal simple pero esta ecuación pide el volumen de asfalto utilizado expresado en porcentaje; este porcentaje es de 5.66% para todos los diseños.

β_3 ; la ecuación se hace más larga y se tienen más incógnitas una de ellas es el peso que pasa la malla 200 en el diseño de agregados, otro es el volumen de vacíos en la mezcla compactada; así como la viscosidad del asfalto utilizado; se conoce el % que pasa la malla 200 para todos los diseños, solamente se le incorpora a la ecuación, el % de vacíos es de 5% para todos los diseños; para la viscosidad se usa una ecuación dada en este mismo modelo que trabaja con el valor de penetración del asfalto, como se tiene este valor se aplica en la fórmula dada.

β_2 ; es una ecuación que combina los datos de β_4 y β_5 con la temperatura del medio; para la temperatura se tomaron 5 valores de 0°C, 10°C, 20°C, 30°C simulando los posibles ambientes donde se aplica el pavimento.

β_1 ; es la combinación de los valores hallados en β_2 y β_3 , a las frecuencias dadas de 1, 3, 5, 10,20.

Con todos ellos se llega a la ecuación principal del Módulo de rigidez de la mezcla asfáltica E^* ; el cual es una ecuación que multiplica el valor numérico de 100000 por 10 por el valor de β_1 en exponencial.

Continuando con el modelo 2; se tiene una ecuación lineal bastante larga de suma, resta multiplicación y división en la cual considera parámetros como : la viscosidad del asfalto, la frecuencia, el porcentaje de vacíos de aire de la mezcla compactada, el porcentaje efectivo de asfalto en la mezcla, el porcentaje retenido de agregado en el tamiz $\frac{3}{4}$ ", tamiz $\frac{3}{8}$ ", tamiz N° 4 y el porcentaje de agregado que pasa el tamiz N° 200, todos ellos para el diseño de mezcla que se está trabajando sea este el patrón , con agregado reciclado a 25%, 33.33%, 50% el valor final es un módulo de rigidez E^* , expresado en forma logarítmica el cual se hace la transformación respectiva teniendo el módulo de rigidez en valores de **psi** que podemos transformar a kg-f/cm²; cabe aclarar que el valor de viscosidad usado es el hallado en laboratorio, este modelo predice el módulo de rigidez en un rango de temperatura de -17.7°C a 54.4°C y una frecuencia de 0.1Hz a 25Hz.

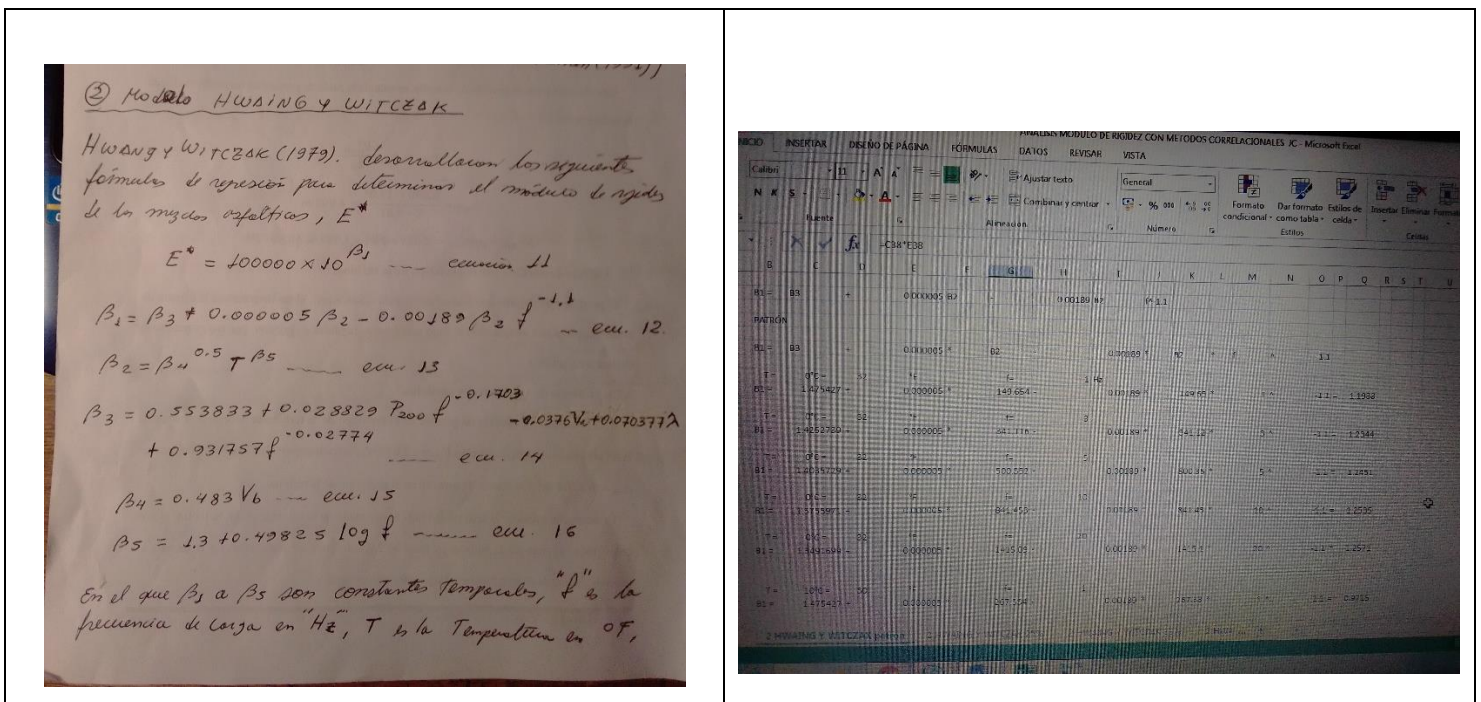


Figura 56. Se observa a la izquierda los apuntes de las formula del modelo de HWAING-WITCZAK, a la derecha la digitalización de aplicación en hoja Excel de las mismas.

c) Toma de datos.

Tabla 72. Análisis predictivo matemático del Módulo de rigidez o dinámico

	<p>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</p>				
<p>TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MÉCANICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".</p>					
<p>Ensayo: Análisis predictivo matemático del módulo dinámico</p>					
<p>Fecha: 22/07/2019</p>		<p>Norma técnica: Análisis correlacional</p>			
<p>Análisis N°: 1</p>	<p>Provincia: Cusco</p>	<p>Distrito: S. Jerónimo</p>			
<p>Mezcla patrón</p>					
<p>Método 1 = HWAING - WITCZAK</p>					
Frecuencia (f)(Hz)	Temperatura (°F)	% pasa malla n°200 (P200)	% vacíos de aire (Va)	Viscosidad a 70°F (10 ⁶ poise)	% asfalto en la mezcla (%)
1	32,50,68,86	4.51	5	0.6795	5.66
3	32,50,68,86	4.51	5	0.6795	5.66
5	32,50,68,86	4.51	5	0.6795	6.66
10	32,50,68,86	4.51	5	0.6795	5.66
20	32,50,68,86	4.51	5	0.6795	5.66
<p>Método 2 = WITCZAK</p>					
Frecuencia (Hz)	Agregado retenido malla 3/4" (P34)	Agregado retenido malla 3/8" (P38)	Agregado retenido malla N°4 (P4)	Volumen de asfalto efectivo (%)(Vbeff)	Gravedad específica máxima de la mezcla (Gmm)
1,3,5,10,20	12.48%	16.68%	16.61%	2.45%	2.34
Viscosidad (n) (10 ⁶ poise)	Porcentaje total de la mezcla suelta(Pmm)	% de asfalto total de la mezcla (Pb)	Gravedad específica del asfalto (Gb)	Gravedad específica bulk del agregado combinado(Gsb)	Gravedad específica del agregado(Gse)
0.7189	100%	5.66%	0.95	2.41	2.57
<p>Observaciones:</p>					
<p>_____</p> <p>Tesistas</p>		<p>_____</p> <p>Jefe Laboratorio</p>		<p>_____</p> <p>Asesor Tesis</p>	

Fuente: Elaboración propia.



3.5.25. Recolección de datos, metodología de diseño Marshall modificado para la dosificación y fabricación de briquetas, de diseño de mezcla Patrón y diseño de mezcla con agregados reciclados.

a) Equipos utilizados en la prueba.

Equipo:

- Balanza de precisión 0.1 gramos de sensibilidad.
- Calculadora científica.
- Fichas, hojas de cálculo.
- Equipo de compactación Marshall.
- Eyector de muestras.

Herramientas:

- Recipientes para el transporte de muestras.
- Probeta 20 ml.
- Bandejas y recipientes de mezcla, cucharón espálala, brocha, franela.
- Moldes de 101.6 mm x 63.5mm

Adicional:

- Emulsión asfáltica de rotura lenta tipo CSS-1h, Agua desionizada y/o destilada

b) Procedimiento.

- Conocido la granulometría de los agregados a utilizar, luego del análisis granulométrico realizado de acuerdo a la norma MTC E-204, se procede a realizar la dosificación de agregados para ello los retenidos de todas las mallas son llevados a porcentajes pasantes, esto para todos los agregados a utilizar es decir: Agregado grueso 1 y 2, agregado fino 1 y 2, filler. y agregados reciclados 1 y 2.
- Se define el tamaño máximo del agregado; esto con el fin de definir las bandas de control granulométrica y tipo de mezcla en frío a utilizar, en nuestro caso el tamaño máximo nominal es de 1” y el tipo de mezcla en frío a utilizar es la MDF-2 (Mezclas densas frías), el cual cuenta con sus respectivas bandas granulométricas de indicación de límites de banda mínimos y máximos.



- Con los límites de banda se obtiene la banda media, la cual es la referencia para realizar los tanteos de porcentaje de dosificación; al realizar la combinación de agregados es recomendable que esta esté lo más próxima a la banda media de la especificación; es decir del tipo de mezcla densa utilizada (MDF-2).
- Se realizan varios tanteos con la ayuda de la hoja de cálculo y se escoge la más próxima a la banda media; los porcentajes encontrados a usar de cada agregado son dosificados para obtener una briqueta de aproximadamente 1200 gramos.
- Teniendo los porcentajes en peso de cada agregado para una briqueta, se procede a determinar los porcentajes de emulsión asfáltica a utilizar en el ensayo; como se conocen ya los porcentajes de agregado y de acuerdo a la metodología del Instituto del asfalto americano y utilizando la respectiva fórmula de cálculo se procede a determinar el porcentaje de emulsión asfáltica a utilizar.
- El porcentaje de emulsión asfáltica encontrado con la aplicación de la fórmula es el referente para comenzar a dosificar la emulsión, generalmente este valor está entre 5% y 7% y un posible valor intermedio de 6%, para las pruebas se elige 5 porcentajes de emulsión asfáltica, distanciadas en $\pm 0.5\%$.
- Los 5 porcentajes de emulsión asfáltica se llevan a peso, tomadas del valor total del agregado y sumadas luego a esta.
- El agua a utilizar es generalmente 2% de peso total del agregado restando la humedad de la misma y llevadas a mililitros.
- Teniendo los pesos de todos los componentes se procede a mezclar primero los agregados a las proporciones determinadas para una briqueta, con la ayuda de una espátula se mezcla hasta tener una mezcla homogénea, se adiciona el primer porcentaje de emulsión asfáltica y el agua correspondiente se sigue mezclando hasta conseguir una mezcla densa y pastosa pero no seca, de estar muy seca adicionar agua; se fabrican tres briquetas por grupo de emulsión asfáltica.
- Se procede a llenar el molde de 101.6mm x 63.5 mm, se compacta a 50 golpes por cara de acuerdo al servicio que va ofrecer (bajo a medio).
- Se extrae la briqueta del molde al día siguiente y se deja curar al aire por 7 días, tiempo en que completa totalmente la rotura de la emulsión asfáltica.

- Completado el curado la briqueta esta lista para determinar los valores de los parámetros de diseño, es decir: Porcentaje óptimo de asfalto, Porcentaje de vacíos de aire, Porcentaje de vacíos en el agregado mineral, Porcentaje de vacíos llenos de aire, Densidad, Estabilidad y Flujo, Densidad teórica máxima, para este ultimo la mezcla tiene que estar suelta no compactada.
- Determinados estos valores se analizan gráficamente y se evalúa si el diseño trabajado cumple o no las especificaciones, de esta forma se valida o no el diseño o se hacen las correcciones pertinentes, se concluye con la obtención de la fórmula de diseño.



Figura 57. Se observa pesado de la mezcla de agregados con 50% de agregado reciclado, incorporación de emulsión asfáltica a la mezcla, proceso antes y después del mezclado, previo a la compactación.

c) Toma de datos.

Tabla 73. Diseño de mezcla Marshall modificado, ficha de diseño de mezcla para 50% de agregado reciclado.

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MÉCANICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".									
Ensayo: _____ Diseño de mezcla marshall modificado										
Fecha: _____ 25/04/2019		NORMA TÉCNICA: _____ MS-14								
Muestra: _____ 30	Provincia: _____ Cusco	Distrito: _____ San Jerónimo								
Distribución Granulométrica, 50% de reciclado										
Tamiz	Tamiz (mm)	Av. 24 junio	Santa Rosa	Grueso 1	Grueso 2	Fino 1	Fino 2	Filler	Peso (g)	% Peso
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3/4"	19.00	44.43	39.63	93.15	0.00	0.00	0.00	0.00	177.22	14.67
3/8"	9.50	22.81	28.88	68.77	72.48	0.00	0.00	0.00	192.93	15.98
#4	4.75	50.64	44.16	6.49	23.08	40.10	19.32	0.00	183.79	15.22
#8	2.36	42.56	37.12	0.00	0.00	18.98	39.94	0.00	138.61	11.48
#50	0.30	87.55	73.77	0.00	0.00	57.81	53.59	0.00	272.73	22.58
#200	0.08	50.02	91.55	0.00	0.00	19.91	22.42	0.00	183.89	15.23
Fondo		8.40	10.94	0.00	0.00	1.50	3.07	34.62	58.53	4.85
	Pesos	306.43	326.05	168.41	95.56	138.29	138.34	34.62	1207.71	100.00
	% Peso	25.37	27.00	13.94	7.91	11.45	11.45	2.87	100.00	
% de emulsión y agua para una briqueta, 50% de reciclado										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Mezcla de agregado (g)		1207.70	1207.70	1207.70	1207.70	1207.70	1207.70	1207.70	1207.70	1207.70
% de emulsión asfáltica en la mezcla (%)		7.98	8.40	8.82	9.24	9.66	10.08	10.50	10.92	11.34
% asfalto residual en la mezcla (%)		4.75	5.00	5.25	5.50	5.75	6.00	6.25	6.50	6.75
Agua de premezcla (%)		1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36
Observaciones: _____										
_____			_____				_____			
Testistas			Jefe Laboratorio				Asesor Tesis			

Fuente: Elaboración propia.



3.6. Procedimiento de análisis de datos.

3.6.1. Análisis de datos, Granulometría de agregado grueso, fino y reciclado, Norma MTC E-204.

a) Procesamiento o cálculos de la prueba.

Datos:

- a = Agregado grueso 1
- b = Agregado fino 1
- c = Agregado fino 2
- d = Filler
- e = Agregado grueso 2

Ecuación.

$$\% \quad a \quad + \quad \% \quad b \quad + \quad \% \quad c \quad + \quad \% \quad d \quad + \quad \% \quad e \quad = \quad f$$

Cantidad agregado grueso 3/4"

$$0.50 \quad a \quad + \quad 0.00 \quad b \quad + \quad 0.00 \quad c \quad + \quad 0.00 \quad d \quad + \quad 0.50 \quad e \quad =$$

$$0.50 \quad 12.48 \quad + \quad 0.00 \quad 0.00 \quad + \quad 0.00 \quad 0.00 \quad + \quad 0.00 \quad 0.00 \quad + \quad 0.50 \quad 12.48 \quad = \quad 12.48 \quad \text{kg.}$$

$$a = \quad 6.24 \quad \text{kg}$$

$$e = \quad 6.24 \quad \text{kg}$$

Para una muestra de 10 Kg.

$$a = \quad 0.624 \quad \text{kg}$$

$$e = \quad 0.624 \quad \text{kg}$$

$$\text{Total} = \quad 1.248 \quad \text{kg}$$

Cantidad agregado grueso 3/8"

$$0.50 \quad a \quad + \quad 0.00 \quad 0.00 \quad + \quad 0.00 \quad 0.00 \quad + \quad 0.00 \quad 0.00 \quad + \quad 0.50 \quad e \quad =$$

$$0.50 \quad 16.68 \quad + \quad 0.00 \quad 0.00 \quad + \quad 0.00 \quad 0.00 \quad + \quad 0.00 \quad 0.00 \quad + \quad 0.50 \quad 16.68 \quad = \quad 16.68 \quad \text{kg.}$$

$$a = \quad \quad \quad \text{kg}$$



$$e = \begin{matrix} 8.34 \\ 8.34 \end{matrix} \text{ kg}$$

Para una muestra de 10 kg.

$$\begin{aligned} a &= 0.834 \text{ kg} \\ e &= 0.834 \text{ kg} \\ \text{Total} &= 1.668 \text{ kg} \end{aligned}$$

Cantidad de agregado malla n°4

$$\begin{aligned} 0.25 \quad a \quad + \quad 0.25 \quad b \quad + \quad 0.25 \quad c \quad + \quad 0.00 \quad 0.00 \quad + \quad 0.25 \quad e \quad = \\ 0.25 \quad 16.61 \quad + \quad 0.25 \quad 16.61 \quad + \quad 0.25 \quad 16.61 \quad + \quad 0.00 \quad 0.00 \quad + \quad 0.25 \quad 16.61 \quad = \quad 16.61 \quad \text{kg.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a &= 4.15 \text{ kg} \\ b &= 4.15 \text{ kg} \\ c &= 4.15 \text{ kg} \\ e &= 4.15 \text{ kg} \end{aligned}$$

Para una muestra de 10 kg.

$$\begin{aligned} a &= 0.415 \text{ kg} \\ b &= 0.415 \text{ kg} \\ c &= 0.415 \text{ kg} \\ e &= 0.415 \text{ kg} \\ \text{Total} &= 1.661 \text{ kg} \end{aligned}$$

Cantidad de agregado malla n°8

$$\begin{aligned} 0.33 \quad a \quad + \quad 0.33 \quad b \quad + \quad 0.33 \quad c \quad + \quad 0.00 \quad d \quad + \quad 0.00 \quad e \quad = \\ 0.33 \quad 13.65 \quad + \quad 0.33 \quad 13.65 \quad + \quad 0.33 \quad 13.65 \quad + \quad 0.00 \quad 0.00 \quad + \quad 0.00 \quad 0.00 \quad = \quad 13.65 \quad \text{kg.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a &= 4.55 \text{ kg} \\ b &= 4.55 \text{ kg} \\ c &= 4.55 \text{ kg} \end{aligned}$$



Para una muestra de 10 kg.

$$\begin{aligned}
 a &= 0.455 \text{ kg} \\
 b &= 0.455 \text{ kg} \\
 c &= 0.455 \text{ kg} \\
 \text{Total} &= \mathbf{1.365 \text{ kg}}
 \end{aligned}$$

Cantidad de agregado malla n°50

$$\begin{aligned}
 0.00 & \quad 0.00 & + & 0.50 & b & + & 0.50 & c & + & 0.00 & d & + & 0.00 & c & = & \\
 0.00 & \quad 0.00 & + & 0.50 & 23.98 & + & 0.50 & 23.98 & + & 0.00 & 0.00 & + & 0.00 & 0.00 & = & 23.98 \text{ kg.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 b &= 11.99 \text{ kg} \\
 c &= 11.99 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Para una muestra de 10 kg.

$$\begin{aligned}
 b &= 1.199 \text{ kg} \\
 c &= 1.199 \text{ kg} \\
 \text{Total} &= \mathbf{2.398 \text{ kg}}
 \end{aligned}$$

Cantidad de agregado malla n°200

$$\begin{aligned}
 0.00 & \quad a & + & 0.33 & b & + & 0.33 & c & + & 0.33 & d & + & 0.00 & 0.00 & = & \\
 0.00 & \quad 0.00 & + & 0.33 & 12.10 & + & 0.33 & 12.10 & + & 0.33 & 12.10 & + & 0.00 & 0.00 & = & 12.10 \text{ kg.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 b &= 4.03 \text{ kg} \\
 c &= 4.03 \text{ kg} \\
 d &= 4.03 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Para una muestra de 10 kg.

$$\begin{aligned}
 b &= 0.403 \text{ kg} \\
 c &= 0.403 \text{ kg} \\
 d &= 0.403 \text{ kg} \\
 \text{Total} &= \mathbf{1.210 \text{ kg}}
 \end{aligned}$$



Cantidad de agregado fondo (mayor a malla n°200)

$$0.00 \quad a \quad + \quad 0.33 \quad b \quad + \quad 0.33 \quad c \quad + \quad 0.33 \quad d \quad + \quad 0.00 \quad e \quad =$$

$$0.00 \quad 0.00 \quad + \quad 0.33 \quad 4.50 \quad + \quad 0.33 \quad 4.50 \quad + \quad 0.33 \quad 4.50 \quad + \quad 0.00 \quad 0.00 \quad = \quad 4.50 \quad \text{Kg.}$$

$$b = \quad 1.50 \quad \text{kg}$$

$$c = \quad 1.50 \quad \text{kg}$$

$$d = \quad 1.50 \quad \text{kg}$$

Para una muestra de 10 kg.

$$b = \quad 0.150 \quad \text{kg}$$

$$c = \quad 0.150 \quad \text{kg}$$

$$d = \quad 0.150 \quad \text{kg}$$

$$\text{Total} = \quad \mathbf{0.450} \quad \text{kg}$$

b) Diagramas y tablas.

Tabla 74. Proporción de agregados diseño de mezcla patrón (fase 1).

Agregados								
Tamiz	Tamiz (Mm)	Grueso 1	Fino 1	Fino 2	Filler	Grueso 2	Peso (g)	% Peso
1"	25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3/4"	19	1210.68	0.00	0.00	0.00	45.00	1255.68	12.48
3/8"	9.5	893.76	0.00	0.00	0.00	785.00	1678.76	16.68
#4	4.75	84.36	868.50	418.40	0.00	300.00	1671.26	16.61
#8	2.36	97.00	411.20	865.20	0.00	0.00	1373.40	13.65
#50	0.3		1252.20	1160.90	0.00	0.00	2413.10	23.98
#200	0.075		431.20	485.60	300.00	0.00	1216.80	12.09
Fondo			32.50	66.40	354.00	0.00	452.90	4.50
	PESOS	2285.80	2995.60	2996.50	654.00	1130.00	10061.90	100.00
	% PESO	22.72	29.77	29.78	6.50	11.23	100.00	

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 75. Proporción de agregados diseño de mezcla patrón (fase 2)

Tamiz	Tamiz (mm)	Peso Retenido	Peso Retenido Corregido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Gradada
1"	25	0.00	0.15	0.01	0.01	99.99	100.00
3/4"	19	150.75	150.90	12.48	12.49	87.51	88.00
3/8"	9.5	201.55	201.70	16.68	29.17	70.83	71.00
#4	4.75	200.65	200.80	16.61	45.78	54.22	54.00
#8	2.36	164.89	165.04	13.65	59.43	40.57	41.00
#50	0.3	289.71	289.86	23.97	83.40	16.60	17.00
#200	0.075	146.08	146.24	12.09	95.49	4.51	5.00
Fondo	Fondo	54.37	54.52	4.51	100.00	0.00	
	Pesos	1208.00	1209.21	100.00			

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 76. Límite mínimo, máximo y gradación de agregados, diseño para diseño de mezclas densas en frío MDF2, según manual EG-2013 MTC.

MDF2					
N°	Tamiz (Mm)	Inferior	Superior	Gradada	
1"	25	100	100	100	
3/4"	19	80	95	88	
3/8"	9.5	65	75	71	
#4	4.75	47	62	54	
#8	2.36	35	50	41	
#50	0.3	13	23	17	
#200	0.075	3	8	5	

Fuente: Manual de carreteras "Especificaciones generales para la construcción EG-2103 MTC, pág. 607.

c) Análisis de la prueba.

Se puede observar que el cálculo se basa en una muestra de 100 kg. Esto expresa la situación porcentual también en 100%, de acuerdo a la **Tabla. 76 (MDF2)**, que muestra los límites máximos y mínimos de diseño



para los agregados, se toma un promedio de los límites que debe ser puntos intermedios de valores, para saber la cantidad de agregado a utilizar por malla se realiza una regresión de estos límites hasta llegar a los porcentajes que quedan retenidos; los cuales se observan en las **tabla 74. General y para diseño de una briqueta (Tabla 75)**, teniendo estos porcentajes y de acuerdo al número de agregados a utilizar se separan en partes iguales usando la misma ecuación con diferentes datos para cada malla el cual se expresa en los cálculos.

3.6.2. Análisis de datos, Peso unitario y porcentaje de vacíos, Norma MTC E-203.

a) Procesamiento o cálculos de la prueba.

Diámetro (m)	Área ($\pi D^2/4$) m ²		Molde Altura (m)		Volumen (A*h) m ³	
	D1 =	A1 =	h1 =	h2 =	V1 =	V2 =
0.1519	0.0181	0.1660			0.0030	
0.1511	0.0179	0.1700			0.0030	

$$A = \pi D^2/4$$

$$A1 = \frac{3.1416 * 0.1519 * 0.1519}{4} = 0.0181 \text{ m}^2$$

$$A2 = \frac{3.1416 * 0.1511 * 0.1511}{4} = 0.0179 \text{ m}^2$$

PM = Peso del molde

$$PM = 7.505 \text{ kg}$$

VM = Volumen del molde

$$VM = \frac{V1 + V2}{2} =$$

$$VM = \frac{0.0030 + 0.0030}{2} = 0.0030 \text{ m}^3$$

PT = peso de molde (PM) + peso de agregado(PA)

PT1 =	11.57 kg	PM =	7.505 kg
PT2 =	11.6 kg		
PT3 =	11.59 kg		



Peso del agregado(PA) =	Peso total(PT)	-	Peso del molde(PM)		
PA1=	PT1	-	PM1		
PA1=	11.57	-	7.505	=	4.065 kg
PA2=	PT2	-	PM2		
PA2=	11.6	-	7.505	=	4.095 kg
PA3=	PT1	-	PM1		
PA3=	11.59	-	7.505	=	4.085 kg

Peso unitario del agregado (PU) = PA/VM

$$\begin{aligned}
 \text{PU1} &= \text{PA1} / \text{VM} = \\
 \text{PU1} &= 4.065 / 0.0030 = 1342.151 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{PU2} &= \text{PA2} / \text{VM} = \\
 \text{PU2} &= 4.095 / 0.0030 = 1352.057 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{PU3} &= \text{PA3} / \text{VM} = \\
 \text{PU3} &= 4.085 / 0.0030 = 1348.755 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

$$\text{PU} = \frac{\text{PU1} + \text{PU2} + \text{PU3}}{3} =$$

$$\text{PU} = \frac{1342.151 + 1352.057 + 1348.755}{3} = 1347.6543 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{PU} = 1347.654 \text{ kg/m}^3$$

Contenido de vacíos

$$\% \text{Vacíos} = \frac{100 ((S*W) - \text{PU})}{(S*w)} =$$

S = 2.63 Peso específico grueso
 W = 998.00 kg/m³
 PU = 1347.65 kg/m³



$$\% \text{Vacíos} = \frac{100 \left(\frac{(2.63 * 998) - 1489.58}{(2.63 * 998)} \right)}$$

$$\% \text{Vacíos} = \boxed{48.6927} \%$$

b) Diagramas, tablas.

Tabla 77. Peso Unitario Agregado Grueso 1 sin Compactar

Expresión de resultados		
	Resultado	Unidad
Peso unitario (PU)	1347.6543	kg/m ³
Porcentaje de vacíos (% vacíos)	48.6927	%

Fuente: Elaboración propia.

c) Análisis de la prueba.

El porcentaje de vacíos del agregado Grueso 1 sin compactar es de 48.69%; es decir casi la mitad del volumen está vacío, esto por el tamaño de los agregados; por tanto la densidad o peso unitario de este material grueso es el que se obtiene tomando en consideración estos vacíos; al realizar el compactado del agregado se aumentó su peso unitario a 1467.62% y se redujo los vacíos a 43% vacíos, esto quiere decir que cuanto menos espacios tenemos en el material más nos acercamos a una densidad o peso unitario real del agregado.

3.6.3. Análisis de datos, Peso específico y absorción de agregado grueso y fino, Norma MTC E- 205 y 206.

a) Procesamiento o cálculos de la prueba.

Datos experimentales.

$$A = 1931.6 \text{ g}$$

$$B = 1951.6 \text{ g}$$

$$C = 1217.7 \text{ g}$$

Gravedad específica bulk (GEB).

$$GEB = \frac{A}{B - A} = \frac{1931.6}{1951.6 - 1931.6} = \boxed{96.580}$$

**Gravedad Especifica Bulk Saturado Superficialmente Seco (SSD)**

$$\text{SSD} = \frac{B}{B-C} = \frac{1951.6}{1951.6 - 1217.7} = \boxed{2.659}$$

Peso específico aparente (Pea).

$$\text{Pea} = \frac{A}{A-C} = \frac{1931.6}{1931.6 - 1217.7} = \boxed{2.706}$$

Peso específico de masa(Pem)

$$\text{Pem} = \frac{A}{B-C} = \frac{1931.6}{1951.6 - 1217.7} = \boxed{2.632}$$

Porcentaje de absorción (% Abs).

$$\% \text{Abs} = \frac{B-A*100\%}{A} = \frac{1951.6 - 1931.6}{1931.6} * 100 = \boxed{1.035} \%$$

b) Diagramas, tablas.**TABLA 78. Peso específico agregado grueso 1**

Resumen	
Gravedad específica bulk (GEB)	96.58
Gravedad específica bulk saturado superficialmente seco (SSD)	2.66
Peso específico aparente (PEA)	2.71
Peso específico de masa(PEM)	2.63
Porcentaje de absorción (% ABS)	1.04 %

Fuente: Elaboración propia.**c) Análisis de la prueba.**

Se puede observar en el cuadro resumen que la absorción es solo de 1% lo que indica que el agregado es compacto y poco poroso esto por su naturaleza plutónica, además de tener un peso específico alto de 2.6 característico en la granodiorita.

3.6.4. Análisis de datos, Porcentaje de humedad de agregados finos y gruesos, Norma MTC E-2015.

a) Procesamiento o cálculos de la prueba.

% Humedad agregado grueso 1

Datos

$$W(\text{Húmedo}) = 3057.60 \text{ g}$$

$$D(\text{Seco}) = 3037.80 \text{ g}$$

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{W - D}{D} * 100\%$$

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{3057.60 - 3037.80}{3037.80} * 100\% = 0.6518\%$$

b) Diagramas, tablas.

Tabla 79. % de humedad agregado grueso 1.

Resumen			
Material	(W) Peso seco (g)	(D) Peso húmedo (g)	Humedad (%)
Agregado grueso 1	3057.6	3037.8	0.6518

Fuente: Elaboración propia.

c) Análisis de la prueba.

El porcentaje de humedad obtenido es bajo lo que indica que el material es poco poroso o de poros muy pequeños, además de ser material compacto esto por su naturaleza plutónica (granodiorita); esta condición puede favorecer o no a las mezclas asfálticas en frío ya que en el proceso de mezcla es recomendable tener una cierta humedad del agregado ya que la emulsión asfáltica contiene agua y puede mejorar la capacidad de adherencia con el agregado, en mezclas asfálticas en frío es recomendable que este valor no sobrepase el 1.5%.



3.6.5. Análisis de datos, Determinación del porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso, Norma MTC E-210.

a) Procesamiento o cálculos de la prueba.

Agregado grueso 1 Método A

Datos ajustados de ensayo: 3/8"

F =	100.00 g					
Q =	16.70 g	P=	$\frac{100.00 + 8.35}{100.00 + 16.70 + 83.30}$	*	100.00 =	54.18 %
N =	83.30 g					
Total	200.00 g					

$$Q\% = \frac{16.70}{200.00} = 8.35\% \quad \text{Menor a } 15\% \text{ ok}$$

Datos ajustados de ensayo: 1/2"

F =	260.00 g					
Q =	30.00 g	P=	$\frac{260.00 + 15.00}{260.00 + 30.00 + 210.00}$	*	100.00 =	55.00 %
N =	210.00 g					
Total	500.00 g					

$$Q\% = \frac{30.00}{500.00} = 6.00\% \quad \text{Menor a } 15\% \text{ ok}$$

Método B

Datos	3/8"	
1 Cara		75.00 g
2 Caras		200.00 g
Resto		25.00 g
Total		300.00 g

Datos	1/2"	
1 Cara		300.00 g
2 Caras		800.00 g
Resto		100.00 g
Total		1200.00 g

Tabla 80. Porcentaje de partículas fracturadas agregado grueso 1.

Tamaño del agregado		Forma de cálculo y distribución				
Pasa tamiz	Retiene tamiz	A (g)	B (g)	C ((B/A)*100)	D (%)	E C*D
2"	1 1/2"					
1 1/2"	1"					
1"	3/4"					
3/4"	1/2"	1200.00	300.00	25.00	80.00	2000.00
1/2"	3/8"	300.00	75.00	25.00	20.00	500.00
	Total	1500.00		TOTAL	100.00	2500.00
Total E	=	2500.00	=	25.00	%	
Total D		100.00				

Fuente: Elaboración propia.

b) Diagramas, tablas.

Tabla 81. Método A, cantidad mínima de muestra en gramos según tamiz.

Tamaño máximo nominal abertura, mm (Pulgadas)	Masa Mínima de la Muestra, g (lb Aprox.)	
9.5	3/8"	200 (0.5)
12.5	1/2"	500 (1.0)
19	3/4"	1500 (3.0)
25	1"	3000 (6.5)
37.5	1 1/2"	7500 (16.5)
50	2"	15000 (33.0)
63	2 1/2"	30000 (66.0)
75	3"	60000 (132.0)
90	3 1/2"	90000 (198.0)

Fuente: Manual de EM 2000 edición 2016, pág. 338.

Tabla 82. Método B, cantidad mínima de muestra en gramos según tamiz.

Tamaño del agregado	Peso en g	
37.5 A 25.0 mm	1 1/2" A 1"	2000
25.4 A 19.0 mm	1" A 3/4"	1500
19.0 A 12.5 mm	3/4" A 1/2"	1200
12.5 A 9.5 mm	1/2" A 3/8"	300

Fuente: Manual de EM 2000 edición 2016, pág. 338.

Tabla 83. Resultados ensayos caras fracturadas agregado grueso 1

Resumen		
	Método A (%)	Método B (%)
% Con una Cara Fracturada		25.00
% Con # Especificado Cara Fracturada	54.18	

Fuente: Elaboración propia.

c) Análisis de la prueba.

Ambos métodos difieren en el porcentaje en más del doble la razón se debe a que en el **método A** considera más de una cara fracturada, mientras en el **método B** solo una cara fracturada, en el caso de usarse en mezclas recicladas frías ambos cumplen los mínimos requeridos de 50% y menor a esta, mas no en mezclas frías con material nuevo que exige que sea mayor a 75% y menor a esta.

3.6.6. Análisis de datos, Partículas chatas y alargadas en agregados, Norma MTC E-223.

a) Procesamiento o cálculos de la prueba.

Agregado reciclado 1 malla 3/8"				
% partículas planas	=	$\frac{\text{N}^\circ \text{ de partículas Planas}}{\text{N}^\circ \text{ total de partículas consideradas}} * 100$		
% partículas planas	=	$\frac{10}{100} * 100$	=	10 %
% partículas alargadas	=	$\frac{\text{N}^\circ \text{ de partículas alargadas}}{\text{N}^\circ \text{ total de partículas consideradas}} * 100$		
% partículas alargadas	=	$\frac{10}{100} * 100$	=	10 %
% partículas cumplen ambas	=	$\frac{\text{N}^\circ \text{ de partículas cumplen ambas}}{\text{N}^\circ \text{ total de partículas consideradas}} * 100$		
% partículas cumplen ambas	=	$\frac{50}{100} * 100$	=	50 %



$$\% \text{ partículas que no cumplen} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de partículas que no cumplen}}{\text{N}^\circ \text{ total de partículas consideradas}} * 100$$

$$\% \text{ partículas que no cumplen} = \frac{30}{100} * 100 = 30 \%$$

Agregado Reciclado 2 malla 3/8"

$$\% \text{ partículas planas} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de partículas Planas}}{\text{N}^\circ \text{ total de partículas consideradas}} * 100$$

$$\% \text{ partículas planas} = \frac{10}{100} * 100 = 10 \%$$

$$\% \text{ partículas alargadas} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de partículas alargadas}}{\text{N}^\circ \text{ total de partículas consideradas}} * 100$$

$$\% \text{ partículas alargadas} = \frac{15}{100} * 100 = 15 \%$$

$$\% \text{ partículas cumplen ambas} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de partículas cumplen ambas}}{\text{N}^\circ \text{ total de partículas consideradas}} * 100$$

$$\% \text{ partículas cumplen ambas} = \frac{45}{100} * 100 = 45 \%$$

$$\% \text{ partículas que no cumplen} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de partículas que no cumplen}}{\text{N}^\circ \text{ total de partículas consideradas}} * 100$$

$$\% \text{ partículas que no cumplen} = \frac{30}{100} * 100 = 30 \%$$

b) Diagramas, tablas.

TABLA 84. % Porcentaje de partículas planas y alargadas.

	Expresión de resultados				
	% partículas planas	% partículas alargadas	% partículas que cumplen ambos criterios	% partículas que no cumplen ningún criterio	% total
Agregado					
Grueso 1	5.00	5.00	40.00	50.00	100.00
Grueso 2	4.00	3.00	44.00	49.00	100.00
Reciclado 1	10.00	10.00	50.00	30.00	100.00
Reciclado 2	10.00	15.00	45.00	30.00	100.00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 85. Tabla 424-01(continuación), requisitos de los agregados pétreos para pavimento asfáltico en frío.

	Ensayo	Requerimiento					
		Agregado grueso	Bajo tránsito Agregado fino	Gradación combinada	Agregado grueso	Tránsito medio Agregado fino	Gradación combinada
Angularidad (Agregado fino)	ASTM D1252		40% mín. (rodadura) 35% mín. (intermedia)			45% mín. (rodadura) 40% mín. (intermedio) 35% mín. (base)	
Coefficiente de pulimento acelerado	UNE 146130	0.45 mín. (rodadura)			0.45 mín. (rodadura)		
Partículas planas y alargadas	MTC E-221	10% máx.			10% máx.		
I.P.	MTC E-111			N.P.			N.P.
Equivalente de arena	MTC E-114			50% mín.			50% mín.
Contenido de impurezas (Agregado grueso)	UNE 14613	0.5% máx.			0.5% máx.		
Adhesividad				75% mín.			
Resistencia conservada inm-comp							

Fuente: Manual de carreteras “Especificaciones generales para la construcción EG-2103 MTC, pág. 606.

c) Análisis de la prueba (comentario de los resultados de la prueba que se realizó).

Los resultados muestran que todos los agregados a excepción del agregado reciclado 2, cumplen lo establecido en la Tabla 424-01 del Manual de carreteras Especificaciones generales para la construcción EG-2103 MTC, referente a los agregados para mezclas asfálticas en frío que establece

porcentajes máximos de chatas y alargadas de 10%, cabe indicar que esta condición no es excluyente para este agregado ya que se deben de analizar muchas otras condiciones.

3.6.7. Análisis de datos, Abrasión en máquina de los ángeles, Norma MTC E-207.

a) Procesamiento o cálculos de la prueba.

Datos: Ensayo abrasión agregado grueso 1 (Huillque)

P1 = 5006.00 g

P2 = 4153.00 g

$$\text{Desgaste (\%)} = \left[\frac{P1 - P2}{P1} \right] * 100\%$$

$$\text{Desgaste (\%)} = \left[\frac{5006.00 - 4153.00}{5006.00} \right] * 100\% = \mathbf{17.0396\%}$$

b) Diagramas, tablas.

Tabla 86. Cantidad de esferas y material de carga según método de ensayo definido.

Gradación	Número de esferas	Masa de la carga (g)
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Fuente: Manual EM 2000, Edición 2016 MTC, pág. 316.

Tabla 87. Gradación de las muestras para el ensayo de desgaste de los ángeles.

Medida de tamiz (abertura cuadrada)		Masa de tamaño indicado, g			
Que pasa	Retenido sobre	Gradación			
		A	B	C	D
37.5 mm (1 1/2")	25.0 mm (1")	1250 ± 25	-	-	-
25.0 mm (1")	19.0 mm (3/4")	1251 ± 25	-	-	-
19.0 mm (3/4")	12.5 mm (1/2")	1252 ± 10	2500 ± 10	-	-
12.5 mm (1/2")	9.5 mm (3/8")	1253 ± 10	2501 ± 10	-	-
9.5 mm (3/8")	6.3 mm (1/4")	-	-	2500 ± 10	-
6.3 mm (1/4")	4.75 mm (N°4)	-	-	2500 ± 10	-
4.75 mm (N°4)	2.36 mm (N°8)	-	-	-	5000 ± 10
Total		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Fuente: Manual EM 2000, Edición 2016 MTC, pág. 316.

Tabla 88. Ensayo de desgaste de los ángeles para el agregado grueso 1.

Material	Expresión de resultados		
	P1 (g)	P2 (g)	Desgaste (%)
Agregado grueso	5006.00	4153.00	17.04

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 89. De la tabla 424-01, Requisitos de los agregados pétreos para pavimento asfáltico en frío.

	Ensayo	Requerimiento					
		Bajo tránsito			Tránsito medio		
		Agregado grueso	Agregado fino	Gradación combinada	Agregado grueso	Agregado fino	Gradación combinada
Desgaste de los Ángeles	MTC E-207	25% máx. (rodadura) 35% máx. (intermedia)			25% máx. (rodadura) 35% máx. (intermedio y base)		
Desgaste Micro-Deval	ASTM D 7428				25% máx. (rodadura) 35% máx. (intermedio y base)		
10% de finos (KN)	Seco Relación húmedo/seco						
Pérdidas en ensayos de solidez	Sulfato de Na	MTC E-209	12% máx.	12% máx.		12% máx.	12% máx.
	Sulfato de Mg		18% máx.	18% máx.		18% máx.	18% máx.
Partículas fracturadas mecánicamente (agregado grueso) % mínimo 1 cara/2 caras		MTC E-210	75/- (rodadura)60/- (intermedia)			75/60 (rodadura)75/- (intermedia)60/- (intermedia)	

Fuente: Manual de carreteras “Especificaciones generales para la construcción EG-2013 MTC, pág. 606.

c) Análisis de la prueba.

Para agregados gruesos de bajo, medio y alto tránsito el porcentaje de abrasión debe de ser como máximo de **25%**, el valor del agregado grueso 1 (Huillque) es de **17%**; por tanto está dentro de lo especificado en la tabla 424-01 del Manual EG-2013 MTC, esto quiere decir que se tiene una buena resistencia al desgaste, los otros agregados gruesos nuevos y reciclados llegan hasta 22%, en tal sentido todos los agregados gruesos cumplen lo indicado en la norma.

3.6.8. Análisis de datos, Durabilidad al sulfato de sodio y/o magnesio, Norma MTC E-209.

a) Procesamiento o cálculos de la prueba.

**% de pérdida agregado fino 1**

Diferencia de pesos =	Peso inicial	-	Peso final	=	
Diferencia peso malla N°4 =	51.111	-	51.085	=	0.026 g
Diferencia peso malla N°8 =	50.490	-	49.252	=	1.238 g
Diferencia peso M. N°30 =	50.883	-	50.328	=	0.555 g
Diferencia peso M. N°50 =	50.185	-	46.322	=	3.863 g

$$\% \text{ pérdida después del ensayo} = \frac{\text{Diferencia de peso}}{\text{Peso antes del ensayo}} * 100 \%$$

$$\% \text{ pérdida después del ensayo malla N}^\circ 4 = \frac{0.026}{51.111} * 100 = \mathbf{0.051 \%$$

$$\% \text{ pérdida después del ensayo malla N}^\circ 8 = \frac{1.238}{50.490} * 100 = \mathbf{2.452 \%$$

$$\% \text{ pérdida después del ensayo malla N}^\circ 30 = \frac{0.555}{50.883} * 100 = \mathbf{1.091 \%$$

$$\% \text{ pérdida después del ensayo malla N}^\circ 50 = \frac{3.863}{50.185} * 100 = \mathbf{7.698 \%$$

$$\% \text{ de pérdidas corregida} = \frac{\% \text{ retenido muestra original} * \% \text{ pérdidas después del ensayo}}{100\%}$$

$$\% \text{ de pérdidas corregida malla N}^\circ 4 = \frac{13.760 * 0.051}{100} = \mathbf{0.007 \%$$

$$\% \text{ de pérdidas corregida malla N}^\circ 8 = \frac{28.870 * 2.452}{100} = \mathbf{0.708 \%$$

$$\% \text{ de pérdidas corregida malla N}^\circ 30 = \frac{28.170 * 1.091}{100} = \mathbf{0.307 \%$$

$$\% \text{ de pérdidas corregida malla N}^\circ 50 = \frac{10.570 * 7.698}{100} = \mathbf{0.814 \%$$

$$\text{Porcentaje total de pérdida} = \mathbf{1.836 \%$$

b) Diagramas, tablas.**Tabla 90. % de pérdida por durabilidad al sulfato de magnesio.**

Expresión de resultados	
Muestra	%
Agregado Fino 1	1.836
Agregado Fino 2	0.573
Agregado Fino reciclado 2	2.070
Agregado Fino Reciclado 1	2.284
Agregado Grueso 1	0.473
Agregado Grueso 2	0.238
Agregado Grueso Reciclado 1	0.067
Agregado Grueso Reciclado 2	0.076
Pérdida total	7.617

Fuente: Elaboración propia.

c) Análisis de la prueba.

De acuerdo a la **tabla 424-01 del manual EG-2013 (Tabla 89)**, el porcentaje máximo de pérdidas por sulfato de Magnesio es de **18%**, para agregados finos; el ensayo nos determina un porcentaje total de pérdidas de **1.836%** muy por debajo del límite por tanto el **agregado fino1** es muy resistente al paso del intemperismo o desintegración por el paso del tiempo que se quiere simular con este ensayo, tal como se tiene en la **Tabla 90**, para el agregado fino 1; también se observa en esta tabla que las pérdidas por acción del sulfato de magnesio son muy bajos en todos los agregados; el cual nos garantiza la durabilidad de estos ante el paso del tiempo por acción del intemperismo.

3.6.9. Análisis de datos, Equivalente de arena de agregado fino, Norma MTC E-114.**a) Procesamiento o cálculos de la prueba.****Ecuación.**

$$SE = \frac{LS}{LC} * 100\%$$



Donde:

LS = Lectura de arena

LC = Lectura de arcilla

SE = Equivalente de arena.

Agregado Fino 1

$$\text{SE(f1a)} = \frac{3.2}{5.4} * 100\% = 59.26\%$$

$$\text{SE(f1b)} = \frac{4.1}{7.3} * 100\% = 56.16\%$$

$$\text{SE(f1c)} = \frac{5.3}{8.2} * 100\% = 64.63\%$$

$$\text{SE(f1pro)} = \frac{59.26\% + 56.16\% + 64.63\%}{3} = \mathbf{60.02\%}$$

Agregado Fino 2

$$\text{SE(f2a)} = \frac{4.3}{5.6} * 100\% = 76.79\%$$

$$\text{SE(f2b)} = \frac{4.7}{7.2} * 100\% = 65.28\%$$

$$\text{SE(f2c)} = \frac{5.8}{8.4} * 100\% = 69.05\%$$

$$\text{SE(f2pro)} = \frac{76.79\% + 65.28\% + 69.05\%}{3} = \mathbf{70.37\%}$$

b) Diagramas, tablas.**Tabla 91. Resultados equivalente de arena de agregados finos ensayados.**

	<i>Expresión de resultados</i>			
	Agregado fino 1	Agregado fino 2	Agregado fino 1 reciclado	Agregado fino 2 reciclado
Muestra				
1	59.26%	76.79%	86.54%	76.47%
2	56.16%	65.28%	60.26%	64.38%
3	64.63%	69.05%	67.90%	69.05%
Promedio	60.02%	70.37%	71.57%	69.97%

Fuente: Elaboración propia.

c) Análisis de la prueba.

Según la **Tabla 91**. Se observa que el agregado fino 1 tiene 60% en su equivalente de arena como promedio, en la **Tabla 77** de la presente tesis sacada de la norma indica un equivalente de arena mínimo de 50%, en tal sentido el agregado fino 1 cumple dicho criterio así como todo los agregados finos utilizados incluyendo los agregados reciclados.

3.6.10. Análisis de datos, Angularidad de agregado fino, Norma MTC E-222.**a) Procesamiento o cálculos de la prueba.**

Ecuación.

$$A^{\circ} = \frac{V - \frac{W}{G_{sb}}}{V} \times 100$$

Donde:

V = Volumen del recipiente conocido (cm³)

W = Peso de la muestra (g)



Gsb = Densidad del agregado (g/cm³)

A° = Angulosidad (%)

Angularidad agregado fino 1 Tamiz N° 50.

Datos.

$$V = 81.6823 \text{ cm}^3$$

$$W = 126 \text{ g}$$

$$Gsb = 2.6154 \text{ g/cm}^3$$

$$A^\circ(f1\#50) = \frac{81.6823 - \frac{126}{2.6154}}{81.6823} = 41.02 \%$$

Angularidad agregado fino 1 Tamiz N° 200.

Datos.

$$V = 81.6823 \text{ cm}^3$$

$$W = 129 \text{ g}$$

$$Gsb = 2.6154 \text{ g/cm}^3$$

$$A^\circ(f1\#200) = \frac{81.6823 - \frac{129}{2.6154}}{81.6823} = 39.62 \%$$

b) Diagramas, tablas.**Tabla 92. Resumen Angularidad en %, de agregados finos ensayados.**

Tamiz	Expresión de resultados (%)			
	Agregado fino 1	Agregado fino 2	A. reciclado 1	A. reciclado 2
N° 50	41.02	44.24	43.60	45.46
N° 200	39.62	42.70	41.76	45.48

Fuente: Elaboración propia.

c) Análisis de la prueba.

Según la **Tabla 92**. Se puede observar que la Angularidad de agregado fino 1 se encuentra entre 41% y 39.6%, que son aceptables para este agregado ya que de acuerdo a lo indicado en la **Tabla 85** de la presente tesis, donde se tienen los mínimos requeridos para angulosidad de agregados (Manual EG 2013 MTC), este debe ser como mínimo 40% en vías de bajo tránsito y de 45% en vías de mediano tránsito; por tanto si cumple lo indicado en la norma; además también podemos ver que los resultados de los otros agregados incluidos los reciclados también se encuentran dentro de lo indicado en la norma.

3.6.11. Análisis de datos, Extracción cuantitativa de asfalto en mezclas asfálticas, Norma MTC E-502.**a) Procesamiento o cálculos de la prueba.**

Cálculo del porcentaje de asfalto en la muestra ensayada:

$$\% \text{ de asfalto} = \left[\frac{W1 - W2}{W1 - W2} - \frac{W3 + W4}{W1 - W2} \right] * 100$$

Donde:

W1 = Peso de la muestra inicial (g)

W2 = Peso de agua en la muestra inicial (g)

W3 = Peso de la muestra lavada (g)

W4 = Peso materia mineral muestra lavada (g)



Lavado de asfalto reciclado2.

$$\% \text{ de asfalto 1} = \left[\frac{1500.21 - 0}{1500.21 - 0} - \frac{1420.60 + 7.41}{0} \right] * 100 = 4.81 \%$$

$$\% \text{ de asfalto 2} = \left[\frac{1500.00 - 0}{1500.00 - 0} - \frac{1410.10 + 20.00}{0} \right] * 100 = 4.66 \%$$

$$\% \text{ de asfalto 3} = \left[\frac{1500.00 - 0}{1500.00 - 0} - \frac{1439.40 + 20.00}{0} \right] * 100 = 2.71 \%$$

$$\% \text{ de asfalto 4} = \left[\frac{1500.00 - 0}{1500.00 - 0} - \frac{1446.00 + 20.00}{0} \right] * 100 = 2.27 \%$$

$$\% \text{ de asfalto 5} = \left[\frac{1500.00 - 0}{1500.00 - 0} - \frac{1444.50 + 20.00}{0} \right] * 100 = 2.37 \%$$

$$\% \text{ de asfalto 6} = \left[\frac{1500.00 - 0}{1500.00 - 0} - \frac{1413.10 + 20.00}{0} \right] * 100 = 4.46 \%$$

$$\% \text{ de asfalto 7} = \left[\frac{1500.00 - 0}{1500.00 - 0} - \frac{1426.70 + 20.00}{0} \right] * 100 = 3.55 \%$$

$$\% \text{ de asfalto 8} = \left[\frac{1500.00 - 0}{1500.00 - 0} - \frac{1408.00 + 22.00}{0} \right] * 100 = 4.67 \%$$

$$\% \text{ de asfalto 9} = \left[\frac{1500.00 - 0}{1500.00 - 0} - \frac{1411.00 + 22.00}{0} \right] * 100 = 4.47 \%$$

$$\% \text{ de asfalto 10} = \left[\frac{1500.00 - 0}{1500.00 - 0} - \frac{1415.00 + 22.00}{0} \right] * 100 = 4.20 \%$$

$$\% \text{ de asfalto 11} = \left[\frac{1500.00 - 0}{1500.00 - 0} - \frac{1409.00 + 22.00}{0} \right] * 100 = 4.60 \%$$

$$\% \text{ de asfalto 12} = \left[\frac{1500.00 - 0}{1500.00 - 0} - \frac{1420.00 + 22.00}{0} \right] * 100 = 3.87 \%$$

b) Diagramas, tablas.**Tabla 93. Resumen porcentaje de asfalto en carpetas asfálticas recicladas.**

Muestra	% Asfalto promedio
Reciclado 1	4.00
Reciclado 2	3.96

Fuente: Elaboración propia.

c) Análisis de la prueba.

Si revisamos los resultado del lavado de asfalto reciclado 2, podemos ver que los valores fluctúan entre 2.2% y 4.6% dando un resultado promedio de 3.96% como se observa en la **Tabla 93**, este ensayo puede conllevar a muchos errores por ello es recomendable realizar el mayor número de lavados posible, para la presente tesis se realizó 30 lavados de asfalto 15 para el primer reciclado y 15 para el segundo reciclado, y como podemos observar en el cuadro resumen de la **Tabla 93** podemos afirmar que el porcentaje de asfalto en estos pavimentos asfálticos reciclados es de **4%**.

3.6.12. Análisis de datos, Penetración de materiales bituminosos, Norma MTC E-304.**a) Procesamiento o cálculos de la prueba.****Ecuación 1.**

$$P = \frac{p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 + p_7 + p_8 + p_9 + p_{10} + p_{11} + p_{12} + p_{13} + p_{14} + p_{15}}{N}$$

Donde:

P = Penetración promedio (P(50))

p = Penetración por prueba

N = Número de pruebas.

**Penetración muestra 1.**

$$P = \frac{270 + 57 + 187 + 228 + 179 + 198 + 194 + 171 + 155 + 142 + 140 + 115 + 119 + 110 + 131}{15}$$

$$P = 159.73 \text{ dmm}$$

Ecuación 2.

$$P(100) = P(50) * \sqrt{2}$$

$$P1(100) = 159.73 * 1.41 = 225.90 \text{ dmm}$$

$$P2(100) = 99.67 * 1.41 = 140.95 \text{ dmm}$$

b) Diagramas, tablas.**Tabla 94. Resumen penetración de asfalto.**

Muestra	Penetración (dmm)	
	Estimado	Redondeo
1	159.73	160.00
2	99.67	100.00
Promedio	129.70	130.00

Fuente: Elaboración propia.

c) Análisis de la prueba.

Si revisamos los resultados de penetración de asfalto en el cuadro resumen de la **Tabla 94**, podemos observar que la penetración para la muestra 1 es de 160 dmm y para la muestra 2 es de 100 dmm, teniendo un promedio de 130 dmm que es el que tomamos como penetración (dureza o consistencia del asfalto) que se está utilizando (emulsión asfáltica).

3.6.13. Análisis de datos, Carga de partículas de emulsiones asfálticas, Norma MTC E-407.

1. Procesamiento o cálculos de la prueba.

No amerita ningún cálculo ya que el ensayo es netamente visual, lo que observa es el grado de recubrimiento en uno u otro electrodo de acero inoxidable utilizado, si la emulsión al ser sometida a 8mA registra una adherencia en el ánodo se dice que la emulsión es aniónica, si la emulsión registra recubrimiento o adherencia en el cátodo se dice que la emulsión es catiónica, prueba termina cuando el potencial de carga desciende a 2mA o se cumplen 30 minutos, todo este proceso se lleva a cabo a 50 °C.

2. Diagramas, Tablas.

Tabla 95. Resumen Carga de partículas de emulsión asfáltica.

Muestra	Carga	
	Catiónica	Aniónica
1	x	
2	x	
3	x	

Fuente: Elaboración propia.

3. Análisis De La Prueba.

Las muestras de emulsión desprenden o condicionan que la emulsión es catiónica en los tres ensayos realizados por tanto se concluye que la emulsión asfáltica es de tipo catiónica, cabe indicar que como la celda es de tipo electrolítica se invierte la polaridad de la batería o dispositivo de aporte de energía.

3.6.14. Análisis de datos, Recubrimiento y adherencia, manual americano MS-19.

a) Procesamiento o cálculos de la prueba.

No amerita ningún cálculo ya que el ensayo es netamente visual, según lo indica el manual americano MS-19, en ensayo indica que se debe tomar una muestra de agregado de no más de 500

g, el mismo que debe de estar lavado y secado previamente, este se recubre con la emulsion asfáltica a temperatura ambiente y se mezcla por espacio de 1 a 2 minutos luego del cual se lleva al horno de secado a 60°C por un tiempo de 24 horas donde se acelera el curado luego del cual se observa si hay buen recubrimiento o no, el agregado grueso 1 presenta un recubriendo casi total a l igual que el agregado grueso 2 ; los finos también tienen un buen recubrimiento; así como los agregados reciclados, en cuanto a la adherencia el manual indica someter una muestra de 100 gr. A la acción del agua en ebullición por 3 minutos tiempo en el cual se be ser si hay o no desprendimiento de asfalto; en todos los agrega gados hay desprendimiento podríamos decir de hasta un 20%, esto puede deberse al tiempo de curado inadecuado u alguna propiedad del agregado; se concluye que todos los agregados cumplen visualmente por lo menos a un 90% las condiciones exigidas.

b) Diagramas, tablas.

Tabla 96. Resumen Recubrimiento y adherencia de emulsión asfáltica.

Muestra	Condición	
	Recubrimiento 95%	Adherencia 90%
Agregado grueso 1	si cumple	si cumple
Agregado grueso 2	si cumple	si cumple
Agregado fino 1	si cumple	si cumple
Agregado fino 2	si cumple	si cumple
Agregado reciclado 1	si cumple	si cumple
Agregado reciclado 2	si cumple	si cumple

Fuente: Elaboración propia.

c) Análisis de la prueba.

Los agregados cumplen visualmente las condiciones dadas en el manual americano MS-19 pág. 97, donde nos da la metodología de evaluación para la selección de agregados; así como de la emulsión asfáltica en ambos se observa buen recubrimiento y adherencia, por tanto se pueden utilizar todos los agregados con la emulsión asfáltica propuesta.

3.6.15. Análisis de datos, Viscosidad de Saybolt Furol de emulsiones asfálticas, Norma MTC E-403.

a) Procesamiento o cálculos de la prueba.

No amerita ningún cálculo importante el procedimiento es con la ayuda de un equipo que mide la viscosidad en un sistema denominado Saybol Furol, en el cual la emulsión asfáltica se agita a temperatura de 20°C y 50°C evitando la formación de burbujas de aire, en una cantidad aproximada de 60 cm³, pasa por este sistema que tiene cierto grado de inclinación y un filtro en malla N°20, en el cual lo importante es tomar el tiempo que tarda en salir la emulsión del equipo a las temperaturas indicadas y de llenar el recipiente de 60 cm³ a la salida.

b) Diagramas, tablas.

Tabla 97. Resumen Viscosidad Saybolt Furol para emulsión asfáltica.

Muestra	Condición			
	Temperatura (°C)	Peso (gr)	Volumen (cm ³)	Tiempo (seg)
1	25	57	60	110
2	25	57	60	110
3	25	57	60	110
4	25	57	60	110
5	25	57	60	110
6	25	57	60	110

Fuente: Elaboración propia.

c) Análisis De La Prueba.

La viscosidad esta medida en unidades de poise : 1 poise = 100 centipoise = 1 gr /cm-seg = 0.1 Pa-seg; teniendo esto en consideración se debe saber el peso o masa de la emulsión a ingresar en un volumen de 60cm³, la distancia o recorrido que realiza la emulsión en el sistema de entrada y salida, los tiempos de los mismos condicionados por la temperatura de 25°C y 50°C.

3.6.16. Análisis de datos, Destilación de emulsiones asfálticas, Norma MTC E-401.

a) Procesamiento o cálculos de la prueba.

Este ensayo se realiza en un equipo especial de destilación que consta de una retorta de aluminio y un sistema de calentamiento y enfriamiento, para la determinación del residuo de asfalto primero se debe de pesar la retorta con su tapa y todos sus accesorios incluidos los termómetros acoplados ya que en ella se llena la emulsión una vez lleno se pesa nuevamente esta vez con la emulsión; se procede a calentar la retorta hasta unos 260°C por un tiempo de 15 minutos, transcurrido este tiempo se pesa el aceite destilado en el sistema y el residuo de asfalto el cual queda en la retorta.

Ecuación.

$$R(\%) = \frac{(P_f - P_t) + 1,5}{P_i - P_t} \times 100$$

Donde :

- R(%) = Residuo por destilación
- Pt = Peso retorta y accesorios
- Pi = Peso retorta y accesorios + emulsión asfáltica
- Pf = Peso retorta y accesorios + residuo

Residuo de asfalto emulsión asfáltica utilizada.

$$R1(\%) = \frac{((532.50 - 500) + 1.5) * 100}{560.5 - 500} = 56.20 \%$$

$$R2(\%) = \frac{((532.50 - 500) + 1.5) * 100}{560.5 - 500} = 56.20 \%$$

$$R3(\%) = \frac{((532.50 - 500) + 1.5) * 100}{560.5 - 500} = 56.20 \%$$

$$R4(\%) = \frac{((532.50 - 500) + 1.5) * 100}{560.5 - 500} = 56.20 \%$$

$$R5(\%) = \frac{((532.50 - 500) + 1.5) * 100}{560.5 - 500} = 56.20 \%$$

b) Diagramas, tablas.**Tabla 98. Resumen residuo por destilación de emulsión asfáltica.**

Emulsión Asfáltica	
Muestra	Residuo por destilación (%)
1	56.20
2	56.20
3	56.20
4	56.20
5	56.20

Fuente: Elaboración propia.

c) Análisis de la Prueba.

El residuo por destilación o porcentaje de asfalto en la emulsión asfáltica, es muy importante ya que con ello se determina la cantidad de emulsión asfáltica a utilizar en el diseño de mezcla sea este el patrón o con agregados reciclados con esto se determina el contenido estimado de asfalto y con ello se hacen las aproximaciones de +1% ó -1% de emulsión, en la determinación porcentual de diseño de mezcla asfáltica.

3.6.17. Análisis de datos, Peso específico aparente y peso unitario de mezclas asfálticas compactadas saturados con superficie seca, Norma MTC E-514.**a) Procesamiento o cálculos de la prueba.**

Datos:

Tabla 99. Briquetas diseñadas al 25% de agregado reciclado y 5.25% de emulsión asfáltica.

N° de Muestra	Datos considerados				
	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso seco en gramos (A)	Peso sumergido en agua a 25°C en gramos (C)	Peso superficialmente seco SSS en gramos (B)
A4	10.34	7.03	1270.30	694.30	1272.10
A5	10.33	7.00	1267.20	693.10	1269.20
A6	10.16	7.06	1212.80	654.30	1214.20

Fuente: Elaboración propia.

**Ecuación peso específico aparente a 25 °C.**

$$\text{Peso Específico Aparente a } 25^{\circ}\text{C} = \frac{A}{(B - C)} * k$$

$$\text{Peso Específico Aparente a } 25^{\circ}\text{C muestra 1} = \frac{1270.30}{1272.10 - 694.30} * 0.9989 = \mathbf{2.20}$$

$$\text{Peso Específico Aparente a } 25^{\circ}\text{C muestra 2} = \frac{1267.20}{1269.20 - 693.10} * 0.9989 = \mathbf{2.20}$$

$$\text{Peso Específico Aparente a } 25^{\circ}\text{C muestra 3} = \frac{1212.80}{1214.20 - 654.30} * 0.9989 = \mathbf{2.16}$$

Ecuación peso unitario a 25°C.

$$\text{Peso Unitario a } 25^{\circ}\text{C} = \text{Peso Específico Aparente a } 25^{\circ}\text{C} * 0.997 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Peso Unitario del agua a } 25^{\circ}\text{C} = 0.997 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Peso unitario a } 25^{\circ}\text{C muestra 1} = 2.20 * 0.997 \text{ g/cm}^3 = \mathbf{2.19 \text{ g/cm}^3}$$

$$\text{Peso unitario a } 25^{\circ}\text{C muestra 2} = 2.20 * 0.997 \text{ g/cm}^3 = \mathbf{2.19 \text{ g/cm}^3}$$

$$\text{Peso unitario a } 25^{\circ}\text{C muestra 3} = 2.16 * 0.997 \text{ g/cm}^3 = \mathbf{2.16 \text{ g/cm}^3}$$

Ecuación % de absorción de agua.

$$\% \text{ de agua absorbido} = \frac{B - A}{B - C} * 100$$

$$\% \text{ de agua absorbido muestra 1} = \frac{1272.10 - 1270.30}{1272.10 - 694.30} * 100 = \mathbf{0.31 \%}$$



$$\% \text{ de agua absorbido muestra 2} = \frac{1269.20 - 1267.20}{1269.20 - 693.10} * 100 = 0.35 \%$$

$$\% \text{ de agua absorbido muestra 3} = \frac{1214.20 - 1212.80}{1214.20 - 654.30} * 100 = 0.25 \%$$

Ecuación de densidad.

$$\text{Densidad} = \text{Peso específico aparente} * \text{Densidad absoluta del agua a } T^{\circ} * \text{Factor de corrección (K)}$$

b) Diagramas, tablas.

Tabla 100.

Factor de corrección K de temperatura del agua.

Temperatura °C	Densidad Absoluta del agua	factor de corrección K
10	0.999728	1.002661
11	0.999634	1.002567
12	0.999526	1.002458
13	0.999406	1.002338
14	0.999273	1.002204
15	0.999129	1.002060
16	0.998972	1.001903
17	0.998804	1.001734
18	0.998625	1.001555
19	0.998435	1.001364
20	0.998234	1.001162
21	0.998022	1.000950
22	0.997801	1.000728
23	0.997569	1.000495
24	0.997327	1.000253
25	0.997075	1.000000
26	0.996814	0.999738
27	0.996544	0.999467
28	0.996264	0.999187
29	0.995976	0.998898
30	0.995678	0.998599

Fuente: Manual de ensayo de materiales EM 2000, edición 2016.

Tabla 101. Peso específico y densidad de briquetas con agregado reciclado al 25% y 5.25% de emulsión asfáltica con temperatura del agua a 25°C.

Muestra	Peso específico aparente	Peso unitario (g/cm3)	% de agua absorbido	Densidad (g/cm3)
A4	2.20	2.19	0.31	2.196
A5	2.20	2.19	0.35	2.198
A6	2.16	2.16	0.25	2.164
Promedio	2.19	2.18	0.30	2.186

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 102. Resumen peso específico y densidad de briquetas con agregado reciclado al 25% y 4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25% y 6.75% de emulsión asfáltica con temperatura del agua a 25°C.

% emulsión asfáltica	Peso específico aparente (Gmb)	Densidad promedio (gr/cm3)
4.75	2.1788	2.1792
5.25	2.1857	2.1861
5.75	2.1989	2.1993
6.25	2.1712	2.1715
6.75	2.1594	2.1597

Fuente. Elaboración propia.

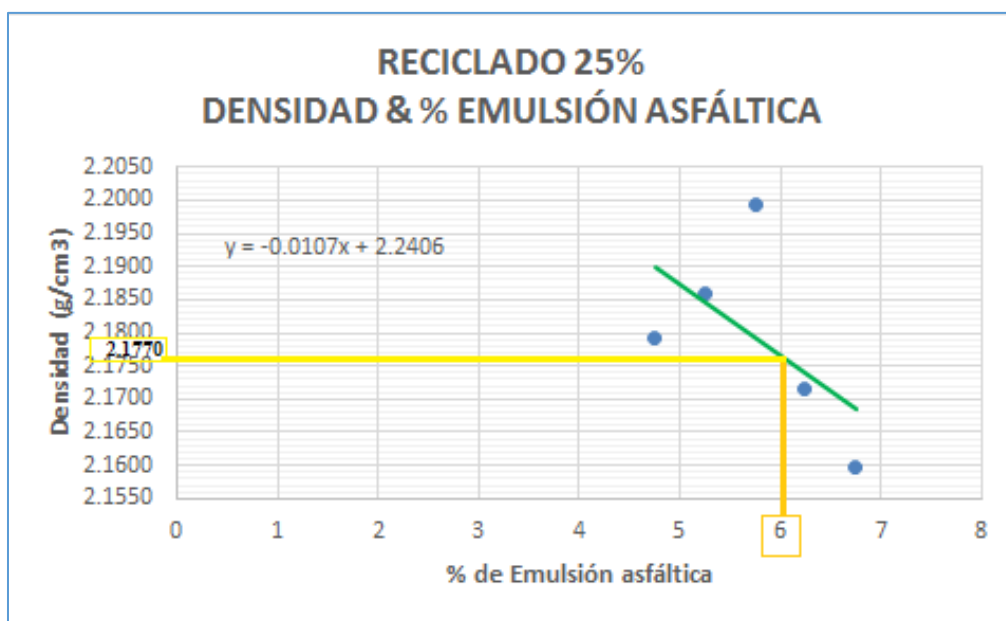


Figura 58. Densidad mezcla reciclada 25%, (Fuente: Elaboración Propia).

**c) Análisis de la prueba.**

Realizado el ensayo de peso específico aparente a este grupo de briquetas (agregado reciclado al 25%, con porcentaje de emulsión asfáltica al 5.25% en peso, con las ecuaciones descritas se halla los valores de peso específico aparente, peso unitario y densidad de las briquetas en referencia, esto mismo se realiza a todo el grupo de briquetas de ensayo; es decir mezcla patrón, con agregado reciclado al 25%, 33.33%, 50% y con porcentajes de emulsión asfáltica de 4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25%, 6.75%; a un total de 60 briquetas, la **Figura 58 (densidad & %de emulsión)**, determina la densidad de la mezcla asfáltica al 6% de emulsión (% de emulsión asfáltica óptimo), cabe indicar que este 6% de emulsión asfáltica óptimo, es determinado con el porcentaje de vacíos de aire de las mezclas evaluadas definida con el ensayo correspondiente.

3.6.18. Análisis de datos, Peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas, Norma MTC E-508.**a) Procesamiento o cálculos de la prueba.**

Ecuación peso específico teórico máximo (Gmm).

$$Gmm = \frac{W_{muestra}}{W_{muestra} + W_{picnómetro+agua} - W_{después\ ensayo}}$$

Donde:

Gmm = Peso específico Máximo de la muestra

W muestra = Peso de la muestra

W picnómetro + agua = Peso picnómetro lleno de agua a 25°C

W después del ensayo = Peso de la muestra total (agua + picnómetro + muestra)



Datos.

Tabla 103. Mezclas diseñadas al 33.33% de agregado reciclado y 4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25%, 6.75% de Emulsión asfáltica para ensayo peso específico teórico máximo.

% Emulsión Asfáltica	Peso muestra seca (g) (Wmuestra)	Peso picnómetro seco y vacío (g) (Wpicnómetro)	Peso picnómetro + muestra (g) (Wpicnómetro + muestra)	Peso picnómetro lleno de agua a 25°C (g) (Wpicnómetro + agua)	Peso picnómetro + muestra + agua a 25°C (g) (Wdespués del ensayo)
Mezcla reciclada 33.33%					
4.75	938.10	273.40	1211.50	1140.80	1680.00
5.25	946.10	273.40	1219.50	1140.80	1686.30
5.75	941.40	273.40	1214.80	1140.80	1682.60
6.25	965.80	273.40	1239.20	1140.80	1681.50
6.75	951.90	273.40	1225.30	1140.80	1681.40

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Gmm (REC 33.33\%,4.75\%)} = \frac{932.90}{932.90 + 1140.80 - 1680.00}$$

$$\text{Gmm (REC 33.33\%,4.75\%)} = \mathbf{2.370}$$

$$\text{Gmm (REC 33.33\%,5.25\%)} = \frac{940.90}{940.90 + 1140.80 - 1686.30}$$

$$\text{Gmm (REC 33.33\%,5.25\%)} = \mathbf{2.380}$$

$$\text{Gmm (REC 33.33\%,5.75\%)} = \frac{936.20}{936.20 + 1140.80 - 1682.60}$$

$$\text{Gmm (REC 33.33\%,5.75\%)} = \mathbf{2.374}$$

$$\text{Gmm (REC 33.33\%,6.25\%)} = \frac{960.60}{960.60 + 1140.80 - 1681.50}$$

$$\text{Gmm (REC 33.33\%,6.75\%)} = \mathbf{2.331}$$

b) Diagramas, tablas.

Tabla 104. Resumen Determinación peso específico teórico máximo (Gmm) de la mezcla diseñada al 33.33% de agregado reciclado y 4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25%, 6.75% de Emulsión asfáltica.

% Emulsión Asfáltica	Peso específico teórico máximo de la mezcla asfáltica al 33.33% de agregado reciclado (Gmm)
4.75	2.37
5.25	2.38
5.75	2.37
6.25	2.29
6.75	2.33

Fuente. Elaboración propia.

c) Análisis de la prueba.

La densidad teórica máxima de mezclas asfálticas es un factor muy importante ya que al determinarlo forma parte de la ecuación de porcentaje de vacíos, su cálculo es similar a la determinación de peso específico de agregados finos, la diferencia radica en que el material de carga es una mezcla asfáltica, este debe de ser preparado y curado por lo menos 7 días del cual se extraen las partículas mayores a 6mm, luego es llenado en un matraz con agua a 25 °C y se extrae el aire en vacío se toman los pesos y sus diferencias para determinar la densidad teórica máxima.

3.6.19. Análisis de datos, Porcentaje de vacíos de aire, Norma MTC E-505.**a) Procesamiento o cálculos de la prueba.**

Ecuación porcentaje de vacíos de aire (Pa).

$$Pa = \left[\frac{Gmm - Pea}{Gmm} \right] * 100$$

Donde:

- Pa = Porcentaje de vacíos de aire
- Gmm = Peso específico teórico máximo
- Pea = Peso específico aparente

Datos.

Tabla 105. *Peso específico teórico máximo (Gmm) y peso específico aparente (Pea) de briquetas diseñadas al 50% de agregado reciclado y 4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25%, 6.75% de Emulsión asfáltica para determinación de % de vacíos de aire (Pa).*

% Emulsión Asfáltica	Peso Específico Máximo de la Muestra (Gmm)	Peso Específico Aparente (Pea)
Mezcla Reciclada 50%		
4.75	2.414	2.228
5.25	2.358	2.228
5.75	2.357	2.223
6.25	2.316	2.213
6.75	2.277	2.192

Fuente: Elaboración propia.

$$Pa (REC50\%,4.75\%) = \left[\frac{2.414 - 2.228}{2.414} \right] * 100$$

Pa (REC50%,4.75%) = **7.699 %**

$$Pa (REC50\%,5.25\%) = \left[\frac{2.358 - 2.228}{2.358} \right] * 100$$

Pa (REC50%,5.25%) = **5.510 %**

$$Pa (REC50\%,5.75\%) = \left[\frac{2.357 - 2.223}{2.357} \right] * 100$$

Pa (REC50%,5.75%) = **5.698 %**

$$Pa (REC50\%,6.25\%) = \left[\frac{2.316 - 2.213}{2.316} \right] * 100$$

$$Pa (REC50\%,6.25\%) = 4.458 \%$$

$$Pa (REC50\%,6.75\%) = \left[\frac{2.277 - 2.192}{2.277} \right] * 100$$

$$Pa (REC50\%,6.75\%) = 3.761 \%$$

b) Diagramas, tablas.

Tabla 106. Resumen Determinación del porcentaje de vacíos de aire (Pa) de briquetas diseñadas al 50% de agregado reciclado y 4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25%, 6.75% de Emulsión asfáltica.

Mezcla reciclada 50%	
% Emulsión asfáltica	Vacíos de aire mezcla compactada (Pa) %
4.75	7.699
5.25	5.510
5.75	5.698
6.25	4.458
6.75	3.761

Fuente. Elaboración propia.

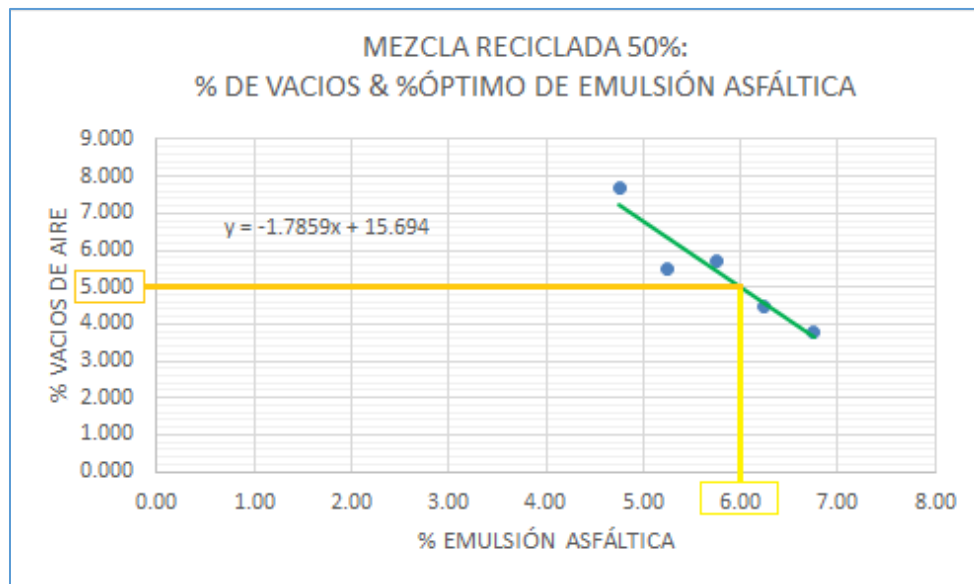


Figura 59. Porcentaje de vacío de aire y porcentaje óptimo de emulsión asfáltica en mezcla con agregado reciclado al 50%, (Fuente: Elaboración propia).



c) Análisis de la prueba.

Se tiene la ecuación que relaciona el peso específico teórico máximo (Gmm) y el peso específico aparente (Pea), de mezclas asfálticas compactadas (briquetas de mezcla asfáltica), con ello se determina el porcentaje de vacíos de aire en la briqueta (Pa); en el desarrollo se determina el porcentaje de vacíos para una mezcla con emulsión asfáltica al 4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25%, 6.75% con 50% de agregado reciclado; según el manual MS-14, el porcentaje de vacíos en emulsiones está en el rango de 4% a 6% y en el manual EG-2013 para mezclas en frío está entre 2% y 8%, con ello toma el promedio que es 5%, el cual se intercepta con los 5 puntos dispersos calculados, encontrando la ecuación lineal (línea o curva de tendencia) de los puntos hallados y se intercepta el porcentaje de vacíos promedio con la línea de tendencia del cual se tiene el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica que es 6%; con se observa en la **figura 59**.

3.6.20. Análisis de datos, Estabilidad y flujo Marshall, Norma MTC E-504.

a) Procesamiento o cálculos de la prueba.

- Se toman las medidas de diámetro, altura y peso de la briqueta a ensayar.
- Se sumergen las briquetas en baño maría a 60°C de temperatura por un lapso de 30 a 40 minutos antes de realizar el ensayo.
- Se carga la briqueta a la equipo Marshall, con ayuda de las mordagas de sugestión, cuidando que el nivel de separación de medida de flujo sea ligeramente superior al de estabilidad.
- Se realiza el ensayo en no más de 30 segundos, se registran los datos.

b) Diagramas, tablas.

Datos.

Tabla 107. Briquetas de mezcla patrón para ensayo de estabilidad y flujo, al 4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25%, 6.75% de Emulsión asfáltica.

% de emulsión asfáltica 4.75					
Muestra patrón	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Estabilidad (KN)	Flujo (mm)
PM1	10.245	6.825	1227.00	44.50	4.453
PM2	10.235	6.995	1242.00	46.30	4.569
PM3	10.255	6.685	1215.00	42.70	4.467
Promedio	10.245	6.835	1228.00	44.50	4.496
% de emulsión asfáltica 5.25					
Muestra patrón	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Estabilidad (KN)	Flujo (mm)
PM4	10.145	7.265	1244.00	30.54	3.813
PM5	10.185	7.185	1243.00	24.23	4.614
PM6	10.145	6.865	1209.00	43.70	4.864
Promedio	10.158	7.105	1232.00	32.82	4.430
% de emulsión asfáltica 5.75					
Muestra patrón	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Estabilidad (KN)	Flujo (mm)
PM7	10.175	7.265	1252.00	30.28	3.841
PM8	10.165	7.215	1243.00	19.86	4.562
PM9	10.265	7.135	1238.00	18.72	3.566
Promedio	10.202	7.205	1244.33	22.95	3.990
% de emulsión asfáltica 6.25					
Muestra patrón	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Estabilidad (KN)	Flujo (mm)
PM10	10.185	7.345	1255.00	22.04	3.44
PM11	10.335	7.115	1244.00	12.02	4.275
PM12	10.155	7.365	1251.00	17.20	4.467
Promedio	10.225	7.275	1250.00	17.09	4.061
% de emulsión asfáltica 6.75					
Muestra patrón	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr.)	Estabilidad (KN)	Flujo (mm)
PM13	10.165	7.385	1266.00	15.57	4.192
PM14	10.165	7.375	1265.00	12.82	4.788
PM15	10.155	7.455	1267.00	15.14	4.588
Promedio	10.162	7.405	1266.00	14.51	4.523

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 108. Resumen ensayo de estabilidad y flujo para mezcla patrón al 4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25%, 6.75% de Emulsión asfáltica.

Mezcla patrón estabilidad y flujo			
% Emulsión	Estabilidad (KN)	% Emulsión	Flujo (mm)
4.75	44.50	4.75	4.496
5.25	32.82	5.25	4.430
5.75	22.95	5.75	3.990
6.25	17.09	6.25	4.061
6.75	14.51	6.75	4.523

Fuente. Elaboración propia.

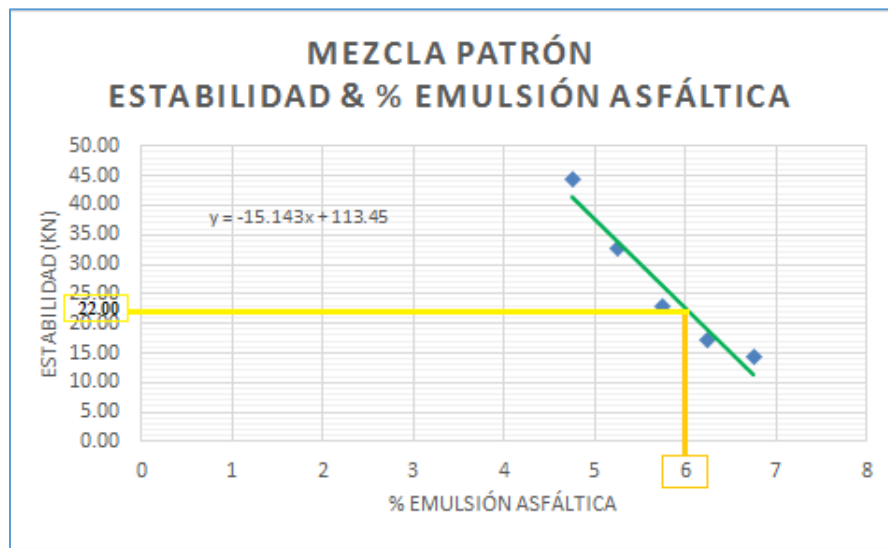


Figura 60. Estabilidad de la Mezcla asfáltica patrón en función del porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%), (Fuente: elaboración propia).

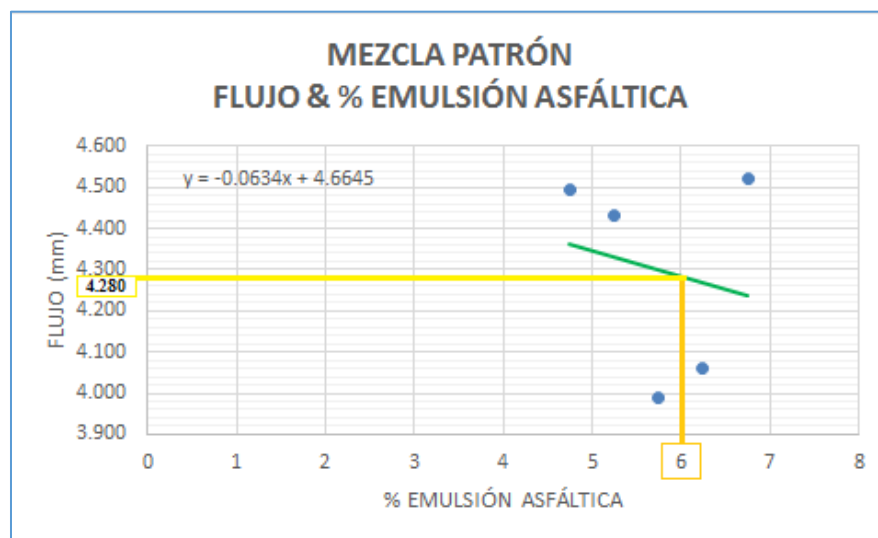


Figura 61. Flujo de la Mezcla asfáltica patrón en función del porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%), (Fuente: elaboración propia).

**c) Análisis de la prueba.**

La estabilidad en la briqueta patrón es de 22 KN y el flujo de 4.28mm esto tomando el análisis de las **figuras 60 y 61**. Donde se intercepta el porcentaje de óptimo de emulsión asfáltica (6%) con la línea de tendencias y define en las ordenadas el valor de estabilidad y flujo en sus respectivas figuras.

Para llegar a estas 2 últimas figuras es necesario ver la **Tabla 107**, donde se encuentran las 15 briquetas patrón ensayadas en el equipo Marshall para los 5 porcentajes de emulsión asfáltica definidos (4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25%, 6.75%); cada grupo es de 3 briquetas al ser ensayadas da 3 resultados diferentes de los cuales se toma el promedio, con ello se obtienen 5 resultados tanto para estabilidad como para flujo resumidos en la **tabla 108**; estos se llevan a las **figuras 60 y 61** explicadas en el párrafo anterior.

3.6.21. Análisis de datos, Inmersión - Compresión de mezclas asfálticas compactadas, Norma MTC E-518.**a) Procesamiento o cálculos de la prueba.****Ecuación inmersión-compresión.**

$$C = \frac{P}{A}$$

$$A = \pi * D^2 / 4$$

Donde:

C = Resistencia a compresión en kg-f/cm²

P = Carga aplicada en kg-f

A = Área sección Transversal (cm²)

π = 3.14159265

D = Diámetro de la Sección transversal (cm)

Datos.**Tabla 109. Briquetas con agregado reciclado al 50% y emulsión asfáltica al 6% (óptimo) ensayo de inmersión - compresión.**

Reciclado 50% Inmersión				
Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Carga (kg-f)
CC1A	10.55	10.10	1941.00	1050
CC1B	10.56	10.21	1920.00	1034
CC1C	10.58	10.20	1932.00	1090
Promedio	10.56	10.17	1931.00	1058.00

Reciclado 50% en Seco				
Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Carga (kg-f)
CC2A	10.58	9.80	1009.50	1464
CC2B	10.61	10.14	1914.40	1250
CC2C	10.63	10.16	1937.60	1486
Promedio	10.61	10.03	1620.50	1400.00

Fuente. Elaboración propia.

Área sección Transversal (cm²).

$$A = \pi * D^2 / 4$$

Reciclado 50% en seco.

$$A (CC1A) = \frac{3.14159265 * 111.3025}{4} = 87.417 \text{ cm}^2$$

$$A (CC1B) = \frac{3.14159265 * 111.5136}{4} = 87.583 \text{ cm}^2$$

$$A (CC1C) = \frac{3.14159265 * 111.9364}{4} = 87.915 \text{ cm}^2$$

**Reciclado 50% en inmersión.**

$$A (CC2A) = \frac{3.14159265 * 111.9364}{4} = 87.915 \text{ cm}^2$$

$$A (CC2B) = \frac{3.14159265 * 112.5721}{4} = 88.414 \text{ cm}^2$$

$$A (CC2C) = \frac{3.14159265 * 112.9969}{4} = 88.748 \text{ cm}^2$$

Ecuación inmersión - compresión.

$$C = \frac{P}{A}$$

Reciclado 50% en Inmersión.

$$C(CC1A) = \frac{1050}{87.4167} = 12.011 \text{ kg-f/cm}^2$$

$$C(CC1B) = \frac{1034}{87.5825} = 11.806 \text{ kg-f/cm}^2$$

$$C(CC1C) = \frac{1090}{87.9146} = 12.398 \text{ kg-f/cm}^2$$

$$C (\text{prom}) = 12.0719 \text{ kg-f/cm}^2$$

Reciclado 50% en Seco.

$$C(CC2A) = \frac{1464}{87.9146} = 16.653 \text{ kg-f/cm}^2$$

$$C(CC2B) = \frac{1250}{88.4139} = 14.138 \text{ kg-f/cm}^2$$

$$C(CC2C) = \frac{1486}{88.7475} = 16.744 \text{ kg-f/cm}^2$$

$$C(\text{prom}) = 15.8359 \text{ kg-f/cm}^2$$

b) Diagramas, tablas.

Tabla 110. Resumen ensayo de resistencia a inmersión - compresión para mezcla con agregado reciclado al 50%.

Inmersión - Compresión			
Muestra	Resistencia reciclado 50% en inmersión(kg-f/cm2)	Muestra	Resistencia reciclado 50% en Seco (kg-f/cm2)
CC1A	12.01	CC2A	16.65
CC1B	11.81	CC2B	14.14
CC1C	12.40	CC2C	16.74
Promedio	12.07	Promedio	15.84

Fuente. Elaboración propia.

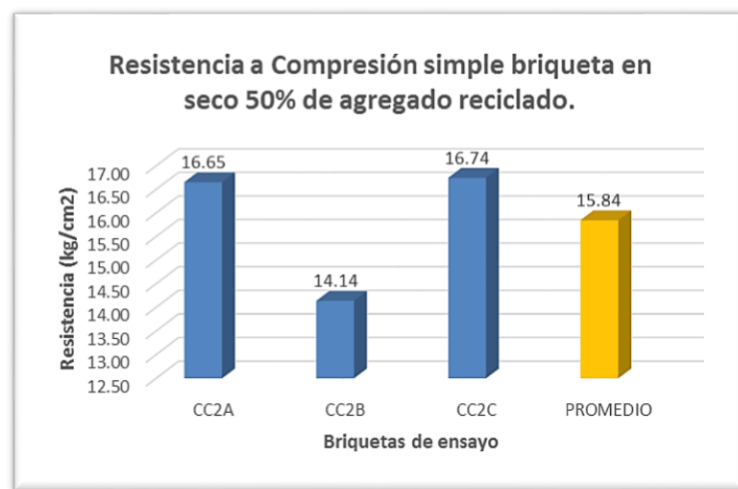
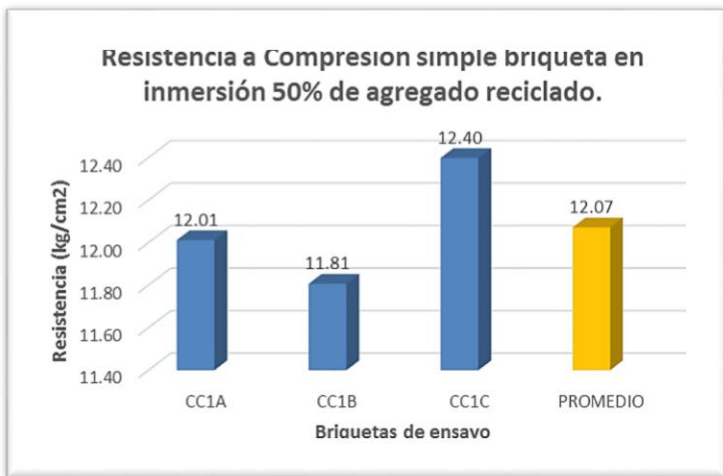


Figura 62. Resistencia a la compresión simple de mezclas con emulsión asfálticas al 50% de agregado reciclado en estado seco y sumergido (inmersión 24 horas a 60°C), (Fuente: Elaboración propia).

c) Análisis de la prueba.

La compresión de briquetas es realizada en estado seco y sumergido para ello se tienen 6 briquetas con diseñadas con la emulsión óptima, es decir a 6% y con la proporción de agregado reciclado a 50%, se divide en dos grupos de 3 especímenes, el primer grupo en seco es llevado al horno de secado por 4 horas luego es sometido a compresión simple teniendo un promedio de resistencia a compresión de 15.84 kg-f/cm² el otro grupo es sumergido en agua por 24 horas a una temperatura de 60°C y luego por 2 horas a 25°C luego se ensaya a compresión simple teniendo un promedio de 12.07 kg-f/cm², tal como se observa en la **figura 62**. Esto demuestra que las carpetas asfálticas en frío bajo condiciones de compresión resisten menos cuando están sometidas a la acción del agua (lluvia – inundación); en el ensayo realizado esta reducción de resistencia a compresión es de **23.8% para una mezcla con agregado reciclado al 50%**.

3.6.22. Análisis de datos, tracción indirecta para mezclas asfálticas en frío, norma INV E-785.**a) Procesamiento o cálculos de la prueba.****Ecuación de tracción indirecta**

$$TR = 2 * \frac{P}{\pi * D * L}$$

Donde:

TR =	Tracción indirecta (kg-f/cm ²)
P =	Carga (kN)
π =	3.141592654
D =	Diámetro de briqueta
L =	Longitud de la briqueta.



Datos.

Tabla 111. Briquetas con agregado reciclado al 25% y emulsión asfáltica al 6% (óptimo) ensayo de Resistencia a tracción indirecta.

Reciclado 25% seco				
Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Carga (KN)
R25T1A	10.31	6.89	1240.30	9.55
R25T1B	10.35	7.05	1254.60	7.26
R25T1C	10.32	7.08	1269.50	8.23
Promedio	10.33	7.01	1254.80	8.35
Reciclado 25% saturado en agua				
Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Carga (KN)
R25T2A	10.32	7.01	1261.60	6.70
R25T2B	10.35	7.15	1273.00	7.54
R25T2C	10.35	7.12	1279.00	6.92
Promedio	10.34	7.09	1271.20	7.05

Fuente: Elaboración propia.

Ecuación tracción indirecta.

$$TR = 2 * \frac{P}{\pi * D * L}$$

Reciclado 25% en seco.

$$TR(R25T1A) = \frac{2 * 9.55}{3.14 * 10.31 * 6.89} = 0.086 \text{ KN/cm}^2 = 8.72 \text{ kg-f/cm}^2$$

$$TR(R25T1B) = \frac{2 * 7.26}{3.14 * 10.35 * 7.05} = 0.063 \text{ KN/cm}^2 = 6.46 \text{ kg-f/cm}^2$$

$$TR(R25T1C) = \frac{2 * 8.23}{3.14 * 10.32 * 7.08} = 0.072 \text{ KN/cm}^2 = 7.31 \text{ kg-f/cm}^2$$

$$TR(\text{prom}) = 7.50 \text{ kg-f/cm}^2$$

**Reciclado 25% saturado en agua.**

$$TR(R25T2A) = \frac{2 * 6.70}{3.14 * 10.32 * 7.01} = 0.059 \text{ KN/cm}^2 = 6.01 \text{ kg-f/cm}^2$$

$$TR(R25T2B) = \frac{2 * 7.54}{3.14 * 10.35 * 7.15} = 0.065 \text{ KN/cm}^2 = 6.61 \text{ kg-f/cm}^2$$

$$TR(R25T2C) = \frac{2 * 6.92}{3.14 * 10.35 * 7.12} = 0.060 \text{ KN/cm}^2 = 6.09 \text{ kg-f/cm}^2$$

$$TR(prom) = 6.24 \text{ kg-f/cm}^2$$

b) Diagramas, tablas.

Tabla 112. Resumen ensayo de resistencia a tracción indirecta para mezcla con agregado reciclado al 25%.

Tracción Indirecta			
	Resistencia reciclado 25% en seco(kg-f/cm²)	Muestra	Resistencia reciclado 25% en inmersión (kg-f/cm²)
Muestra			
R25T1A	8.72	R25T2A	6.01
R25T1B	6.46	R25T2B	6.61
R25T1C	7.31	R25T2C	6.09
Promedio	7.50	Promedio	6.24

Fuente: Elaboración propia.

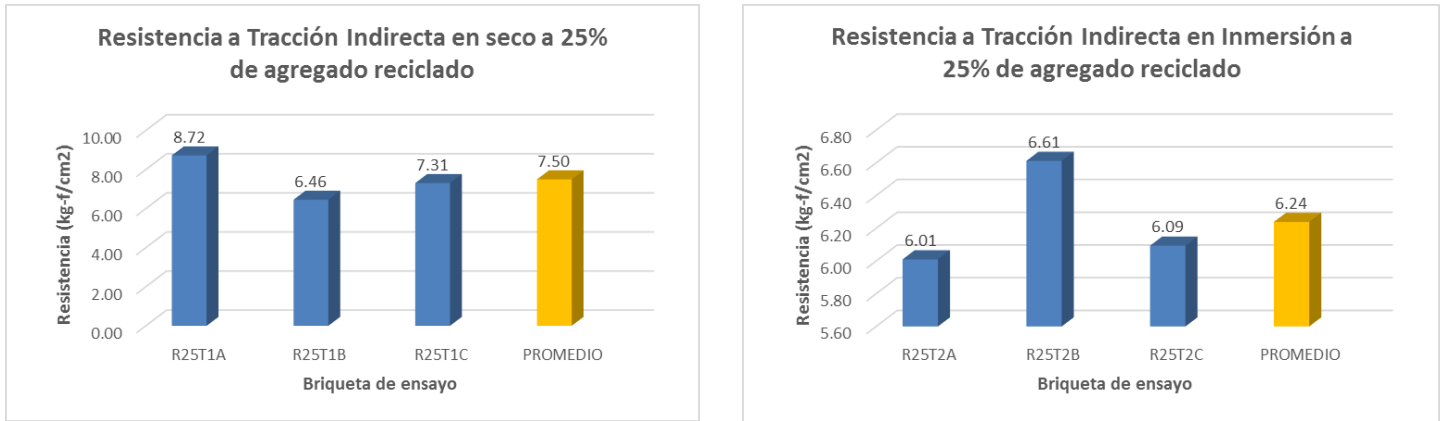


Figura 63. Resistencia a tracción indirecta de mezclas con emulsión asfálticas al 25% de agregado reciclado en estado seco y sumergido (inmersión 24 horas a 60°C), (Fuente: Elaboración propia).

c) Análisis de la prueba.

De la misma manera que para el ensayo de compresión simple en tracción indirecta se tiene también 6 briquetas de ensayo divididas en 2 grupo para la tracción en seco se lleva las briquetas a calentamiento por 4 horas a 25°C y luego se procede al ensayo en el equipo Marshall al cual previamente se cambian las mordazas por el de tipo diametral del mismo modo se ensayan las sumergidas en agua 24 horas a 60°C y luego por 2 horas a 25°C al sacar los promedios de ensayo para ambos casos se tiene en seco una resistencia de 7.50 kg-f/cm² y en húmedo de 6.24 kg-f/cm² tal como se aprecia en la **figura 63**. La diferencia en seco es 20.2% mayor al húmedo lo cual demuestra que el comportamiento en húmedo da una baja de resistencia por efecto del agua en condiciones de trabajo seria el agua de lluvia o una inundación que puede ocasionar la falla de la carpeta asfáltica a estas presiones en el caso de usar este diseño.

3.6.23. Análisis de datos, Volumetría de mezcla asfáltica compactada, Norma INV E-799.

a) Procesamiento o cálculos de la prueba.

Ecuación análisis volumétrico VMA

$$VMA = 100\% - \left[\frac{G_{mb} * P_s}{G_b} \right]$$

**Donde:**

Gmb = Peso específico aparente de la mezcla compactada.

Ps = Porcentaje de agregados en la mezcla.

Gbs = Peso específico de la combinación de agregados.

VMA = Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

VFA = Porcentaje de vacíos llenos de asfalto.

Datos.**Tabla 113. Peso específico de la combinación de agregados (Gbs), porcentaje de agregados en la mezcla (Ps), peso específico aparente para briquetas compactadas con 50% de agregado reciclado.**

RECICLADO 50%			
% EMULSIÓN ASFÁLTICA	Gmb	Ps	Gbs
4.75	2.23	95.25	2.42
5.25	2.23	94.75	2.45
5.75	2.22	94.25	2.44
6.25	2.21	93.75	2.42
6.75	2.19	93.25	2.41

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo VMA para 50% de agregado reciclado.

$$VMA = 100\% - \left[\frac{Gmb * Ps}{Gbs} \right]$$

$$VMA (4.75\%) = 100.00 - \left[\frac{2.23 * 95.25}{2.42} \right] = 12.42 \%$$

$$VMA (5.25\%) = 100.00 - \left[\frac{2.23 * 94.75}{2.45} \right] = 13.78 \%$$

$$VMA (5.75\%) = 100.00 - \left[\frac{2.22 * 94.25}{2.44} \right] = 13.99 \%$$



$$\text{VMA (6.25\%)} = 100.00 - \left[\frac{2.21 * 93.75}{2.42} \right] = 14.37 \%$$

$$\text{VMA (6.75\%)} = 100.00 - \left[\frac{2.19 * 93.25}{2.41} \right] = 15.22 \%$$

Cálculo VFA para 50% de agregado reciclado.

$$\text{VFA} = \left[\frac{\text{VMA} - \text{Pa}}{\text{VMA}} \right] * 100 \%$$

$$\text{VFA (4.75\%)} = \left[\frac{12.42 - 7.70}{12.42} \right] * 100 \% = 37.99 \%$$

$$\text{VFA (5.25\%)} = \left[\frac{13.78 - 5.51}{13.78} \right] * 100 \% = 60.02 \%$$

$$\text{VFA (5.75\%)} = \left[\frac{13.99 - 5.70}{13.99} \right] * 100 \% = 59.26 \%$$

$$\text{VFA (6.25\%)} = \left[\frac{14.37 - 4.46}{14.37} \right] * 100 \% = 68.97 \%$$

$$\text{VFA (6.75\%)} = \left[\frac{15.22 - 3.76}{15.22} \right] * 100 \% = 75.30 \%$$

b) Diagramas, Tablas.

Tabla 114. Resumen ensayo cálculo volumétrico: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) y porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA).

Reciclado 50%		
% Emulsión Asfáltica	VMA (%)	VFA (%)
4.75	12.42	37.99
5.25	13.78	60.02
5.75	13.99	59.26
6.25	14.37	68.97
6.75	15.22	75.30

Fuente: Elaboración propia.

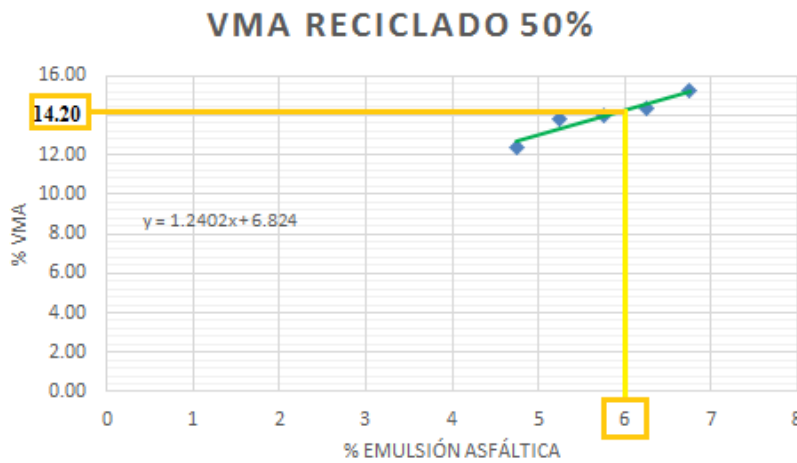


Figura 64. Grafica de análisis volumétrico VMA al 50% de agregado reciclado, (Fuente: Elaboración propia).

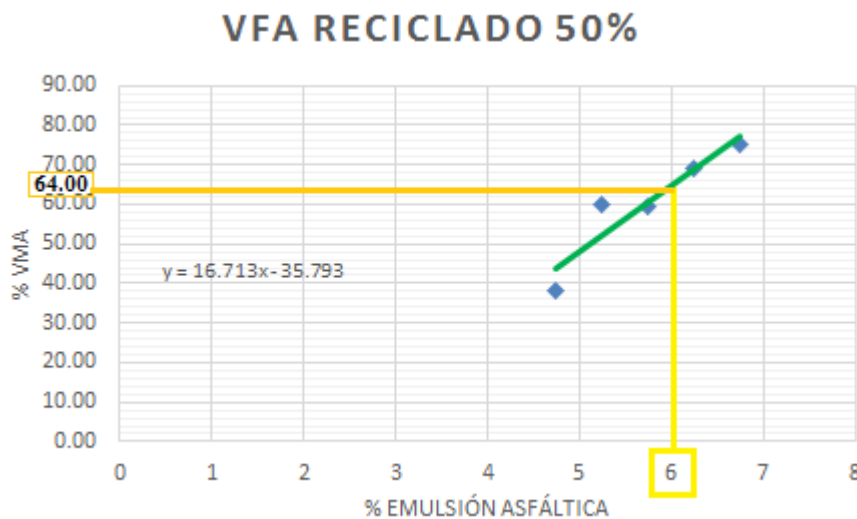


Figura 65. Grafica de análisis volumétrico VFA al 50% de agregado reciclado, (Fuente: Elaboración propia).

c) Análisis de la prueba.

El análisis volumétrico de las mezclas asfálticas compactadas al 50% de agregado reciclado de acuerdo a la **Tabla 114** indica que el porcentaje de vacíos en el agregado VMA está en el orden de 12% a 15% para todas las proporciones de asfalto; es decir a 4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25%, 6.75%; más se nota una clara diferencia en cuanto a los vacíos llenos de asfalto con emulsión al 4.75% donde se logra solo un llenado de espacios de 38% mientras que para el resto está sobre 59% con un máximo de 75.3%, la razón puede deberse a que por ser la de porcentaje de emulsión más baja (4.75%) no tiene la suficiente capacidad de fluir entre los espacios.

3.6.24. Análisis de datos, Modelos de predicción matemáticos para obtener el módulo de rigidez de mezclas asfálticas compactadas (método correlacional).**a) Procesamiento o cálculos de la prueba.****Ecuaciones de predicción modelo 1 (HWAING Y WITCZAK).**

$$E^* = 100000 \times 10^{\beta_1}$$

$$\beta_1 = \beta_3 + 0.000005\beta_2 - 0.00189\beta_2 \times f^{-1.1}$$

$$\beta_2 = \beta_4^{0.5} \times T^{\beta_5}$$

$$\beta_3 = 0.553833 + 0.028829P_{200}f^{-0.1703} - 0.0376V_a + 0.07\lambda + 0.932^{-0.02774}$$

$$\beta_4 = 0.483V_b$$

$$\beta_5 = 1.3 + 0.49825 \log f$$

$$\lambda = 29508.2 \times P_{25^\circ C}^{-2.1939}$$

Donde:

E^* = Módulo de rigidez de la mezcla asfáltica.

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ = Constantes temporales.

f = Frecuencia de carga (Hz)

T = Temperatura en °F



P_{200} = % en peso del agregado que pasa tamiz N°200.

V_a = Volumen de vacíos de aire en %

λ = Viscosidad del asfalto a 70 °F en 10^6

V_b = Volumen de asfalto en %

$P_{25^\circ\text{C}}$ = Penetración del asfalto a 25°C

Ecuaciones de predicción modelo 2 (WITCZAK).

$$\begin{aligned} \text{Log}E^* = & 3.750063 + 0.02932P_{200} - 0.00177P_{200}^2 - 0.002841P_{34} - 0.058097V_a \\ & - 0.802208 \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \\ & + \frac{3.871977 - 0.0021P_4 + 0.003958P_{38} - 0.000017P_{38}^2 + 0.00547P_{34}}{1 + 2.71828182^{-0.603313 - 0.31335 \log f - 0.39353 * \text{Log} n}} \end{aligned}$$

Donde:

E^* = Módulo dinámico (PSI)

n = Viscosidad del asfalto (10^6 poise)

f = Frecuencia de carga (Hz)

V_a = Contenido de vacíos de aire (%)

V_{beff} = Volumen de asfalto efectivo (%)

P_{34} = Volumen de agregado retenido en el tamiz 3/4" (%)

P_{38} = Volumen de agregado retenido en el tamiz 3/8" (%)

P_4 = Volumen de agregado retenido en el tamiz N° 4 (%)

P_{200} = Porcentaje que pasa el tamiz N° 200 (%)

Datos modelo 1, HWAING – WITCZAK.

$E^* = ?$

$B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 = ?$

$f = 1, 3, 5, 10, 20$ Hz

$T = 32, 50, 68, 86$ °F

$P_{200} = 4.51$ %

$V_a = 5$ %

$\lambda = 0.679457658$ (10^6 poise)



$$\begin{aligned} V_b &= 5.66 \% \\ P_{25^\circ\text{C}} &= 130 \text{ dmm} \end{aligned}$$

Datos modelo 2, WITCZAK.

$$\begin{aligned} n &= 0.7181 \text{ (} 10^6 \text{ poise)} \\ f &= 1,3,5,10,20 \text{ Hz} \\ V_a &= 5 \% \\ V_{\text{beff}} &= 2.45 \% \\ P_{34} &= 12.48 \% \\ P_{38} &= 16.68 \% \\ P_4 &= 16.61 \% \\ P_{200} &= 4.51 \% \end{aligned}$$

Cálculo del módulo de rigidez de la mezcla modelo 1, HWAING-WITCZAK.

$$B_5 = 1.3 + 0.49825 \text{ Log}f$$

$$B_5 = 1.3 + 0.49825 \text{ Log}1 = 1.3 + 0.498 * 0 = 1.3$$

$$B_5 = 1.3 + 0.49825 \text{ Log}3 = 1.3 + 0.498 * 0.48 = 1.537726$$

$$B_5 = 1.3 + 0.49825 \text{ Log}5 = 1.3 + 0.498 * 0.7 = 1.648262$$

$$B_5 = 1.3 + 0.49825 \text{ Log}10 = 1.3 + 0.498 * 1 = 1.79825$$

$$B_5 = 1.3 + 0.49825 \text{ Log}20 = 1.3 + 0.498 * 1.3 = 1.948238$$

$$B_4 = 0.483 V_b$$

Patrón

$$B_4 = 0.483 * 5.6603185 = 3 \%$$

Patrón

$$\begin{aligned} \text{frecuencia (f)} &= 1 \text{ Hz} \\ P_{200} &= 5 \% \end{aligned}$$



$$B3 = 0.55 + 0.029 * 4.51 * 1 * ^{-0.17} - 0.04 * 5 + 0.07 * 0.679 + 0.932 * 1 * ^{-0.027}$$

$$B3 = 0.55 + 0.13 - 0.19 + 0.048 + 0.932$$

$$B3 = 1.48 \%$$

$$T = 0^{\circ}\text{C} = 32 \quad ^{\circ}\text{F} \quad B5 \text{ (CON } f = 1)$$

$$B2 = 2.73393 * ^{0.5} * 32 * ^1 = 149.654$$

Patrón

$$B1 = B3 + 5E-06 * B2 - 0.002 * B2 * f ^{-1}$$

$$T = 0^{\circ}\text{C} = 32 \quad ^{\circ}\text{F} \quad f = 1 \text{ Hz}$$

$$B1 = 1.4754 + 0.000005 * 149.65 - 0.002 * 149.7 * 1 ^{-1} = 1.19$$

Patrón

$$E^* = 100000 * 10 ^{B1}$$

$$T = 0^{\circ}\text{C} = 32 \quad ^{\circ}\text{F} \quad f = 1 \text{ Hz}$$

$$E^* = 100000 * 10 ^{1.1933} = 1560733.58 \text{ N/cm}^2$$

Cálculo del módulo de rigidez de la mezcla modelo 2, WITCZAK.

Patrón.

$$\text{Frecuencia} = 1 \text{ Hz}$$

$$\text{Log } E^* = 3.7501 + 0.029 * 4.51 - 0.002 * 20.34$$

$$- 0.002841 * 12.5 - 0.058 * 5 - 0.80221 * \frac{2.45}{2.45 + 5}$$

$$+ \frac{3.872 - 0.0021 * 17 + 0.004 * 16.68 - 2E-05 * 278.22 + 0.005 * 12.48}{1 + 2.7182818 ^{-0.603 - 0.313 * 0 - 0.3935 * -0.14}}$$

Log E* = 3.750063 + 0.132233 - 0.035941 - 0.035456 - 0.29049 - 0.263827 + 2.4736

Log E* = 5.7301914

E * = 537268.57 psi

b) Diagramas, tablas.

Tabla 115. Módulo de rigidez de la mezcla patrón a 0°C y frecuencias de 1, 3, 5, 10,20 determinadas de acuerdo al modelo matemático de predicción HWAING-WITCZAK.

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo de rigidez de la mezcla asfáltica (N/cm2)	Módulo de rigidez de la mezcla asfáltica (kg-f/cm2)
0°C	1	1560733.58	159096.19
0°C	3	1715676.56	174890.58
0°C	5	1758159.67	179221.17
0°C	10	1792580.40	182729.91
0°C	20	1807741.13	184275.34

Fuente: Elaboración propia.

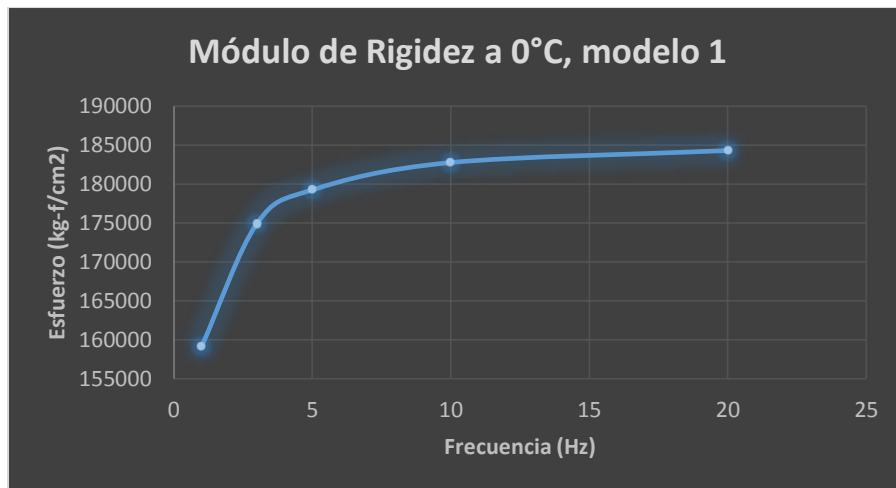


Figura 66. Se observa la curva a diferentes frecuencias y los límites de carga acumuladas repetitivas a 0°C, (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 116A. Módulo de rigidez de la mezcla patrón a frecuencias de 1, 3, 5, 10,20 determinadas de acuerdo al modelo matemático de predicción WITCZAK.

Frecuencia (Hz)	Módulo de rigidez de la mezcla asfáltica (psi) (Lb-f/in ²)	Módulo de rigidez de la mezcla asfáltica (kg-f/cm ²)
1	537268.57	37773.74
3	964987.92	67845.41
5	1322773.88	93000.26
10	2142565.64	150637.36
20	3744752.86	263282.34

Fuente: Elaboración propia.

c) Análisis de la prueba.

Se tienen dos modelos de análisis predictivo del Módulo de rigidez, **según el modelo 1**, el esfuerzo se incrementa a medida que se aumenta la frecuencia o la repetición de cargas soportando un máximo de 184275 kg-f/cm² (184.27 Ton/cm²) a una frecuencia máxima de 20 Hz; esto simula muy bien el alto tránsito; 159096 kg-f/cm² (159.09 Ton/cm²) a una frecuencia máxima de 1 Hz; esto es el mínimo que soporta a un bajo tránsito, mismos que se aprecian en la **Tabla 115 y Figura 66**, para una temperatura de trabajo de 0°C.

En el modelo 2, los esfuerzos que soporta el pavimento a las mismas frecuencias son mayores teniendo 263282 kg-f/cm² (263.28 Ton/cm²) y un mínimo de 37773 kg-f/cm² (37.77 Ton/cm²) tal como se indica en la **Tabla 116A**; cabe señalar que el **Modelo 2**, está diseñado para un amplio rango de temperatura que va desde -17.7°C a 54.4°C por ello la gran diferencia en resultados respecto al Modelo 1; sin embargo el **Modelo 1** dista de mayor precisión ya que considera en su ecuación la temperatura por tanto puedes realizar predicciones grado por grado de ser necesario.

3.6.25. Análisis de datos, Metodología de diseño Marshall modificado para el diseño de mezcla asfáltica Patrón y diseño de mezcla asfáltica con agregados reciclados.

3.6.25.1. Procedimiento para la combinación de agregados Diseño de mezcla Patrón.



Partimos de que ya se tiene la granulometría de cada una de las diferentes fracciones de tamaño de agregado que se utilizarán.

Se busca una combinación de cuatro agregados: Agregado grueso 1, agregado grueso 2, Agregado fino 1, agregado fino 2 y un filler, para esto se ha utilizado el programa Excel mediante la elaboración de una tabla con fórmulas para que realice dichos cálculos de la cual se obtiene los porcentajes para cada uno de los agregados antes mencionados, y considerando que el Tamaño Máximo de agregado que se tiene es de 1 pulgada se utiliza como especificación la banda de control respectiva de la **Tabla 116B**.

Para calcular las combinaciones de los agregados y verificar si ésta cae entre los rangos establecidos de una especificación granulométrica, el procedimiento es el siguiente:

Se tienen las granulometrías corridas de cada uno de los agregados que conformarán la combinación, luego se procede a asignar un porcentaje a cada agregado, la sumatoria de dichos porcentajes será el 100 por ciento de los agregados; como se muestra en el tanteo de mezcla de diseño Patrón.

Agregado Grueso 1	= 22.72 %
Agregado Grueso 2	= 11.23 %
Agregado fino 1	= 29.77 %
Agregado fino 2	= 29.78 %
Filler	= 6.50 %

100.00 % de la combinación granulométrica.

El porcentaje de cada agregado es multiplicado por su respectiva granulometría luego se obtiene la suma de los tres porcentajes obteniendo así el valor para cada tamiz respectivamente, y éste promedio se verifica si está dentro del rango establecido de cada uno de los tamices según el tipo de granulometría especificada, que para este caso el **MDF-2**. Si el valor de un sólo tamiz no cae dentro del rango establecido por la especificación para dicho tamiz, la combinación granulométrica en los porcentajes de agregados no satisface la especificación, por lo que se deberá buscar otros

porcentajes y así sucesivamente hasta encontrar los valores de los porcentajes para cada agregado que satisfaga las especificaciones por completo, o sea para cada tamiz en la especificación.

Tabla 116B. Gradación de agregados para mezclas densas en frío.

Tamiz		Porcentaje que pasa		
Normal	Alterno	MDF-1	MDF-2	MDF-3
38.1mm	1 1/2"	100	-	-
25.0mm	1"	80-95	100	-
19.0mm	3/4"	-	80-95	100
12.5mm	1/2"	62-77	-	-
9.5mm	3/8"	-	60-75	-
4.75mm	N°4	45-60	47-62	50-65
2.36mm	N°8	35-50	35-50	35-50
300um	N°50	13-23	13-23	13-23
75um	N°200	3-8	3-8	3-8

Fuente: Manual de carreteras “Especificaciones Generales para construcción” (EG-2013 MTC), Tabla 424-02, pág. 607.

En la **Tabla 116 (C, D)** se muestran los resultados en una hoja de cálculo, de la combinación de diferentes porcentajes para cada agregado, entre ellos la combinación que cumple con la especificación granulométrica Tipo MDF-2, por Tanteo establecido para el diseño de mezcla Patrón.

A continuación se realiza los Cálculos para el Primer Tanteo dado para el diseño de mezcla Patrón.

tamiz de 1"

A. Grueso 1 (18%) =	0.18 *	100.00 =	18.00 %
A. Grueso 2 (13%) =	0.13 *	100.00 =	13.00 %
A. Fino 1 (33.3%) =	0.33 *	100.00 =	33.30 %
A. Fino 2 (33.3%) =	0.33 *	100.00 =	33.30 %
A. Fino 2 (2.4%) =	0.02	100.00	2.40 %

$\Sigma = 100.00 \%$

tamiz de 3/4"

A. Grueso 1 (18%) =	0.18 *	47.00 =	8.46 %
A. Grueso 2 (13%) =	0.13 *	96.00 =	12.48 %
A. Fino 1 (33.3%) =	0.33 *	100.00 =	33.30 %
A. Fino 2 (33.3%) =	0.33 *	100.00 =	33.30 %
A. Fino 2 (2.4%) =	0.02	100.00	2.40 %

$\Sigma = 89.94 \%$

tamiz de 3/8"

A. Grueso 1 (18%) =	0.18 *	8.00 =	1.44 %
A. Grueso 2 (13%) =	0.13 *	27.00 =	3.51 %
A. Fino 1 (33.3%) =	0.33 *	100.00 =	33.30 %
A. Fino 2 (33.3%) =	0.33 *	100.00 =	33.30 %
A. Fino 2 (2.4%) =	0.02	100.00	2.40 %

$\Sigma = 73.95 \%$

tamiz de N° 4

A. Grueso 1 (18%) :	0.18 *	4.00 =	0.72 %
A. Grueso 2 (13%) :	0.13 *	0.00 =	0.00 %
A. Fino 1 (33.3%) =	0.33 *	71.00 =	23.64 %
A. Fino 2 (33.3%) =	0.33 *	86.00 =	28.64 %
A. Fino 2 (2.4%) =	0.02 *	100.00 =	2.40 %

$\Sigma = 55.40 \%$



tamiz de N° 8

A. Grueso 1 (18%) =	0.18 *	0.00 =	0.00 %
A. Grueso 2 (13%) =	0.13 *	0.00 =	0.00 %
A. Fino 1 (33.3%) =	0.33 *	57.00 =	18.98 %
A. Fino 2 (33.3%) =	0.33 *	57.00 =	18.98 %
A. Fino 2 (2.4%) =	0.02	100.00	2.40 %

Σ= 40.36 %

tamiz de N° 50

A. Grueso 1 (18%) =	0.18 *	0.00 =	0.00 %
A. Grueso 2 (13%) =	0.13 *	0.00 =	0.00 %
A. Fino 1 (33.3%) =	0.33 *	16.00 =	5.33 %
A. Fino 2 (33.3%) =	0.33 *	18.00 =	5.99 %
A. Fino 2 (2.4%) =	0.02	100.00	2.40 %

Σ= 13.72 %

tamiz de N° 200

A. Grueso 1 (18%) =	0.18 *	0.00 =	0.00 %
A. Grueso 2 (13%) =	0.13 *	0.00 =	0.00 %
A. Fino 1 (33.3%) =	0.33 *	1.00 =	0.33 %
A. Fino 2 (33.3%) =	0.33 *	2.00 =	0.67 %
A. Fino 2 (2.4%) =	0.02	53.00	1.27 %

Σ= 2.27 %

Tabla 116C. Cálculo de las Combinaciones Granulométricas y la Especificación Granulométrica para mezclas densas en frío Tipo MDF-2, para mezcla de diseño Patrón (1)

N° Tamiz	1"	3/4"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 50	N° 200
Tamaño de Tamiz (mm)	25.4	19	9.5	4.75	2.36	0.3	0.075
Especificación MDF-2	100	95/80	75/65	62/47	50/35	23/13	8/3
Promedio MDF-2	100.00	87.50	70.00	54.50	42.50	18.00	5.50
Granulometría de los agregados							
% pasante de cada agregado							
Tipo de agregado							
A. Grueso 1	100	47	8	4	0	0	0
A. Grueso 2	100	96	27	0	0	0	0
A. Fino 1	100	100	100	71	57	16	1
A. Fino 2	100	100	100	86	57	18	2
Filler	100	100	100	100	100	100	53
Primer tanteo							
% pasante de cada agregado							
Tipo de agregado	% de cada agregado						
A. Grueso 1	18.00	18.00	8.46	1.44	0.72	0.00	0.00
A. Grueso 2	13.00	13.00	12.48	3.51	0.00	0.00	0.00
A. Fino 1	33.30	33.30	33.30	33.30	23.64	18.98	5.33
A. Fino 2	33.30	33.30	33.30	33.30	28.64	18.98	5.99
Filler	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	1.27
Combinación granulométrica	100.00	100.00	89.94	73.95	55.40	40.36	13.72
							2.27

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 116D. Cálculo de las Combinaciones Granulométricas y la Especificación
Granulométrica para mezclas densas en frío Tipo MDF-2, para mezcla de diseño Patrón (2).

N° Tamiz	1"	3/4"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 50	N° 200
Tamaño de Tamiz (mm)	25.4	19	9.5	4.75	2.36	0.3	0.075
Especificación MDF-2	100	95/80	75/65	62/47	50/35	23/13	8/3
Promedio MDF-2	100.00	87.50	70.00	54.50	42.50	18.00	5.50
Segundo tanteo							
Tipo de agregado	% de cada agregado	% pasante de cada agregado					
A. Grueso 1	23.50	23.50	11.05	1.88	0.94	0.00	0.00
A. Grueso 2	11.50	11.50	11.04	3.11	0.00	0.00	0.00
A. Fino 1	31.50	31.50	31.50	31.50	22.37	17.96	5.04
A. Fino 2	31.50	31.50	31.50	31.50	27.09	17.96	5.67
Filler	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.06
Combinación granulométrica	100.00	100.00	87.09	69.99	52.40	37.91	12.71
Tercer tanteo							
Tipo de agregado	% de cada agregado	% pasante de cada agregado					
A. Grueso 1	22.72	22.72	10.68	1.82	0.91	0.00	0.00
A. Grueso 2	11.23	11.23	10.78	3.03	0.00	0.00	0.00
A. Fino 1	29.77	29.77	29.77	29.77	21.14	16.97	4.76
A. Fino 2	29.78	29.78	29.78	29.78	25.61	16.97	5.36
Filler	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	3.44
Combinación granulométrica	100.00	100.00	87.51	70.90	54.16	40.44	16.62

Fuente: Elaboración propia

Y así sucesivamente se calculan los valores para cada tamiz y se verifica si cada uno está dentro del rango de la especificación, lo ideal es que el valor para cada tamiz sea próximo al valor promedio de la especificación.

Si el valor obtenido para cada tamiz en la combinación teórica es próximo al valor promedio de la especificación, éste valor permitirá una variación amplia dentro de la especificación para cada tamiz, la variación puede ser arriba o abajo del promedio de la especificación, pero siempre dentro de su rango.

Después de una serie de pruebas se encontró que el primer tanteo no cumple los rangos en el tamiz N° 200, el segundo tanteo no cumple el tamiz N° 50 y N° 200, los porcentajes que cumplen con las especificaciones son los encontrados en el tercer tanteo tal como se muestra en la **Tabla 116D**.



- Agregado Grueso 1 = 22.72 %
- Agregado Grueso 2 = 11.23 %
- Agregado Fino 1 = 29.77 %
- Agregado Fino 2 = 29.78 %
- Filler = 6.50 %

100.00 % de la combinación granulométrica.

Con dichos porcentajes se procede a realizar una combinación real (comprobación granulométrica) de los cuatro agregados y filler, luego en el laboratorio se desarrolla el ensayo de granulometría para verificar si la granulometría se reproduce en los porcentajes establecidos.

3.6.25.2. Comprobación granulométrica para el diseño de mezcla Patrón.

Esto se realiza haciendo la combinación de los agregados en los porcentajes establecidos para una briqueta, el cual se expresa en la **Tabla 116E**. Con los ajustes de error de pesado establecidos y corregidos, para una briqueta de diseño de Mezcla Patrón.

Tabla 116E. Comprobación Granulométrica de combinación de agregados para Diseño de Mezcla Patrón (Para mezcla densa en frío tipo MDF-2).

Tamiz	Tamiz (Mm)	Peso Retenido	Peso Retenido Corregido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Ajuste % Que Pasa
1"	25	0.00	0.15	0.01	0.01	99.99	100.00
3/4"	19	150.75	150.90	12.48	12.49	87.51	88.00
3/8"	9.5	201.55	201.70	16.68	29.17	70.83	71.00
#4	4.75	200.65	200.80	16.61	45.78	54.22	54.00
#8	2.36	164.89	165.04	13.65	59.43	40.57	41.00
#50	0.3	289.71	289.86	23.97	83.40	16.60	17.00
#200	0.075	146.08	146.24	12.09	95.49	4.51	5.00
Fondo	Fondo	54.37	54.52	4.51	100.00	0.00	

Fuente: Elaboración propia

De la **Tabla 116E** se observa que los porcentajes acumulados que pasan para cada tamiz están entre los rangos especificados por la granulometría de diseño de mezcla tipo MDF-2, por lo tanto la combinación granulométrica corresponde a:

- Agregado grueso 1 = 22.72 %;
- Agregado grueso 2 = 11.23%;
- Agregado fino 1 = 29.77%;
- Agregado fino 2 = 29.78%;
- Filler = 6.50%,

Que cumplen la especificación.

3.6.25.3. Estimación del porcentaje óptimo de emulsión asfáltica, para el diseño de mezcla Patrón.

La estimación del porcentaje óptimo de asfalto es de una gran ayuda, y se realiza utilizando la relación propuesta por el Instituto Americano del Asfalto, ya que proporciona un valor de emulsión óptimo teórico y a partir de este se establecen los demás porcentajes de emulsión para el diseño.

Relación propuesta por el Instituto Americano del Asfalto.

- **Ecuación porcentaje en peso de emulsión asfáltica (P).**

$$P = (0.05 \times A + 0.1 \times B + 0.5 \times C) \times 0.7$$

Donde:

P = Porcentaje por peso de Emulsión Asfáltica, basado en el peso de agregado seco.

A = Porcentaje de agregado retenido en la malla N°8.

B = Porcentaje de agregado que pasa la malla N° 8 y es retenido en la malla N° 200.

C = Porcentaje de agregado que pasa la malla N° 200.

- **Ecuación contenido estimado de asfalto residual (CA).**

$$CA = \frac{P}{100} * \frac{CARE}{\%}$$

Donde:



CA = Contenido estimado de asfalto.

P = Porcentaje en peso de Emulsión Asfáltica, basado en el peso de agregado seco.

CARE = Porcentaje de residuo de asfalto en la emulsión asfáltica.

- **Porcentaje de emulsión asfáltica, para Diseño de Mezcla Patrón.**

$$P = \left[0.05 * A + 0.1 * B + 0.5 * C \right] * 0.7$$

$$A = \# 8 = 13.65 \%$$

$$B = \#50 + \#200 = 36.08 \%$$

$$C = \text{PASA} \# 200 = 4.50 \%$$

Porcentajes tomados de la Tabla 4.20.

$$P = \left[0.05 * \frac{13.6495}{1} + 0.1 * \frac{36.07569}{1} + 0.5 * \frac{4.50113}{8} \right] * 0.7$$

$$P = 4.5784295 \%$$

El porcentaje de emulsión asfáltica requerido es de: **4.5784%**, pero para evaluar el diseño es necesario tomar otros porcentajes de emulsión asfáltica que deben estar +/- 1 % del valor encontrado.

- **Contenido estimado de Asfalto Residual (Ca)**

$$CA = \frac{P * CARE}{100 \%}$$

$$CARE = 56.8 \%$$

$$CA = \frac{4.5784295 * 56.8}{100 \%}$$

$$CA = 2.600548 \%$$

$$CA = 2.6 \% \sim 3.00\%$$



El contenido residual de asfalto CA, es **3%**; con este valor establecemos el rango posible de trabajo de asfalto en la emulsión asfáltica es decir +/- **1%**.

2.00% < **3.00%** < **4.00%** < **5.00%**

Pero estos porcentajes representan el 56.8% de asfalto en la emulsión asfáltica, llevando estos porcentajes al 100% se tiene los rangos en porcentaje de la emulsión asfáltica con los que puede probar el diseño de mezcla patrón.

3.52% < **5.28%** < **7.04%** < **8.80%**

Con esta información se toma la decisión utilizar 5 porcentajes intermedios de emulsión asfáltica de prueba comprendidos entre los valores encontrados del valor de “P” y los valores indicados, estos son:

4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25% y 6.75%.

Para cada porcentaje de emulsión asfáltica CSS-1h, se elabora tres briquetas como mínimo, cada briqueta tiene un peso de aproximadamente 1,200.0 g, además, también se dosifica una o dos porciones de mezcla asfáltica de aproximadamente 1,500.0 g cada una, para gravedad específica teórica máxima, la cual se deja en condición suelta. La elección de hacer una o dos muestras para teórica máxima depende de los criterios del diseñador.

Una vez establecidos los porcentajes emulsión asfáltica CSS-1h, para cada dosificación se procede a calcular la cantidad de agua requerida para cada briqueta tomando en consideración el porcentaje de humedad de cada agregado de la siguiente manera:

Porcentaje De Humedad de la combinación de agregados, para el diseño de mezcla patrón.

% Humedad Agregado Grueso 1	=	0.3756	%
% Humedad Agregado Grueso 2	=	0.3052	%
% Humedad Agregado Fino 1	=	1.1728	%
% Humedad Agregado Fino 2	=	0.6252	%
% Humedad Filler Cemento	=	0.0001	%
% Humedad Filler Agregado 1	=	0.3756	%



$$\% \text{ Humedad del Agregado} = \frac{\% \text{ Humedad del agregado} \left[\frac{\% \text{ agregado}}{100 \%} + \underline{0} \right] \%}{100 \%}$$

$$\% \text{ Humedad Agregado Grueso 1} = \frac{0.3756 \% \left[\frac{22.72 \%}{100 \%} + \underline{0} \right] \%}{100 \%}$$

$$\% \text{ Humedad Agregado Grueso 1} = \mathbf{0.085326477 \%}$$

$$\% \text{ Humedad Agregado Grueso 2} = \frac{0.3052 \% \left[\frac{11.23 \%}{100 \%} + \underline{0} \right] \%}{100 \%}$$

$$\% \text{ Humedad Agregado Grueso 2} = \mathbf{0.034275435 \%}$$

$$\% \text{ Humedad Agregado Fino 1} = \frac{1.1728 \% \left[\frac{29.77 \%}{100 \%} + \underline{0} \right] \%}{100 \%}$$

$$\% \text{ Humedad Agregado Fino 1} = \mathbf{0.349162651 \%}$$

$$\% \text{ Humedad Agregado Fino 2} = \frac{0.6252 \% \left[\frac{29.78 \%}{100 \%} + \underline{0} \right] \%}{100 \%}$$

$$\% \text{ Humedad Agregado Fino 2} = \mathbf{0.186188672 \%}$$

$$\text{Filler Cemento} = \frac{0.0001 \% \left[\frac{3.52 \%}{100 \%} + \underline{0} \right] \%}{100 \%}$$

$$\text{Filler Cemento} = \mathbf{3.51822E-06 \%}$$

$$\text{Filler Grueso 1} = \frac{0.3756 \% \left[\frac{2.98 \%}{100 \%} + \underline{0} \right] \%}{100 \%}$$

$$\text{Filler Grueso1} = \mathbf{0.01119868 \%}$$

$$\% \text{ Humedad Mezcla Agregados} = \mathbf{0.666155434 \%}$$



Según el manual Americano MS-19 (Diseño de mezclas en frío), el porcentaje de agua no debe ser mayor al 2% en peso de la mezcla, por tanto:

$$2\% - 0.67\% = 1.33\%$$

1.33%, es el porcentaje en peso que se debe añadir a la mezcla de diseño Patrón.

2.6.25.4. Procedimiento para calcular la dosificación de agregado y emulsión asfáltica para el diseño de mezcla Patrón.

A continuación se ejemplifica el cálculo de los diferentes pesos de agregados para cada una de las cuatro fracciones, de acuerdo a los porcentajes establecidos en la **Tabla 16D (3er tanteo)** y el peso del asfalto para la elaboración de una briqueta y una muestra para gravedad específica teórica máxima.

3.6.25.4.1. Cálculo dosificación de materiales para una briqueta de diseño de mezcla patrón a 4.75% de emulsión asfáltica.

Datos:

Peso de agregados= 1207.99 gr.
 % de emulsión asfáltica= 4.75 %
 % de Humedad= 1.33 %

$$\text{Peso de emulsión} = \text{peso de agregados} * \frac{\% \text{ de emulsión}}{0.568}$$

La emulsión asfáltica de 4.75% representa el 56.8% de asfalto por ello para representar el 100% debe dividirse entre ese valor.

$$\text{Peso de emulsión} = 1207.99 \text{ gr.} * \frac{4.75}{100 * 0.568}$$

$$\text{Peso de emulsión} = 101.02 \text{ gr.}$$

Calculo de peso de agua 1.33%.

$$\text{Peso de agua} = \text{peso de agregados} * \% \text{ de agua}$$



$$\text{Peso de agua} = 1207.99 \text{ gr.} * \frac{1.334}{100}$$

$$\text{Peso de agua} = 16.11 \text{ gr.}$$

$$\text{Peso de agua} = 16.11 \text{ ml.}$$

Peso total para una briqueta de 4.75% de Emulsión Asfáltica (P (4.75%))

$$\text{P (4.75\%)} = \text{Peso de agregados} + \text{Peso de emulsión} + \text{Peso de agua}$$

$$\text{P (4.75\%)} = 1207.99 \text{ gr} + 101.02 \text{ gr} + 16.11 \text{ gr}$$

$$\text{P (4.75\%)} = 1325.13 \text{ gr}$$

La dosificación completa para la briqueta de diseño de mezcla Patrón con los contenidos de emulsión asfáltica CSS-1h de prueba definidos es decir: **4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25 y 6.75%** se muestran en las **Tabla 116F y 116G**.

Tabla 116F. Dosificación de materiales para una briqueta, para diseño de Mezcla Patrón expresado en Porcentaje.

	1	2	3	4	5
Mezcla de Agregado (gr)	1207.99 gr	1207.99 gr	1207.99 gr	1207.99 gr	1207.99 gr
% De Emulsión Asfáltica en la Mezcla (%)	8.36 %	9.24 %	10.12 %	11.00 %	11.88 %
% Asfalto Residual en la Mezcla (%)	4.75 %	5.25 %	5.75 %	6.25 %	6.75 %
Agua de Pre mezcla (%)	1.33 %	1.33 %	1.33 %	1.33 %	1.33 %

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 116G. Dosificación de materiales para una briqueta, diseño de Mezcla Patrón expresado en Peso.

	1	2	3	4	5
Mezcla de Agregado (gr)	1207.99 gr	1207.99 gr	1207.99 gr	1207.99 gr	1207.99 gr
% de Emulsión Asfáltica en la Mezcla (gr)	101.02 gr	111.65 gr	122.288 gr	132.92 gr	143.55 gr
% De Agua de Pre mezcla (ml)	16.11 ml	16.11 ml	16.11 ml	16.11 ml	16.11 ml
Peso total para una Briqueta (gr)	1325.12 gr	1335.76 gr	1346.39 gr	1357.02 gr	1367.66 gr

Fuente. Elaboración propia.

La columna (1) de las **Tablas 116F y 116G**, muestran los cálculos realizados anteriormente para un porcentaje de emulsión de **4.75%**, para el diseño de prueba de mezcla Patrón de una briqueta compactada, las otras columnas son los resultados para las otras dosificaciones de asfalto considerados en la prueba.

3.6.25.4.2. Cálculo dosificación de materiales para determinación de Densidad Teórica Máxima, en una mezcla de diseño de Patrón a 4.75% de emulsión asfáltica CSS-1h.

La muestra para esta prueba debe ser suelta no se compacta, la norma pide que la cantidad de muestra sea por lo menos de 1500 gramos, en este sentido se tiene lo siguiente.

Datos:

Peso de agregados= 1500.00 gr.

% de emulsión asfáltica= 4.75 %

% de Humedad= 1.33 %

Calculo de peso de Emulsión Asfáltica 4.75%.

$$\text{Peso de emulsión} = \text{peso de agregados} * \frac{\% \text{ de emulsión}}{0.568}$$



La emulsión asfáltica de 4.75% representa el 56.8% de asfalto por ello para representar el 100% debe dividirse entre ese valor.

$$\text{Peso de emulsión} = 1500.00 \text{ gr.} * \frac{4.75}{100 * 0.568}$$

$$\text{Peso de emulsión} = \mathbf{125.44 \text{ gr.}}$$

Calculo de peso de agua 1.33%.

$$\text{Peso de agua} = \text{peso de agregados} * \% \text{ de agua}$$

$$\text{Peso de agua} = 1500.00 \text{ gr.} * \frac{1.334}{100}$$

$$\text{Peso de agua} = \mathbf{20.01 \text{ gr.}}$$

$$\text{Peso de agua} = \mathbf{20.01 \text{ ml.}}$$

Peso total para una mezcla asfáltica suelta de 4.75% de Emulsión Asfáltica (P (4.75%)).

$$\mathbf{P (4.75\%)} = \text{Peso de agregados} + \text{Peso de emulsión} + \text{Peso de agua}$$

$$\mathbf{P (4.75\%)} = 1500.00 \text{ gr} + 125.44 \text{ gr} + 20.01 \text{ gr}$$

$$\mathbf{P (4.75\%)} = 1645.45 \text{ gr}$$

La dosificación completa para la muestra de Densidad Teórica Máxima de diseño de mezcla Patrón con los contenidos de emulsión asfáltica CSS-1h de prueba definidos es decir: **4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25 y 6.75%** se muestran en las **Tabla 117A y 117B.**

Tabla 117A. Dosificación de materiales para una muestra de prueba de Densidad Máxima Teórica con mezcla suelta, diseño de mezcla Patrón expresado en Porcentaje.

	1	2	3	4	5
Mezcla De Agregado (gr)	1500.00 gr	1500.00 gr	1500.00 gr	1500.00 gr	1500.00 gr
% De Emulsión Asfáltica en la Mezcla (%)	8.36 %	9.24 %	10.12 %	11.00 %	11.88 %
% Asfalto Residual en la Mezcla (%)	4.75 %	5.25 %	5.75 %	6.25 %	6.75 %
Agua De Premezcla (%)	1.33 %	1.33 %	1.33 %	1.33 %	1.33 %

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 117B. Dosificación de materiales para una muestra de prueba de Densidad Máxima Teórica con mezcla suelta, diseño de Mezcla Patrón expresado en Peso.

	1	2	3	4	5
Mezcla de Agregado (gr)	1500.00 gr	1500.00 gr	1500.00 gr	1500.00 gr	1500.00 gr
% De Emulsión Asfáltica en la Mezcla (gr)	125.44 gr	138.64 gr	151.84 gr	165.05 gr	178.25 gr
% de Agua de Premezcla (ml)	20.00 ml	20.00 ml	20.00 ml	20.00 ml	20.00 ml
Peso Total para una Mezcla suelta (gr)	1645.45 gr	1658.65 gr	1671.86 gr	1685.06 gr	1698.27 gr

Fuente. Elaboración propia.

La columna (1) de las **Tablas 117A y 117B**, muestra los cálculos realizados anteriormente para un porcentaje de emulsión de **4.75%**, para el diseño de prueba de mezcla Patrón de una mezcla suelta para prueba de Densidad Máxima Teórica, las otras columnas son los resultados para las otras dosificaciones de asfalto considerados en la prueba.

3.6.25.4.3. Calculo para la determinación de Gravedad específica Bulk de la combinación de agregados, para la mezcla de diseño Patrón.



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

Donde:

G_{sb} = Gravedad Específica Bulk de la Combinación de Agregados.

P_1, P_2, \dots, P_n = Porcentaje por Peso de los Agregados.

G_1, G_2, \dots, G_n = Gravedad Específica Bulk de Cada Agregado.

Las gravedades específicas de los materiales las cuales se han obtenido por medio de cada uno de los ensayos respectivos son las siguientes:

Datos:

G = Gravedad específica de cada agregado.

Agregado Grueso 1	=	G_1	=	2.65
Agregado Grueso 2	=	G_2	=	2.65
Agregado Fino 1	=	G_3	=	2.57
Agregado Fino 2	=	G_4	=	2.65
Filler	=	G_5	=	3.1

P = Porcentaje en peso de cada agregado.

Agregado Grueso 1	=	P_1	=	22.72 %
Agregado Grueso 2	=	P_2	=	11.23 %
Agregado Fino 1	=	P_3	=	29.77 %
Agregado Fino 2	=	P_4	=	29.78 %
Filler	=	P_5	=	6.50 %

$$G_{bs} = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \frac{P_4}{G_4} + \frac{P_5}{G_5}}$$

$$G_{bs} = \frac{22.72 + 11.23 + 29.77 + 29.78 + 6.50}{\frac{22.72}{2.65} + \frac{11.23}{2.65} + \frac{29.77}{2.57} + \frac{29.78}{2.65} + \frac{6.50}{3.1}}$$

$$G_{bs} = 2.65$$



La gravedad específica Bulk de combinación de agregados de la mezcla de diseño Patrón es **2.65**.

3.6.25.5. Desarrollo del procedimiento de diseño, para la mezcla de diseño Patrón.

En el proceso de diseño se realiza trabajo de laboratorio y análisis de los datos obtenidos en los ensayos, los cuales se describen a continuación.

a) Trabajo de laboratorio.

En la dosificación que se realizó las proporciones de agregado son: Agregado grueso 1 (22.72%), Agregado grueso 2 (11.23%), Agregado fino 1 (29.77%), Agregado fino 2 (29.78%), Filler 6.50% y utilizando de acuerdo al tamaño máximo nominal de la combinación de agregados que es de 1 pulgada, la especificación granulométrica del Manual de carreteras del MTC Tipo MDF-2, según **Tabla 116B**. Primeramente se elaboran las briquetas, de acuerdo al procedimiento contemplado en el manual básico de emulsiones asfálticas del Instituto Americano del Asfalto MS -19 (capítulo 7) la cual, luego de elaborar las briquetas se realiza el trabajo de laboratorio comprendido en el procedimiento Marshall y comprende los ensayos siguientes:

- Gravedad Específica Bulk, Norma MTC E-514.
- Gravedad Específica Teórica Máxima, Norma MTC E-508.
- Estabilidad y Flujo, Norma MTC E-504.

Después de la elaboración de briquetas se puede proceder a realizar los ensayos Marshall Modificado de: Gravedad Específica Bulk, Densidad máxima Teórica y de Estabilidad y Flujo; según el procedimiento indicado en las normas MTC correspondientes.

La Densidad Bulk debe obtenerse antes de la Estabilidad, ya que éste es un ensayo destructivo, del ensayo de Densidad Bulk y Densidad teórica máxima se obtiene el % vacíos de cada briketa.

Durante el proceso que se realizó para el diseño de mezcla se hicieron varias repeticiones, para los primeros ensayos las dosificaciones de los materiales se basaron en las cantidades y porcentajes de Emulsión asfáltica a: **4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25% y 6.75%** definidas para las pruebas.

3.6.25.5.1. Ensayo de Gravedad Específica Bulk, para el diseño de mezcla Patrón de acuerdo a la Norma MTC E-514.

Después de la compactación de las briquetas y su posterior extracción de los moldes (dejar en el molde un día, luego extraer con el equipo de eyector de muestras, dejar curar por 7 días al aire

libre), se procede a realizar el ensayo de la Gravedad Especifica Bulk, dicha norma establece que la diferencia máxima permitida entre dos valores de gravedad específica Bulk es de 0.02, para que puedan ser promediados, aquella gravedad Bulk que sobrepasa dicho valor es descartada. Las **Tablas 117 (C, D, E, F, G)**, contiene los datos obtenidos de ensayo necesarios para calcular la gravedad específica Bulk de cada uno de los grupos.

Tabla 117C. Valores para el cálculo de la gravedad específica Bulk, para la mezcla de diseño Patrón, a 4.75% de Emulsión Asfáltica.

N° de Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso seco en gramos (A)	Peso sumergido en agua a 25°C en gramos (C)	Peso superficialmente seco SSS en gramos (B)	Peso específico Bulk	Promedio Peso específico Bulk
P1	10.38	7.07	1237.80	692.30	1250.00	2.217	2.245
P2	10.35	6.75	1203.70	688.30	1213.00	2.292	
P3	10.36	6.92	1233.20	689.70	1242.70	2.228	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 117D. Valores para el cálculo de la gravedad específica Bulk, para la mezcla de diseño Patrón, a 5.25% de Emulsión Asfáltica.

N° de Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso seco en gramos (A)	Peso sumergido en agua a 25°C en gramos (C)	Peso superficialmente seco SSS en gramos (B)	Peso específico Bulk	Promedio Peso específico Bulk
P4	10.25	6.34	1152.30	682.50	1163.40	2.393	2.283
P5	10.33	7.20	1239.80	689.70	1247.30	2.221	
P6	10.31	7.20	1228.90	686.70	1236.10	2.234	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 117E. Valores para el cálculo de la gravedad específica Bulk, para la mezcla de diseño Patrón, a 5.75% de Emulsión Asfáltica.

N° de Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso seco en gramos (A)	Peso sumergido en agua a 25°C en gramos (C)	Peso superficialmente seco SSS en gramos (B)	Peso específico Bulk	Promedio Peso específico Bulk
P7	10.37	7.10	1240.50	672.90	1245.60	2.164	2.170
P8	10.32	7.24	1247.50	679.70	1253.60	2.171	
P9	10.34	7.18	1245.80	675.50	1248.00	2.174	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 117F. Valores para el cálculo de la gravedad específica Bulk, para la mezcla de diseño Patrón, a 6.25% de Emulsión Asfáltica.

Nº de Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso seco en gramos (A)	Peso sumergido en agua a 25°C en gramos (C)	Peso superficialmente seco SSS en gramos (B)	Peso específico Bulk	Promedio Peso específico Bulk
P10	10.34	7.17	1257.30	690.80	1264.50	2.189	2.180
P11	10.32	7.19	1258.10	683.80	1261.90	2.174	
P12	10.26	7.18	1250.40	683.40	1257.00	2.178	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 117G. Valores para el cálculo de la gravedad específica Bulk, para la mezcla de diseño Patrón, a 6.75% de Emulsión Asfáltica.

Nº de Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso seco en gramos (A)	Peso sumergido en agua a 25°C en gramos (C)	Peso superficialmente seco SSS en gramos (B)	Peso específico Bulk	Promedio Peso específico Bulk
P13	10.37	7.40	1267.00	688.20	1276.00	2.153	2.151
P14	10.26	7.36	1266.80	684.80	1274.00	2.148	
P15	10.37	7.15	1242.70	682.00	1259.00	2.151	

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se da un ejemplo de cálculo de Gravedad Específica Bulk (**Gmb**), para los datos de la **Tabla 117G**, el valor de K = 09989 (factor de corrección de temperatura).

$$\text{Peso Específico Aparente a } 25^{\circ}\text{C (Gmb)} = \frac{A}{(B - C)} * k$$

$$(\text{Gmb}) \text{ P13} = \frac{1267.00}{1276.00 - 688.20} * 0.9989 = \mathbf{2.153}$$

$$(\text{Gmb}) \text{ P14} = \frac{1266.80}{1274.00 - 684.80} * 0.9989 = \mathbf{2.148}$$

$$(\text{Gmb}) \text{ P15} = \frac{1242.70}{1259.00 - 682.00} * 0.9989 = \mathbf{2.151}$$

No se rechaza ningún valor, ya que la diferencia entre ellos es menor a 0.02; por tanto el valor promedio de gravedad específica Bulk a 6.75% de emulsión asfáltica para la mezcla de diseño Patrón es:

$$\text{Gmb (Promedio)} = \frac{2.153 + 2.148 + 2.151}{3} = 2.151$$

3.6.25.5.2. Ensayo de Densidad teórica máxima, para el diseño de mezcla Patrón de acuerdo a la Norma MTC E-508.

La gravedad específica teórica máxima, como su nombre lo dice es la máxima densidad que puede presentar una mezcla asfáltica, ya que no considera vacíos en la muestra por estar esta en condición suelta, simplemente es la densidad de sólo las partículas de agregado recubiertas por el asfalto aportado por la emulsión asfáltica; es complementaria de la gravedad específica Bulk, ya que con los valores encontrados de dichas gravedades se obtiene el porcentaje de vacíos (% Pa), la **Tabla 117H** muestra el resumen de los datos para determinar la Densidad Teórica Máxima para la mezcla de diseño Patrón.

Tabla 117H. Datos para la determinación de la Densidad Teórica Máxima dela mezcla de diseño Patrón.

% Emulsión Asfáltica	Peso muestra seca ((Wmuestra) (gr.)	Peso picnómetro seco y vacío (Wpicnómetro) (gr.)	Peso picnómetro + muestra (Wpicnómetro + muestra) (gr.)	Peso picnómetro lleno de agua a 25°C (Wpicnómetro + agua) (gr.)	Peso picnómetro + muestra + agua a 25°C (Wdespués del ensayo) (gr.)	Peso específico Máximo de la muestra (Gmm) (Gmm)
4.75	914.20	273.40	1187.60	1140.80	1680.00	2.438
5.25	917.80	273.40	1191.20	1140.80	1676.20	2.400
5.75	928.90	273.40	1202.30	1140.80	1670.60	2.327
6.25	937.80	273.40	1211.20	1140.80	1671.10	2.301
6.75	928.80	273.40	1202.20	1140.80	1669.20	2.320

Fuente: Elaboración propia.

A continuación como ejemplo se determina el Peso Específico Teórico Máximo de una muestra de diseño patrón con 4.5% de emulsión asfáltica.



$$Gmm = \frac{W \text{ muestra}}{W \text{ muestra} + W \text{ picnómetro+agua} - W \text{ después ensayo}}$$

Donde:

Gmm = Peso específico Máximo de la muestra

Wmuestra = Peso de la muestra

Wpicnómetro + agua = Peso picnómetro lleno de agua a 25°C

Wdespues del ensayo = Peso de la muestra total (agua+picnómetro+ muestra)

$$Gmm \text{ (Patrón, 4.75\%)} = \frac{914.20}{914.20 + 1140.80 - 1680.00}$$

$$Gmm \text{ (Patrón, 4.75\%)} = 2.438$$

3.6.25.5.3. Ensayo de Estabilidad y Flujo para el diseño de mezcla Patrón, de acuerdo a la Norma MTC E-504.

El valor de Estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, las quijadas (cabezales) superior e inferior del aparato se acercan y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador dial, luego se suspende la carga una vez se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de Estabilidad Marshall, debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla asfáltica a la deformación.

Sin embargo en las mezclas asfálticas no siempre se aplica que si un valor de Estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mejor, Estabilidades extremadamente altas se obtienen a sacrificio de durabilidad, por lo que un valor de estabilidad demasiado alto no siempre es bueno en una carpeta asfáltica, todo dependerá de las sollicitaciones del tráfico para un determinado proyecto.

El valor del Flujo Marshall, medida en centésimas de pulgada, representa la deformación de la briqueta, la deformación está indicada por la disminución en el diámetro de la briqueta.

Los resultados del ensayo de Estabilidad y Flujo obtenidos para el diseño de mezcla Patrón se presentan en la **Tabla 117I** que se muestra a continuación:

Tabla 117I. Valores de Estabilidad y Flujo determinados para el Diseño de Mezcla Patrón.

% De Emulsión Asfáltica 4.75					
Muestra Patrón	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Estabilidad (KN)	Flujo (mm)
Pm1	10.245	6.825	1227.00	44.50	4.453
Pm2	10.235	6.995	1242.00	46.30	4.569
Pm3	10.255	6.685	1215.00	42.70	4.467
Promedio	10.245	6.835	1228.00	44.50	4.496

% De Emulsión Asfáltica 5.25					
Muestra Patrón	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Estabilidad (KN)	Flujo (mm)
Pm4	10.145	7.265	1244.00	30.54	3.813
Pm5	10.185	7.185	1243.00	24.23	4.614
Pm6	10.145	6.865	1209.00	43.70	4.864
Promedio	10.158	7.105	1232.00	32.82	4.430

% De Emulsión Asfáltica 5.75					
Muestra Patrón	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Estabilidad (KN)	Flujo (mm)
Pm7	10.175	7.265	1252.00	30.28	3.841
Pm8	10.165	7.215	1243.00	19.86	4.562
Pm9	10.265	7.135	1238.00	18.72	3.566
Promedio	10.202	7.205	1244.33	22.95	3.990

% De Emulsión Asfáltica 6.25					
Muestra Patrón	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Estabilidad (KN)	Flujo (mm)
Pm10	10.185	7.345	1255.00	22.04	3.44
Pm11	10.335	7.115	1244.00	12.02	4.275
Pm12	10.155	7.365	1251.00	17.20	4.467
Promedio	10.225	7.275	1250.00	17.09	4.061

% De Emulsión Asfáltica 6.75					
Muestra Patrón	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Estabilidad (KN)	Flujo (mm)
Pm13	10.165	7.385	1266.00	15.57	4.192
Pm14	10.165	7.375	1265.00	12.82	4.788
Pm15	10.155	7.455	1267.00	15.14	4.588
Promedio	10.162	7.405	1266.00	14.51	4.523

Fuente. Elaboración propia.

Si vemos en la **Tabla 117I** y queremos determinar el promedio de Estabilidad Marshall del grupo de briquetas de diseño Patrón a **6.75%** de Emulsión Asfáltica, se suman los valores encontrados y se divide por el número de briquetas ensayado del grupo, el mismo procedimiento se realiza para determinar el Flujo promedio del grupo.

$$\text{Estabilidad (6.75\%)} = \frac{\text{Pm13} + \text{Pm14} + \text{Pm15}}{3}$$

$$\text{Estabilidad (6.75\%)} = \frac{15.57 + 12.82 + 15.14}{3} = \mathbf{14.51 \text{ KN}}$$

$$\text{Flujo (6.75\%)} = \frac{\text{Pm13} + \text{Pm14} + \text{Pm15}}{3}$$

$$\text{Flujo (6.75\%)} = \frac{4.19 + 4.79 + 4.59}{3} = \mathbf{4.5227 \text{ mm}}$$

3.6.25.6. Análisis de los resultados para el diseño de mezcla Patrón.

Después que se han realizado los ensayos Marshall es necesario realizar el tercer procedimiento contemplado en el método Marshall modificado: Análisis de la densidad y el contenido de vacíos en las briquetas; esto se hace mediante al análisis de los datos obtenidos de los ensayos de laboratorio, para ello se deben hacer diversos cálculos para obtener ciertos valores y posteriormente elaborar los seis gráficos con los que se podrá obtener el contenido óptimo de emulsión asfáltica para el diseño de mezcla Patrón, este análisis comprende:

- Densidad.
- Vacíos de aire.
- Vacíos en el agregado mineral.
- Vacíos llenos de asfalto.

3.6.25.6.1. Análisis de la Densidad para el diseño de mezcla Patrón, de acuerdo a la Norma MTC E-514.

La densidad de cada serie de briquetas de prueba es calculado multiplicando la Gravedad Específica Bulk por la densidad del agua a la temperatura de ensayo (°C), los ensayos se realizaron a 30°C por lo que la densidad del agua a esta temperatura es: 0.995678 gr/cm³ entonces la fórmula es:



$$\text{Densidad} = G_{mb} \times 0.995678 \text{ gr/cm}^3$$

Donde:

$$G_{mb} = \text{Gravedad Específica Bulk}$$

Los valores de densidad para cada dosificación de emulsión asfáltica del diseño de mezcla Patrón han sido calculados a partir de los promedios de la gravedad específica Bulk, los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 118A**.

Tabla. 118A. *Resumen de valores de Densidad, Gravedad Específica Bulk, Peso Específico Teórico Máximo, % de vacíos; para el Diseño de Mezcla Patrón.*

% Emulsión Asfáltica	Densidad Promedio (gr/cm³)	Peso Específico Bulk (G_{mb})	Peso Específico Máximo de la Muestra (G_{mm})	% De Vacíos de Aire (P_a)
4.75	2.235	2.245	2.404	6.59
5.25	2.273	2.283	2.367	3.53
5.75	2.160	2.170	2.295	5.46
6.25	2.170	2.180	2.269	3.92
6.75	2.141	2.151	2.287	5.97

Fuente. Elaboración propia.

Ejemplo para 4.75% de emulsión asfáltica

$$\text{Densidad} = 2.245 \times 0.995678 \text{ gr/cm}^3 = 2.235 \text{ gr/cm}^3$$

3.6.25.6.2. Análisis del porcentaje de Vacíos (P_a), para el diseño de mezcla patrón, de acuerdo a la Norma MTC E-505.

El propósito del análisis es determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada, el cual en el diseño debe de estar entre 4 y 6%. Los vacíos son pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto, como ya se había mencionado antes existe una relación entre la Gravedad Específica Bulk y la Densidad Teórica Máxima ya que son de las cuales se obtiene el porcentaje de vacíos, la teórica máxima no contempla vacíos en la muestra; mientras que una briqueta compactada sí contiene vacíos en su interior, por lo tanto la Gravedad Específica Bulk es menor que la Densidad Teórica Máxima, la cual está determinada de por:

$$P_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

Donde:

P_a = vacíos de aire en mezcla compactada, porcentajes del volumen total

G_{mm} = gravedad específica máxima teórica de mezclas de pavimentación

G_{mb} = gravedad específica bulk de mezclas compactadas

Se toman datos para un contenido de asfalto de **4.75 %**, ver **Tabla 4.33**

$$G_{mm} = 2.404$$

$$G_{mb} = 2.245$$

$$P_a = \frac{2.448 - 2.245}{2.417} \times 100 = 6.59 \%$$

3.6.25.6.3. Análisis de Vacíos en agregado mineral (VMA), para el diseño de mezcla Patrón, de acuerdo a la Norma INV E-799.

Los vacíos en el agregado mineral VMA están definidos por el espacio inter granular de vacíos que se encuentran entre las partículas de agregado de la mezcla para pavimentación compactada, incluye los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, y se expresa como un porcentaje del volumen total de la mezcla, para los vacíos en agregado mineral se obtuvieron los valores mostrados en la **Tabla 118B**.

Tabla 118B. Valores para el cálculo del porcentaje de vacíos en el agregado Mineral VMA, para el diseño de mezcla Patrón.

% Emulsión Asfáltica	Gravedad Específica Bulk de la mezcla compactada (G_{mb})	Porcentaje de agregado por peso total en la mezcla (P_s)	Gravedad Específica Bulk de la combinación de agregados (G_{bs})	VMA (%)
4.75	2.25	95.25	2.45	12.77
5.25	2.28	94.75	2.43	11.12
5.75	2.17	94.25	2.42	15.36
6.25	2.18	93.75	2.40	14.78
6.75	2.15	93.25	2.38	15.78

Fuente. Elaboración propia.



A continuación se realiza el cálculo del VMA como ejemplo para **4.75%** de emulsión asfáltica del diseño de mezcla patrón, de acuerdo a la fórmula:

$$VMA = 100\% - \left(\frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \right)$$

Donde:

VMA= vacíos en agregado mineral (porcentaje de volumen total de la mezcla)

G_{sb}= gravedad específica bulk de la combinación de agregados

G_{mb}= gravedad específica bulk de la mezcla compactada

P_s= porcentaje de agregado, por peso total en la mezcla

P_s = 100-4.75 = 95.25%, se opera como valor (95.25).

G_{mb} = 2.25

G_{sb} = 2.45

$$VMA = 100\% - \frac{2.25 \times 95.25\%}{2.45} = 12.77\%$$

$$VMA = 12.77\%$$

3.6.25.6.4. Análisis de Vacíos llenos de asfalto (VFA), para el diseño de mezcla Patrón, de acuerdo a la Norma INV E-799.

Los vacíos llenos de asfalto, VFA, son el porcentaje de vacíos inter-granulares entre las partículas de agregados (VMA) que se encuentran llenos de asfalto, el VMA abarca asfalto y aire, mientras que el VFA sólo el asfalto que une a los agregados (asfalto efectivo), el valor de VFA se expresa como un porcentaje. Finalmente se calculan los vacíos llenos de asfalto dándonos los resultados de la **Tabla 118C**.

Tabla 118C. Valores para el cálculo del porcentaje de vacíos llenos de asfalto VFA, para el diseño de mezcla Patrón.

% Emulsión Asfáltica	Vacíos en agregado mineral (VMA %)	Porcentaje de vacíos (Pa %)	Vacíos llenos de asfalto (VFA %)
4.75	12.77	6.59	48.43
5.25	11.12	3.53	68.24
5.75	15.36	5.46	64.44
6.25	14.78	3.92	73.48
6.75	15.78	5.97	62.19

Fuente. Elaboración propia.

A continuación se realiza el cálculo de los vacíos llenos de asfalto como ejemplo, para un contenido de **4.75 %** de Emulsión Asfáltica del diseño de mezcla Patrón, de acuerdo a la fórmula:

$$VFA = \frac{VMA - P_a}{VMA} \times 100$$

Donde:

VFA= vacíos llenos con asfalto, porcentaje de VMA

VMA= vacíos en agregado mineral (porcentaje de volumen bula)

P_a= vacíos de aire en mezcla compactada, porcentajes del volumen total

VMA = 12.77%

P_a = 6.59%

$$VFA = \frac{12.77 - 6.59}{12.77} \times 100 = 48.43\%$$
$$VFA = 48.43\%$$

Todo este proceso conlleva a la obtención de todos los datos necesarios para elaborar los gráficos que contempla el método Marshall modificado para mezclas en frío.

3.6.25.6.5. Análisis de resultados del ensayo Marshall modificado, para el diseño de mezcla Patrón.

La **Tabla 118D** contiene un resumen de todos los datos necesarios para las gráficas, con las que se definirá el contenido óptimo de emulsión asfáltica para el diseño de mezcla Patrón, siguiendo un

procedimiento para analizar todas las gráficas con un valor específico de 5% de vacíos, considerando que es el valor promedio de la especificación para vacíos esta entre 4 a 6%.

Tabla 118D. Resumen de valores necesarios para el trazo de gráficas, diseño de mezcla Patrón.

Contenido de Emulsión Asfáltica (%)	Densidad (gr/cm ³)	% de Vacíos	% VMA	% VFA	Estabilidad (kg)	Flujo (mm)
4.75	2.235	6.59	12.77	48.43	44.50	4.491
5.25	2.273	3.53	11.12	68.24	32.82	4.430
5.75	2.160	5.46	15.36	64.44	22.95	3.990
6.25	2.170	3.92	14.78	73.48	17.09	4.061
6.75	2.141	5.97	15.78	62.19	14.51	4.523

Fuente. Elaboración propia.

a) Gráfico de resultados.

Después de la realización de los ensayos y obtener sus resultados, estos son trazados en gráficas **Figura 67A, 67B, 68A, 68B, 69A y 69B**, para poder entender las características particulares de cada briqueta usada en la serie.

Los valores graficados en el eje de las ordenadas (Y) son: porcentaje de vacíos, porcentaje de VMA, porcentaje de VFA, Densidad, Estabilidad y Flujo, todos contra el valor en las abscisas (X) que son los diferentes porcentajes de Emulsión Asfáltica.

b) Relaciones y observaciones de resultados de los ensayos.

Cuando los resultados de los ensayos se trazan en gráficas, usualmente revelan ciertas tendencias en las relaciones entre el contenido de Emulsión Asfáltica y las propiedades de la mezcla, a continuación se enuncian ciertas tendencias que pueden observarse al estudiar las gráficas:

- El porcentaje de vacíos disminuye a medida que aumenta el contenido de Emulsión asfáltica.
- El porcentaje de vacíos en el agregado mineral (% VMA) generalmente disminuye hasta un valor mínimo, y luego aumenta con aumentos en el contenido de Emulsión asfáltica.
- El porcentaje de vacíos llenos de asfalto (% VFA) aumenta con aumentos en el contenido de Emulsión asfáltica.

- La curva para la densidad de la mezcla de diseño Patrón, es similar a la curva de Estabilidad, excepto que la densidad máxima se presenta a un contenido de Emulsión asfáltica ligeramente mayor que el que determina la máxima Estabilidad.
- Hasta cierto punto, los valores de estabilidad aumentan a medida que el contenido de Emulsión asfáltica aumenta. Más allá de este punto, la Estabilidad disminuye con cualquier aumento en el contenido de Emulsión asfáltica.
- Los valores de Flujo aumentan con aumentos en el contenido de Emulsión asfáltica.

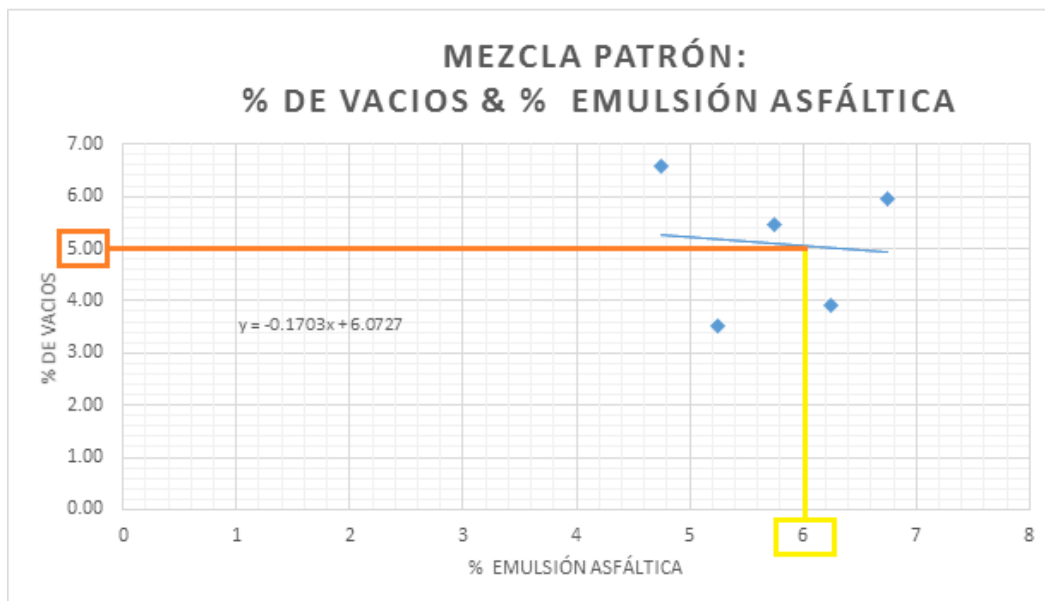


Figura 67A. Resultados ensayo Marshall modificado: % de Vacíos & % óptimo de Emulsión Asfáltica (6%), mezcla de diseño Patrón, (**Fuente.** Elaboración propia).

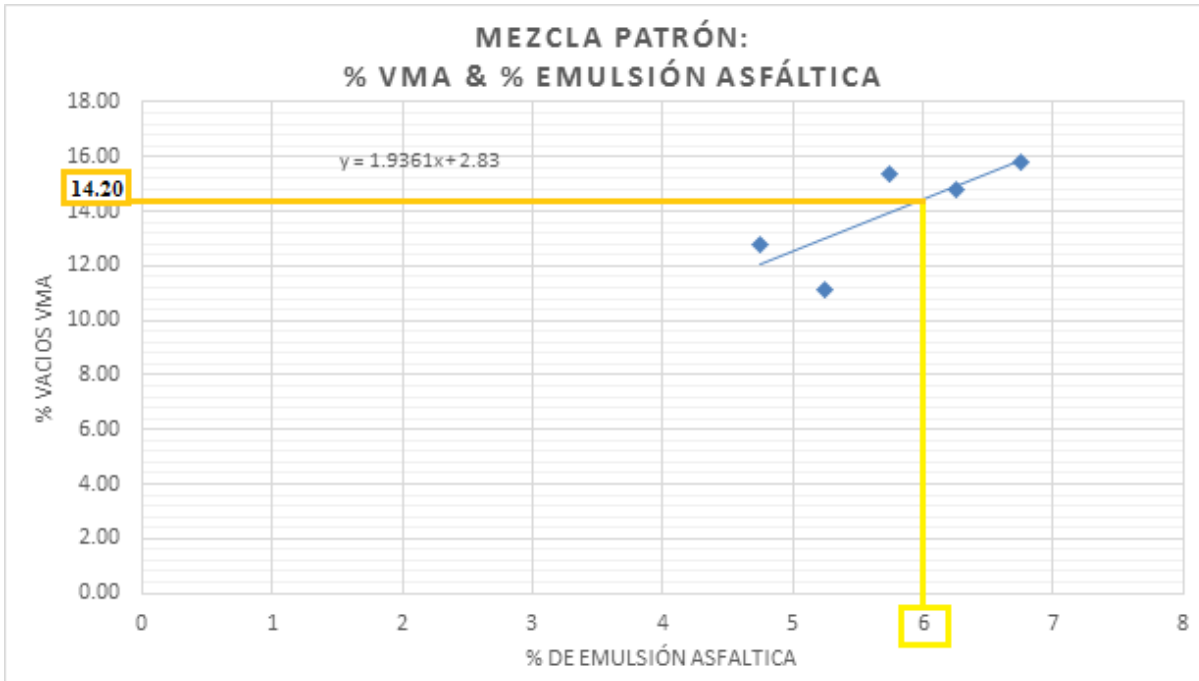


Figura 67B. Resultados ensayo Marshall modificado: % VMA & % óptimo de Emulsión Asfáltica (6%), mezcla de diseño Patrón, (Fuente. Elaboración propia).

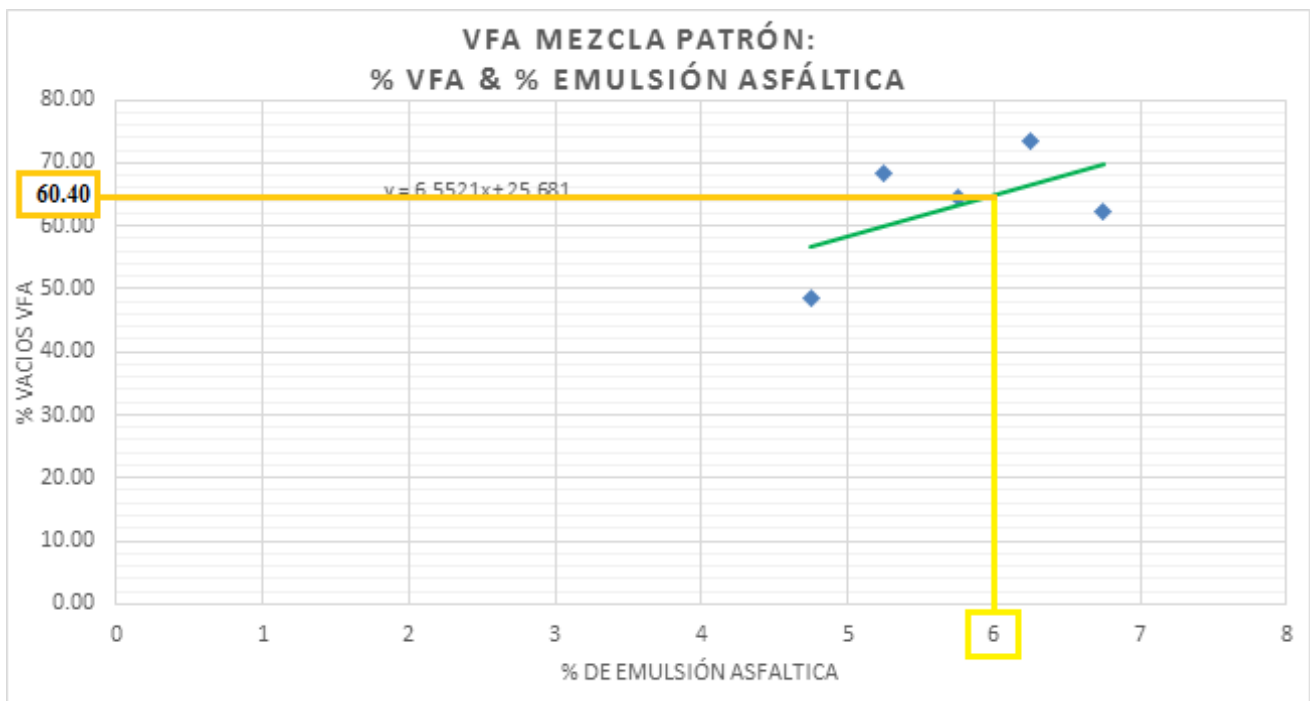


Figura 68A. Resultados ensayo Marshall modificado: % VFA & % óptimo de Emulsión Asfáltica (6%), mezcla de diseño Patrón, (Fuente. Elaboración propia).

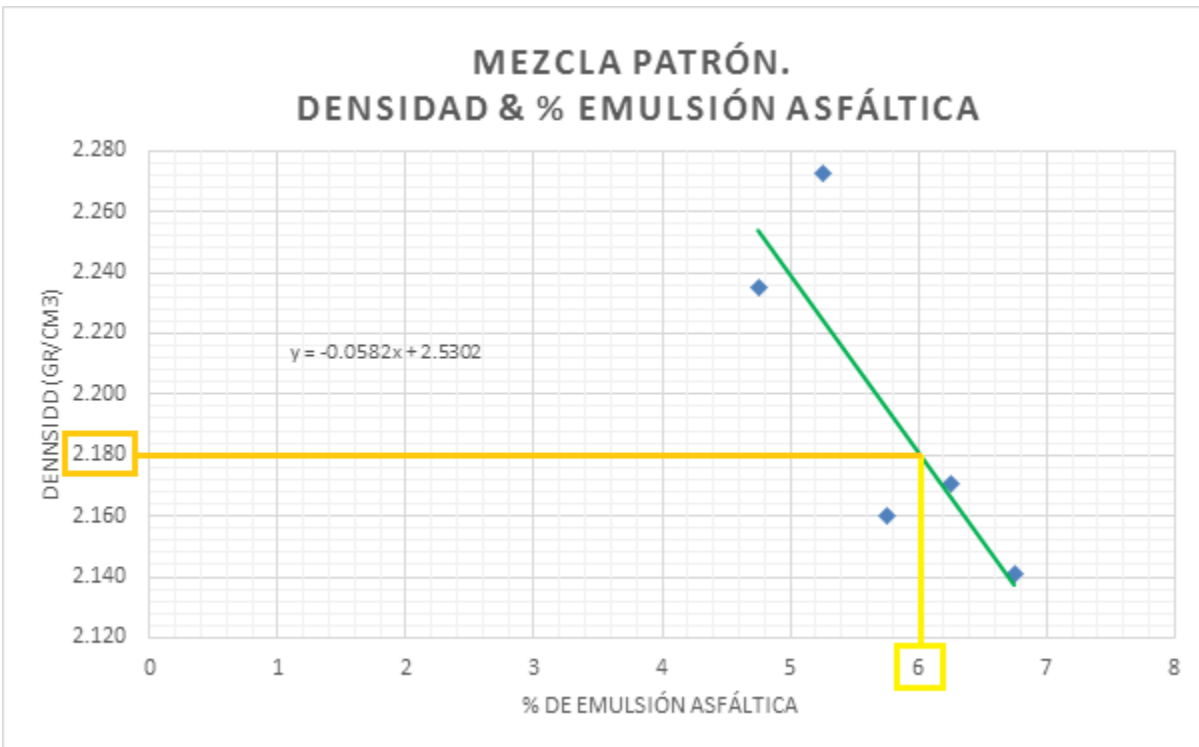


Figura 68B. Resultados ensayo Marshall Modificado: Densidad & % óptimo de Emulsión Asfáltica (6%), mezcla de diseño Patrón, (**Fuente.** Elaboración propia).

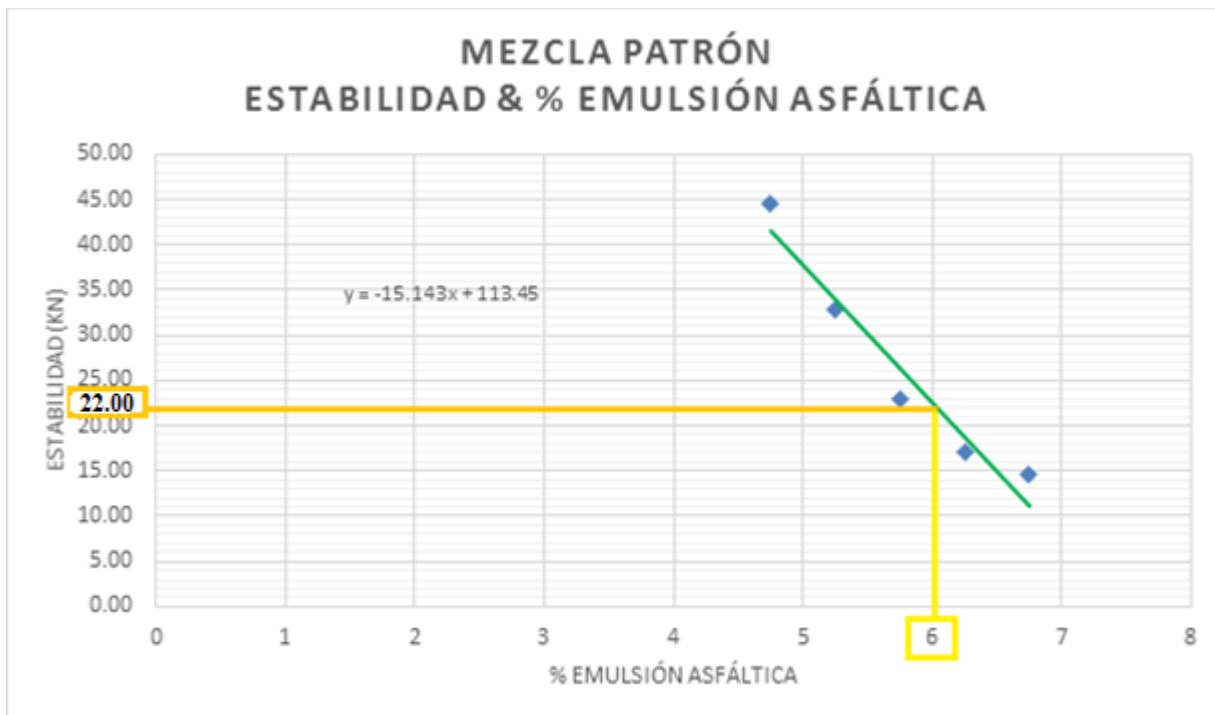


Figura 69A. Resultados ensayo Marshall modificado: Estabilidad & % óptimo de Emulsión Asfáltica (6%), mezcla de diseño Patrón, (**Fuente.** Elaboración propia).

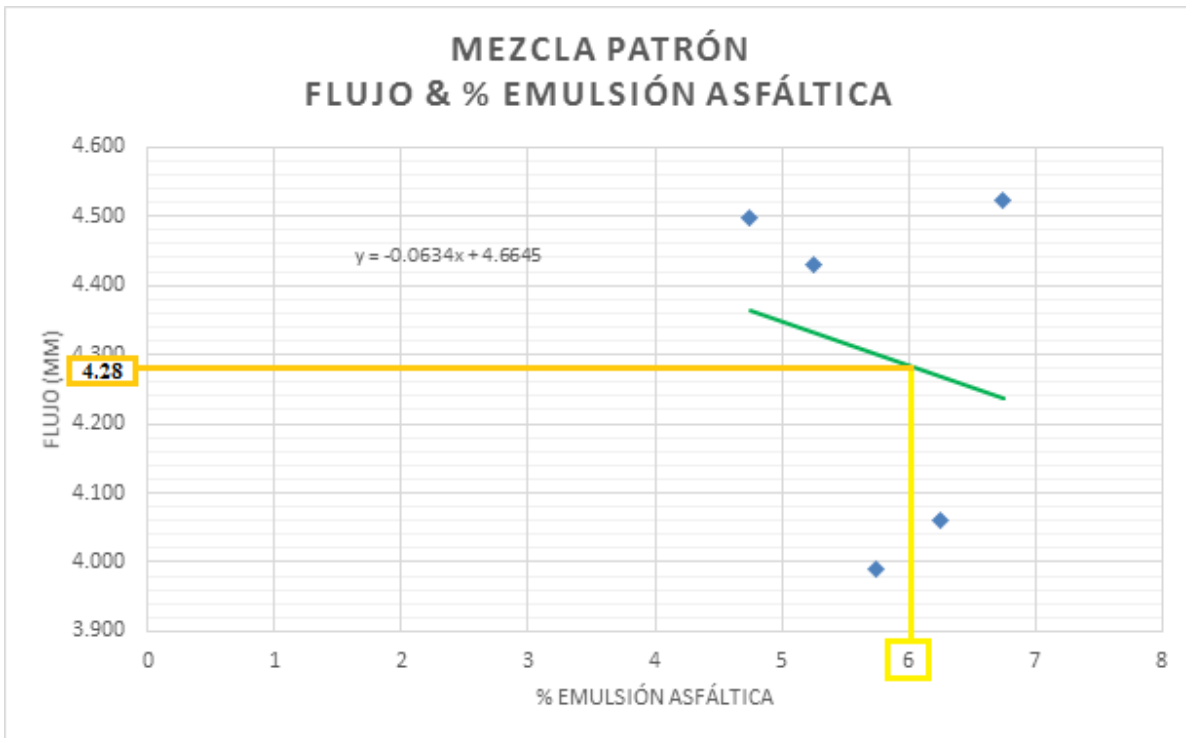


Figura 69B. Resultados ensayo Marshall modificado: Flujo & % óptimo de Emulsión Asfáltica (6%), mezcla de diseño Patrón, (Fuente. Elaboración propia).

Las **Figuras 67A, 67B, 68A, 68B, 69A y 69B** proporcionan los resultados de los ensayos Marshall Modificado para el diseño de mezcla Patrón, cada gráfica tiene trazados los resultados de los diferentes ensayos, los valores de estos resultados están representados por puntos. La **Figura 67A** muestra los porcentajes de vacíos; la **Figura 67B** muestra los porcentajes de vacío en el agregado mineral (% VMA); la **Figura 68A** muestra los porcentajes de vacíos llenos de asfaltos (% VFA); la **Figura 68B** muestra la Densidad; la **Figura 69A** muestra los valores de Estabilidad Marshall y la **Figura 69B** muestra los valores de Flujo Marshall.

En cada gráfica, se trazan líneas de tendencia con curvas suavizadas, rechazando los puntos que se encuentren muy dispersos.

Observando las **Figuras 67A, 67B, 68A, 68B, 69A y 69B**, se puede decir que todos los gráficos presentan la tendencia que se espera para este tipo de análisis.

c) **Determinación del contenido óptimo de Emulsión Asfáltica.**

El contenido óptimo de Emulsión Asfáltica para el diseño de mezcla Patrón se determina a partir del análisis de los resultados de las **Figuras 67A, 67B, 68A, 68B, 69A y 69B**, el requisito del método Marshall Modificado para vacíos en mezclas asfálticas diseñadas en laboratorio es de 4% a 6%, para analizar las gráficas primeramente se obtiene el valor promedio de dichos vacíos que es 5% de vacíos, con este valor son comprobadas todos los parámetros.

Trace una línea horizontal (línea naranja en la **Figura 67A** que corte el valor de 5% de vacíos en el eje de las ordenadas e intercepte la gráfica, desde este punto de intercepción trace una línea vertical (línea amarilla en la **Figura 67A** que corte el eje horizontal (abscisas) y registre el valor de porcentaje de Emulsión Asfáltica en dicha intersección; el valor determinado de esta forma será tomado como el contenido óptimo de Emulsión Asfáltica. Luego, con este contenido óptimo de Emulsión Asfáltica evalúe todas las gráficas para encontrar todos los parámetros de control y luego compárelos con las especificaciones de diseño del método Marshall modificado, para verificar si los valores encontrados cumplen los parámetros.

La manera para encontrar todos los parámetros es trazando una línea vertical desde el contenido óptimo de Emulsión Asfáltica encontrado (6%), hasta que esta línea intercepte la gráfica; luego a partir de esta intercepción trace una línea horizontal que intercepte el eje vertical, de esta manera se pueden obtener cada uno de los parámetros de control que serán comparados con las especificaciones. Si se cumplen todos los criterios de las especificaciones, el contenido de Emulsión Asfáltica encontrado con el cual se evaluaron todos los parámetros en las **Figuras 67A, 67B, 68A, 68B, 69A y 69B**, será considerado el contenido de emulsión asfáltico óptimo para el diseño de la mezcla Patrón, si uno de los criterios no cumple será necesario hacer algunos ajustes o volver a rediseñar la mezcla.

3.6.25.7. Parámetros de diseño encontrados para el diseño de mezcla Patrón.

Del procedimiento de análisis de las **Figuras 67A, 67B, 68A, 68B, 69A y 69B**, se obtuvieron los siguientes datos: para un contenido de 5% de vacíos se determinó un 6.00 % de Emulsión Asfáltica como óptimo, luego con este contenido óptimo de Emulsión Asfáltica se determinaron los valores de las otras propiedades:

- Emulsión Asfáltica (**Figura 67A**) = 6.00 %
- Porcentaje de vacíos de aire (**Figura 67A**) = 5.00 %
- Porcentaje de VMA (**Figura 67B**) = 14.20 %

- Porcentaje de VFA (**Figura 68A**) = 60.40 %
- Densidad (**Figura 68B**) = 2.18 gr/cm³
- Estabilidad (**Figura 69A**) = 22.00 KN
- Flujo (**Figura 69B**) = 4.28 mm

Luego los valores determinados mediante el análisis de las **Figuras 67A, 67B, 68A, 68B, 69A y 69B**, son comparados con los valores recomendados por el Instituto del Asfalto (U.S.A.) en los criterios de diseño Marshall mostrados en la **Tabla 7C**; la **Tabla 118E** contiene un resumen de la comparación entre los valores obtenidos a partir de los gráficos y los establecidos en el diseño Marshall Modificado.

Tabla 118E. Comparación entre los datos obtenidos y los criterios del método Marshall modificado, para el diseño de mezcla Patrón.

Criterios para mezcla del método Marshall Modificado	Valores obtenidos	Tránsito ligero a medio carpeta y base	
		Mínimo	Máximo
Compactación, número de golpes en cada cara de la probeta	50	50	50
Estabilidad (KN)	20.40	5.33	-
Flujo (mm)	4.28	3	5
% de vacíos	5.00	4	6
		Para 5.00 % de contenido de vacíos, se toma un valor mínimo de 7.8 % para agregados de tamaño máximo nominal 1", según la Tabla 7D .	
% VMA	14.20		
% VFA	60.40	40	70

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte, Mezclas asfálticas en frío, (Delgado H., 2004).

De la **Tabla 18E** se puede observar que todos los valores cumplen con los criterios de diseño Marshall modificado, por lo que se concluye que la dosificación de agregados de:

- Agregado Grueso 1=22.72%
- Agregado Grueso 2 = 11.23%
- Agregado Fino 1 = 29.77%
- Agregado Fino 2 = 29.78%
- Filler = 6.50%

Es viable, por lo tanto esta es nuestra dosificación de agregados para el diseño de mezcla Patrón.

Tabla 118F. *Granulometría de agregado obtenido y Especificación granulométrica MTC Tipo MDF-2, con 6% de Emulsión asfáltica como óptimo.*

Tamiz		Especificación para mezclas densas en frío MTC (%)	Valores obtenidos de dosificación de agregados para diseño de mezcla Patrón (%)
Normal	Alterno	MDF-2	A 6% de Emulsión Asfáltica
38.1mm	1 1/2"	-	-
25.0mm	1"	100	100.00
19.0mm	3/4"	80-95	87.51
12.5mm	1/2"	-	-
9.5mm	3/8"	60-75	70.90
4.75mm	N°4	47-62	54.16
2.36mm	N°8	35-50	40.44
300um	N°50	13-23	16.62
75um	N°200	3-8	4.34

Fuente. Elaboración propia.

3.6.25.8. Formula de Trabajo encontrado para el diseño de mezcla Patrón.

La fórmula de trabajo es la dosificación con la cual se produce a la mezcla asfáltica en frío utilizando las proporciones relativas de materiales que se han establecido en el diseño de laboratorio, corroboradas con las **Tablas 118E y 118F**.

A través del proceso de diseño se determinó la siguiente fórmula de trabajo:

- Emulsión Asfáltica CSS-1h = 6%
- Agregado Grueso 1 = 22.72%
- Agregado Grueso 2 = 11.23%

- Agregado Fino 1 = 29.77%
- Agregado Fino 2 = 29.78%
- Filler = 6.50%
- Especificación del Ministerio de Transportes y Comunicaciones para diseño de mezclas en frío tipo: MDF-2.

Además de se cuenta con su respectiva banda de control, como se muestra en la **Tabla 118G**.

Tabla 118G. *Banda de control para la fórmula de trabajo según especificación MTC para mezclas densas en frío tipo MDF-2.*

Tamiz		Especificación MTC mezclas densas en frío (%)	Límite superior (%)	Límite inferior (%)
Normal	Alternativo		MDF-2	
38.1mm	1 1/2"	-	-	-
25.0mm	1"	100	100	100
19.0mm	3/4"	80-95	95	80
12.5mm	1/2"	-	-	-
9.5mm	3/8"	60-75	75	60
4.75mm	N°4	47-62	62	47
2.36mm	N°8	35-50	50	35
300um	N°50	13-23	23	13
75um	N°200	3-8	8	3

Fuente: Manual de carreteras “Especificaciones Generales para construcción” (EG-2013 MTC), Tabla 424-02, pág. 607.

- Rango de temperatura de mezclado en laboratorio: 10 ° C a 30 ° C.
- Rango de compactación en laboratorio: 10 ° C a 30 ° C.

La **Tabla 118H** muestra el resumen de los parámetros utilizados en el diseño de la mezcla asfáltica Patrón.

Tabla 118H. Cuadro Resumen de Diseño de mezclas Asfálticas en frío, para el diseño de mezcla Patrón, Especificación para mezclas densas frías tipo MDF-2.

N° de golpes de compactación: **50**
 Gravedad Especifica de Emulsión Asfáltica : **0.95**
 Emulsión asfáltica Tipo: **CSS-1h**
 Gravedad especifica Promedio de agregados: **2.6**

Probeta N°	% Emulsión	Masa de probetas en granos			Volumen (cm3)	Grav. Esp. Bulk	Grav. Esp. T. Máxima	Densidad (gr/cm3)	% Vacíos	% VMA	% VFA	Estabilidad (KN)	Flujo (mm)
		Seca (gr)	SSS (gr)	Sumergida (gr)									
1	4.50	1237.80	1250.00	692.30	562.62	2.22	2.42					44.50	4.45
2	4.50	1203.70	1213.00	688.30	575.51	2.29	2.44					46.30	4.57
3	4.50	1233.20	1242.70	689.70	552.16	2.23	2.46					42.70	4.47
Promedio						2.25	2.44	2.24	6.59	12.77	48.43	44.50	4.50
1	5.25	1152.30	1163.40	682.50	587.26	2.39	2.40					30.54	3.81
2	5.25	1239.80	1247.30	689.70	585.38	2.22	2.43					24.23	4.61
3	5.25	1228.90	1236.10	686.70	554.93	2.23	2.37					43.70	4.86
Promedio						2.28	2.40	2.27	3.53	11.12	68.24	32.82	4.43
1	5.75	1240.50	1245.60	672.90	590.74	2.16	2.29					30.28	3.84
2	5.75	1247.50	1253.60	679.70	585.52	2.17	2.32					19.86	4.56
3	5.75	1245.80	1248.00	675.50	590.48	2.17	2.37					18.72	3.57
Promedio						2.17	2.33	2.16	5.46	15.36	64.44	22.95	3.99
1	6.25	1257.30	1264.50	690.80	598.42	2.19	2.30					22.04	3.44
2	6.25	1258.10	1261.90	683.80	596.88	2.17	2.24					12.02	4.28
3	6.25	1250.40	1257.00	683.40	596.52	2.18	2.37					17.20	4.47
Promedio						2.18	2.30	2.17	3.92	14.78	73.48	17.09	4.06
1	6.75	1267.00	1276.00	688.20	599.31	2.15	2.37					15.57	4.19
2	6.75	1266.80	1274.00	684.80	598.50	2.15	2.30					12.82	4.79
3	6.75	1242.70	1259.00	682.00	603.81	2.15	2.29					15.14	4.59
Promedio						2.15	2.32	2.14	5.97	15.78	62.19	14.51	4.52

Fuente. Elaboración propia.

Para determinar la combinación adecuada de agregados, los parámetros de diseño y la fórmula de trabajo en los otros diseños considerados; es decir al **25%, 33.33% y 50%** de agregado reciclado de reemplazo se sigue el mismo procedimiento, usado también los porcentajes de prueba de emulsión asfáltica a **4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25% y 6.75%**, los resultados obtenidos se muestran en las **paginas 348, 349, 350, 351 y 352** de la presente tesis.

4. Capítulo IV. Resultados.

4.1. Resultado análisis granulométrico de agregado grueso, fino y agregado reciclado, Norma MTC E-204.

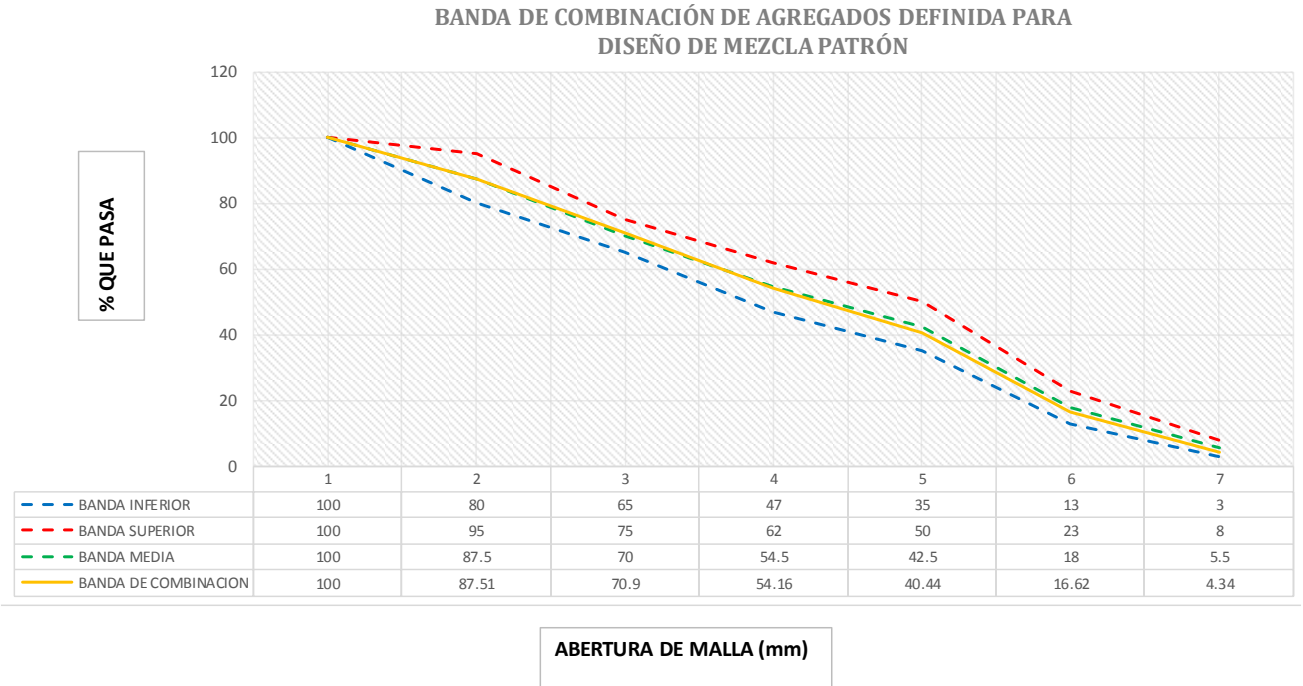


Figura 70A. Banda determinada del producto de la combinación de agregados para el diseño de mezcla patrón.

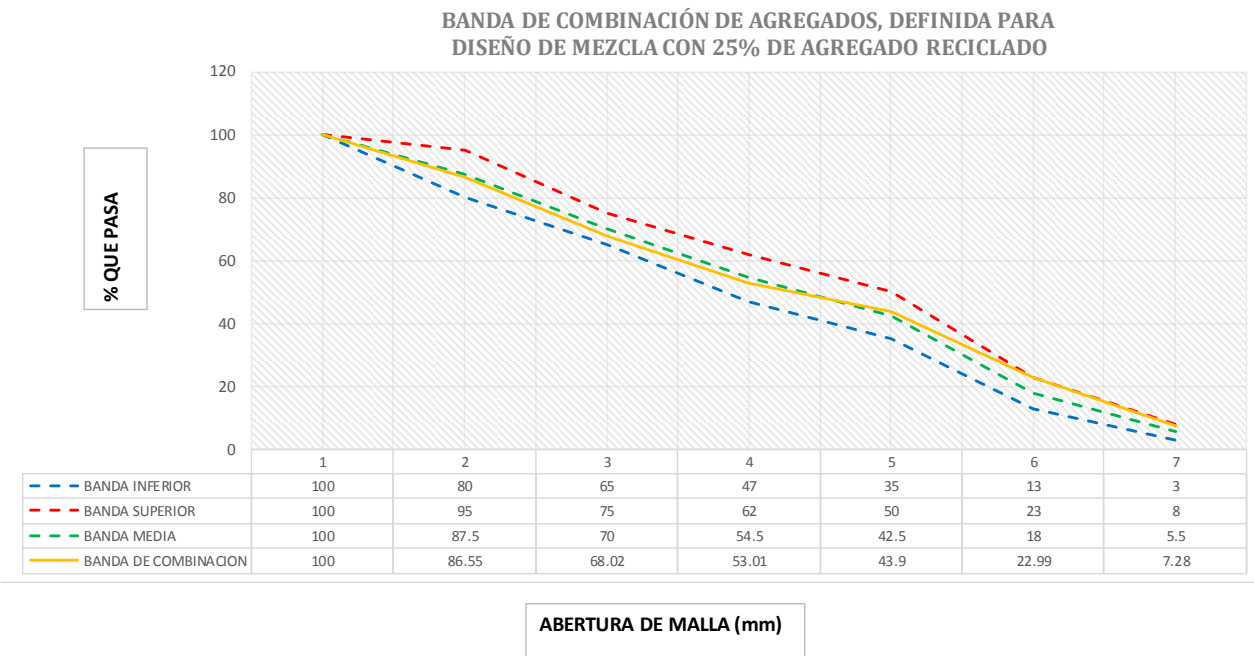


Figura 70B. Banda determinada del producto de la combinación de agregados para el diseño de mezcla con 25% de agregado reciclado.

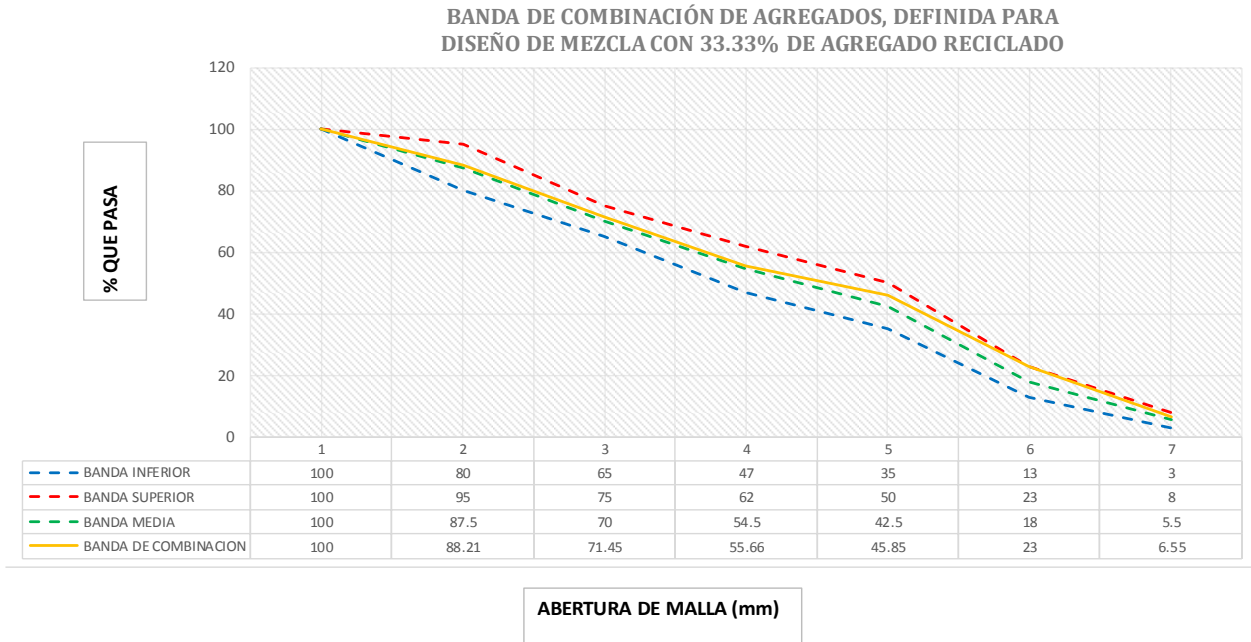


Figura 70C. Banda determinada del producto de la combinación de agregados para el diseño de mezcla con 33.33% de agregado reciclado.

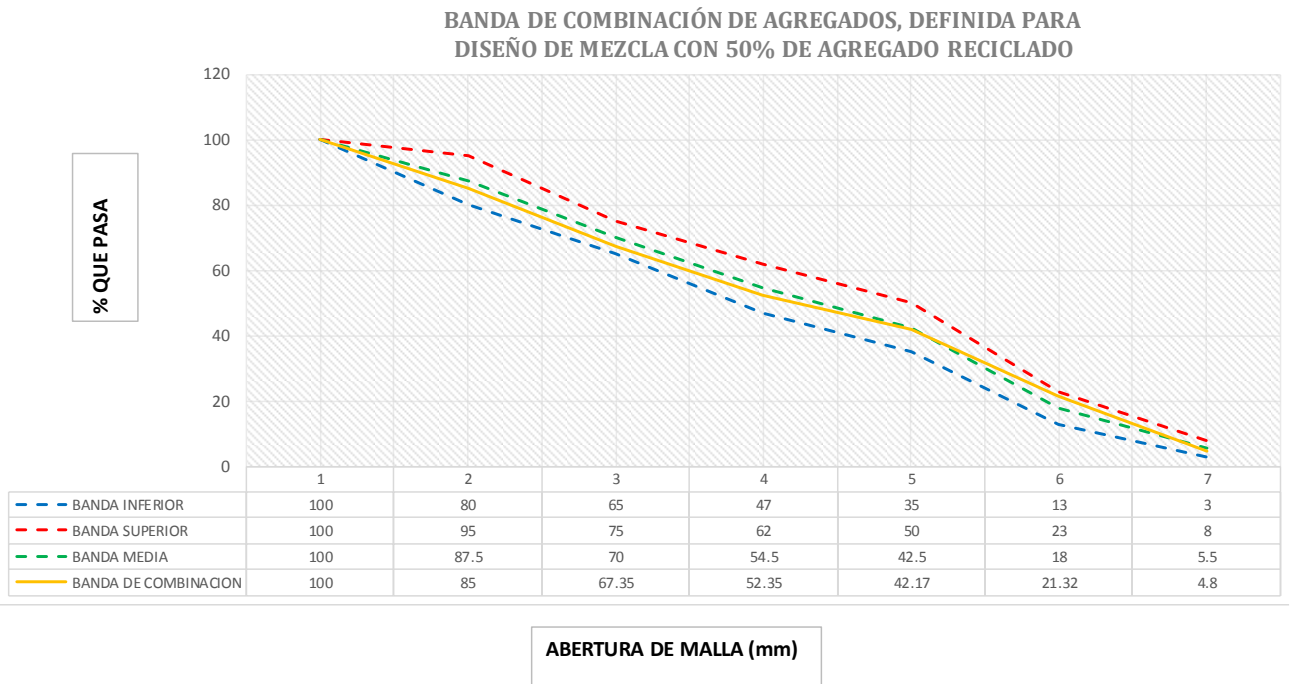


Figura 70D. Banda determinada del producto de la combinación de agregados para el diseño de mezcla con 50% de agregado reciclado.



La **figura 70A** muestra la tabla ajustada para el diseño granulométrico patrón; es decir con 100% de agregado nuevo, según el diseño utilizado para la presente tesis de mezclas densas en frío MDF-2 (**Tabla 7A pág. 33 de la presente tesis**) indicando los límites superior e inferior permitidos; de acuerdo a los agregados manejados se realizó la regresión de estas curvas ya que muestra los valores de porcentaje pasante y para diseñar requerimos los retenidos; con los datos de retenido en malla se determina los porcentajes exactos de cada agregado a utilizar ajustando la curva hasta encontrar una ideal intermedia a los límites, a esta la conocemos como curva gradada del diseño patrón.

Revisando la **figura 70B**, de la misma forma teniendo la regresión de agregados es decir los porcentajes de retenido por malla según el diseño patrón se reemplaza el 25% de los agregados nuevos por agregados reciclados dependiendo de la disposición de agregado reciclado por malla, esta disponibilidad de agregado origina la distorsión de la curva para ello se va corrigiendo malla por malla hasta encontrar la proporción exacta que ajuste la curva y tener la curva gradada de diseño para el diseño con agregado reciclado de reemplazo al 25%.

De la misma manera para obtener las curvas gradadas de las **figuras 70C y 70D** para reemplazos de agregados reciclados al 33.33% y 50% se sigue lo indicado en el párrafo anterior para reciclados con agregado de reemplazo al 25%.

El **ítem 3.6.1** (pág. 199 de la presente tesis) indica el procedimiento seguido para determinar las cantidades de agregados a utilizar en el diseño, obteniendo las **tablas 74, 75 y 76** para los agregados del diseño de mezcla patrón, indicadas en el mismo ítem; cabe señalar que el diseño para los agregados parte de una base de 100 kilogramos el cual es igual a 100% con esta relación se va separando por malla de acuerdo a la disponibilidad de agregado; es decir como ejemplo si para la malla $\frac{3}{4}$ " requerimos 12.48 kg =12.48% viendo la disposición de nuestros agregados tenemos del grueso 1 y grueso 2 entonces cada uno es el 50% de lo requerido por ello multiplicados por los 12.48 kg., teniendo 6.24 kg., de agregado grueso 1 y 6.24 kg. de agregado grueso 2.

4.2. Resultados Peso unitario y porcentaje de vacíos, Norma MTC E-203.

Tabla 119. Resultados peso unitario y % de vacíos de agregado grueso.

Muestra	Expresión de resultados.		Porcentaje de vacíos (%)	
	Sin compactar	Compactado	Sin compactar	Compactado
Agregado grueso 1.	1347.65	1487.62	48.69	43.36
Agregado grueso 2.	1369.77	1512.94	47.78	42.33
Agregado g. reciclado 1.	1478.08	1539.34	41.91	39.51
Agregado g. reciclado 2.	1545.28	1561.74	41.57	40.94

Fuente: Elaboración propia.

El peso unitario es el cálculo de la densidad del agregado de forma referencial ya que esta considera el porcentaje de vacíos que generalmente son altos por encima del 25%, con esta aclaración de acuerdo a la **Tabla 119**. Se observa que los agregados gruesos nuevos tiene un porcentaje de vacíos entre 47% y 48% sin compactar, logrando reducir los espacios al compactarlos hasta un 5.45%; mientras que los agregados gruesos reciclados tienen menos espacios vacíos casi 42% ; pero al compactarlos en el mejor de los casos solo se redujo un 2.40% de estos espacios; en conclusión se tiene que los pesos unitarios de los agregados gruesos nuevos fluctúan entre 1347.65 kg/m³ y 1369.77 kg/m³ con un porcentaje de vacíos de 43% y los agregados gruesos reciclados tienen un peso unitario que varía entre 1478.08 kg/m³ y 1545.28 kg/m³ con un porcentaje de vacíos de 40%.

Tabla 120. Resultados peso unitario y % de vacíos de agregado fino.

Muestra	Expresión de resultados.			
	Peso unitario (kg/m ³)		Porcentaje de vacíos (%)	
	Sin compactar	Compactado	Sin compactar	Compactado
Agregado fino 1.	1580.01	1646.36	39.29	36.74
Agregado fino 2.	1599.92	1672.67	39.57	36.82
Agregado f. reciclado 1.	1689.48	1742.55	34.48	32.42
Agregado f. reciclado 2.	1605.45	1687.27	35.73	32.45

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de los agregados finos de la misma manera se observa en la **Tabla 120**. Que el peso unitario de los agregados nuevos fino fluctúa entre 1580 kg/m³ y 1599.9 kg/m³ con un porcentaje de vacíos de 36.8%; los agregados finos reciclados tienen un peso unitario mayor comprendido entre 1605.45kg/m³ y 1689.45kg/m³ con un porcentaje de vacíos de 32.4%, como se nota a menos espacios vacíos el peso unitario aumenta; también se observa que los pesos unitarios son similares cercanos a 1620 kg/m³ en promedio.

4.3. Resultados Peso específico y absorción de agregado grueso y fino, Norma MTC E-205 y MTC E-206.

Tabla 121. Resultados peso específico de agregado grueso y fino.

	Expresión de resultados							
	Agregados				Reciclado			
	Grueso 1	Grueso 2	Fino 1	Fino 2	Grueso 1	Grueso 2	Fino 1	Fino 2
Peso específico	2.63	2.62	2.60	2.65	2.55	2.65	2.58	2.50
% Absorción	1.04	0.89	2.24	2.66	0.98	0.51	3.29	2.35
% absorción según (EG-2013)	1%	1%	0.5%	0.5%	1%	1%	0.5%	0.5%
	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.
	Cumple	Cumple	No	No	Cumple	Cumple	No	No
Criterio Aceptación			cumple	cumple			cumple	cumple

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la **Tabla 121**. Los pesos específicos determinados son similares para todos los agregados utilizados aproximadamente 1.6, a excepción del agregado reciclado fino 2 que es 1.5; por lo tanto no tendremos problemas de densidades de material; en cuanto a la absorción de los agregados se puede observar en la misma **Tabla 121**. Que esta varía entre 0.9% y 3.3% ; según el manual de carreteras: “Especificaciones Técnicas Generales para Construcción MTC” EG-2013, en las especificaciones para mezclas en frío no indica el porcentaje de absorción para agregados gruesos ni para finos; sin embargo haciendo la revisión de dicho documento indicada para mezclas asfálticas en general está en un máximo 1% para agregados gruesos y 0.5% para agregados finos; bajo esta premisa solo los agregados gruesos cumplen este criterio de selección mas no los finos.

4.4. Resultados % de humedad de los agregados finos y gruesos, Norma MTC E-215.

Tabla 122. Resultados % de humedad agregados gruesos y finos.

Expresión de resultados.								
	Agregados				Reciclado			
	Grueso 1	Grueso 2	Fino 1	Fino 2	Grueso 1	Grueso 2	Fino 1	Fino 2
	% Humedad	0.65	0.31	1.17	0.65	0.37	0.43	0.61

Fuente: Elaboración propia.

Según la **Tabla 122**. Todos los agregados evaluados muestran un porcentaje de humedad bajo como máximo 1.17% y 0.31% como mínimo; es preferible tener el agregado húmedo ya que es una condición favorable cuando se realizan mezclas en frío, por la capacidad de adherencia de la emulsión asfáltica en materiales humedecidos; esta característica indica que los agregados son poco porosos o con poros muy pequeños; también puede indicar la naturaleza de la roca que principalmente sería rocas ígneas o metamórficas.

4.5. Resultados determinación del porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso, Norma MTC E-210.

Tabla 123. Resultados porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso.

Expresión de resultados					
	Método	Agregado			
		Nuevo		Reciclado	
		Grueso 1	Grueso 2	Grueso 1	Grueso 2
% con una cara fracturada	A	54.18	58.75	75.90	93.50
% con más de una cara fracturada	B	25.00	19.33	55.95	11.10
% partículas fracturadas (EG-2013) min. 1cara/2caras (tabla 437-02 y 424-01)		75/60	75/60	50/-	50/-
Criterio Aceptación		No Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a las **Tablas 737-02 y 424-01** del manual de carreteras “Especificaciones Técnicas Generales para Construcción MTC” EG-2013 (**anexo 01 de la presente tesis**), para mezclas asfálticas en frío, se toma dos criterios uno con agregado nuevo y otro con agregado reciclado, si consideramos una de ellos en cualquiera de los casos solo cumpliría la mitad de los agregados tal como se aprecia en la **Tabla 123**. Pero como el diseño no define una totalidad de criterio ya que el uso de agregados es parcial podemos aceptar como si fueran reciclados ya que contempla rangos más amplios de trabajo y todos los agregados cumplen los requerimientos.

4.6. Resultados partículas chatas y alargadas en agregados, Norma MTC E-223.

Tabla 124. Resultados partículas chatas y alargadas en agregados.

Expresión de resultados							
Agregado	% Partículas Planas	% Partículas Alargadas	% Partículas que cumplen ambos Criterios	% Partículas que no cumplen ningún Criterio	% Total	Requerimiento EG-2013 (Tabla 437-02)	Cumple
Grueso 1	5.00	5.00	40.00	50.00	100.00	10% máx.	Si
Grueso 2	4.00	3.00	44.00	49.00	100.00	10% máx.	Si
Reciclado 1	10.00	10.00	50.00	30.00	100.00	10% máx.	Si
Reciclado 2	10.00	15.00	45.00	30.00	100.00	10% máx.	Si/No

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al análisis de resultados que se observa en la **Tabla 124**. Todos los agregados gruesos cumplen el criterio requerido de 10% como máximo en cuanto partículas planas y alargadas según los requerimientos del manual de carreteras “Especificaciones Técnicas Generales para Construcción” EG-2013 MTC, en la Tabla 437-02 (**Anexo 1 de la presente tesis**), a aceptación del agregado grueso reciclado 2 que excede su porcentaje hasta 15% en partículas alargadas, este resultado no es excluyente ya que no evaluamos solo este criterio; sino varios.

4.7. Resultados desgaste de agregados por abrasión en máquina de los Ángeles, Norma MTC E-207.

Tabla 125. Resultados porcentaje de abrasión en máquina de los ángeles.

Muestra	% Desgaste	Expresión de resultados.		
		Tabla 424-01	Tabla 437-02	Cumple
Agregado grueso 1	17.04	25% máx.	40% máx.	Si
Agregado grueso 2	22.97	25% máx.	40% máx.	Si
Agregado reciclado 1	20.22	25% máx.	40% máx.	Si
Agregado reciclado 2	19.86	25% máx.	40% máx.	Si

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al análisis de resultados que se observa en la **tabla 125**. Todos los agregados gruesos cumplen el criterio requerido, que acepta como máximo de desgaste para agregados gruesos 25% y 40%, según los requerimientos del manual de carreteras “Especificaciones Técnicas Generales para Construcción” EG-2013 MTC, en la **Tablas 424-01 y 437-02 (Anexo 1 de la presente tesis)**, cabe señalar que los agregados gruesos utilizados son diferentes como por ejemplo el agregado grueso 1 (cantera Huillque) es un agregado de naturaleza plutónica y de estructura granodiorita por ello su resistencia a desgastarse fácilmente, en el caso del agregado grueso 2 (cantera Amaru Pampa) presenta cuarzo y silicato que son extremadamente duros a ello su resistencia al desgaste en el ensayo; los agregados reciclados presentan valores de 20% de desgaste a mas, esto se debe a que ya sufrió esfuerzos de trabajo anteriores.

4.8. Resultados durabilidad al sulfato de sodio y/o magnesio de agregados, Norma MTC E-209.

Tabla 126. Resultados % de pérdida por durabilidad al sulfato de magnesio

Expresión de resultados.				
Muestra	%	Requerimiento (EG-2013)		
		Tabla 424-01	Tabla 437-02	Cumple
Agregado Fino 1	1.836	18% máx.	18% máx.	Si
Agregado Fino 2	0.573	18% máx.	18% máx.	Si
Agregado Fino reciclado 2	2.070	18% máx.	18% máx.	Si
Agregado Fino Reciclado 1	2.284	18% máx.	18% máx.	Si
Agregado Grueso 1	0.473	18% máx.	18% máx.	Si
Agregado Grueso 2	0.238	18% máx.	18% máx.	Si
Agregado Grueso Reciclado 1	0.067	18% máx.	18% máx.	Si
Agregado Grueso Reciclado 2	0.076	18% máx.	18% máx.	Si
Pérdida Total	7.617	18% máx.	18% máx.	Si

Fuente: Elaboración propia.

En el análisis de resultados que se observa en la **Tabla 126**. Todos los agregados gruesos y finos nuevos, y reciclados, cumplen el criterio requerido, que acepta como pérdida por durabilidad a la acción del sulfato de magnesio 18% como máximo, según los requerimientos del manual de carreteras “Especificaciones Técnicas Generales para Construcción” EG-2013 MTC, en la **Tablas 424-01 y 437-02 (Anexo 1 de la presente tesis)**, encontrándose muy por debajo de los límites incluso si sumamos porcentajes solo se llega a 7.6%, por tanto se aceptan todos los agregados; cabe recordar que el ataque por sulfatos es una simulación acelerada al intemperismo o acción del ambiente sobre los agregados por el paso del tiempo.

4.9. Resultados Equivalente de arena de agregado fino, Norma MTC E-114.

Tabla 127. Resultados equivalente de arena en porcentaje.

	Expresión de resultados.				Requerimiento Manual EG-2013 MTC, Tabla 437-03
	Agregado fino 1	Agregado fino 2	Agregado fino 1 reciclado	Agregado fino 2 reciclado	
Muestra					
1	59.26%	76.79%	86.54%	76.47%	30% mín.
2	56.16%	65.28%	60.26%	64.38%	30% mín.
3	64.63%	69.05%	67.90%	69.05%	30% mín.
Promedio	60.02%	70.37%	71.57%	69.97%	30% mín.

Fuente: Elaboración propia.

Si revisamos la **Tabla 127**, se puede observar que el equivalente de arena es muy similar para el agregado fino 2 y agregados reciclados 1 y 2 esto se debe a que los agregados mencionados provienen de rocas fracturas o piedra chancada, mientras que el agregado fino 1 proviene de canteras aluviales o coluviales (material transportado por tanto tiene mayor presencia de arcillas y limos que evidencias esta diferencia con los otros agregados.

Según el manual EG-2013 MTC en la Tabla 437-03 el equivalente de arena mínimo debe ser de 30%; en tal sentido los agregados evaluados cumplen esta condición.

4.10. Resultados Angularidad de agregado fino, Norma MTC E-222.

Tabla 128. Resultados Angularidad de agregados finos utilizados.

	Angularidad (%)				Manual EG-2013 MTC, Tabla 437-03
	Agregado fino 1	Agregado fino 2	A. reciclado 1	A. reciclado 2	
Tamiz					
N° 50	41.02	44.24	43.60	45.46	35% mínimo
N° 200	39.62	42.70	41.76	45.48	35% mínimo

Fuente: Elaboración propia.

Según el manual EG-2013 MTC en la Tabla 437-03 la angulosidad mínima debe ser de 35%; en tal sentido todos los agregados cumplen esta condición; cabe resaltar que el agregado fino 1

presenta los valores más bajos con un promedio de 40 %, mientras que los valores más altos es el agregado reciclado finos 2, tal como se aprecia en la **Tabla 128**.

4.11. Resultados Extracción cuantitativa de asfalto en mezclas asfálticas, Norma MTC E-502.

Tabla 129. Resultados % de asfalto en carpeta asfáltica reciclada.

Expresión de resultados.		
Muestra	% Asfalto Promedio hallado	% Asfalto Manual MS-22
Reciclado 1	4.00	5-6
Reciclado 2	3.96	5-6

Fuente: Elaboración Propia.

El porcentaje en peso de asfalto encontrado en la carpeta asfáltica de acuerdo a la **Tabla 129**. Para ambos reciclados es aproximadamente de 4%; considerando que son mezclas realizadas en caliente, donde el porcentaje de asfalto fluctúa entre 5% y 6% (Fuente: Manual americano MS-22).

4.12. Resultados Penetración de materiales bituminosos, Norma MTC E-304.

Tabla 130. Resultados ensayo de penetración en emulsión asfáltica curada.

Muestra	Penetración (dmm)			
	Estimado	Redondeo	Manual MS-22 Clima frío	Manual MS-22 Clima Frígido
1	159.73	160.00	85-100	120-150
2	99.67	100.00	85-100	120-150
Promedio	129.70	130.00	85-100	120-150

Fuente: Elaboración Propia.

Según el manual americano MS-22, referido cementos asfálticos que es lo resulta luego del rompimiento de la emulsión asfáltica, indica que para climas fríos la penetración se encuentra entre 85dmm a 100dmm; mientras que para climas frígidos esta entre 120 a 150 dmm; por consiguiente el valor hallado para el residuo de emulsión asfáltica de rotura lenta (cemento asfáltico), es 130dmm, esto indica su uso en climas frígidos y se refleja en la **Tabla 130**.

4.13. Resultados carga de partículas de emulsión asfáltica, Norma MTC E-407.

Tabla 131. Resultados carga de partículas emulsión asfáltica de rotura lenta.

Muestra	Carga de Emulsión asfáltica de Rotura lenta CSS-1h	
	Manual EG-2013 MTC Tabla 415-04	Laboratorio Estudios Especiales MTC
1	Positivo (catiónica)	Positivo (catiónica)
2	Positivo (catiónica)	Positivo (catiónica)
3	Positivo (catiónica)	Positivo (catiónica)

Fuente: Elaboración Propia.

La **Tabla 131.** Muestra la carga o polaridad de la emulsión asfáltica de rotura lenta, la finalidad de este ensayo es saber la carga electroquímica de la emulsión ya que ciertos agregados principalmente los silicatos no se adhieren bien a una emulsión aniónicas (negativas); por otra parte si la emulsión es catiónica como se demuestra en el ensayo esta es más favorable ya que tiene mayor afinidad en agregados de origen básico (carbonatos) o ácidos (silicatos).

4.14. Resultados Recubrimiento y adherencia, manual americano MS-19.

Tabla 132. Resultados recubrimiento y adherencia de emulsión asfáltica con agregados.

Muestra	Condición según Manual MS-19	
	Recubrimiento 95%	Adherencia 90%
Agregado grueso 1	si cumple	si cumple
Agregado grueso 2	si cumple	si cumple
Agregado fino 1	si cumple	si cumple
Agregado fino 2	si cumple	si cumple
Agregado reciclado 1	si cumple	si cumple
Agregado reciclado 2	si cumple	si cumple

Fuente: Elaboración propia.

El análisis se realizó de acuerdo a lo indicado en el manual americano MS-19 para emulsiones asfálticas y mezclas en frío, ello indica un criterio visual para ver si los agregados cumplen o no tales condiciones; realizado los respectivos ensayos se llega a la conclusión de que los agregados a utilizar cumplen satisfactoriamente en cuanto

recubrimiento y adherencia, por tanto no se descarta los agregados ni la emulsión asfáltica de rotura lenta, tal como se indica en la **Tabla 132**.

4.15. Resultados viscosidad de Saybolt Furol de emulsiones asfálticas, Norma MTC E-403.

Tabla 133. Resultados viscosidad Saybolt Furol para emulsión asfáltica de rotura lenta.

Ensayo	Método	Emulsión asfáltica de rotura lenta CSS-1h		
	Método	Manual EG-2013 Tabla 415-04 Mínimo (SSU)	Máximo (SSU)	Resultado laboratorio E.E. MTC (SSU)
Viscosidad	ASTM D244 y MTC E-403	20	100	15.8

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la **Tabla 133**. La cual nos muestra el resultado de la viscosidad Saybolt Furol de **15.8 SSU**, realizado en los laboratorios de la Dirección de Estudios Especiales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones sede Lima, este se encuentra 4.2 SSU por debajo del mínimo requerido, quiere decir que la viscosidad hallada es baja; el dato de viscosidad es muy importante ya que es de utilidad en el cálculo de predicción del módulo dinámico en la presente tesis.

4.16. Resultado Destilación de emulsión asfáltica, Norma MTC E-401.

Tabla 134. Resultado residuo por destilación de emulsión asfáltica de rotura lenta.

Ensayo	Método	Emulsión asfáltica de rotura lenta CSS-1h		
	Método	Manual EG-2013 Tabla 415-04 Mínimo (%)	Máximo (%)	Resultado laboratorio E.E. MTC (%)
Contenido de asfalto residual (%)	ASTM D244 y MTC E-401	57.00	-	56.20

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la **Tabla 134**. La cual nos muestra el resultado del contenido de asfalto residual de **56.20%**, realizado en los laboratorios de la Dirección de Estudios Especiales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones sede Lima, este se encuentra 0.8% por debajo del mínimo requerido, quiere decir que la concentración de asfalto es relativamente baja, el residuo por

destilación o porcentaje de asfalto que existe en la emulsión asfáltica es muy necesario conocerlo ya que todo el diseño de mezcla asfáltica es definido con este valor.

4.17. Resultados Peso específico aparente y densidad de mezclas asfálticas, Norma MTC E-514.

Tabla 135. Resultados peso específico aparente (Pea) y densidad promedio de mezclas asfálticas (δ) de la mezcla patrón y de las diferentes proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%).

Expresión de resultados								
% de emulsión asfáltica	Patrón		Reciclado 25%		Reciclado 33.33%		Reciclado 50%	
	Pea (Gmb)	δ (gr/cm ³)	Pea (Gmb)	δ (gr/cm ³)	Pea (Gmb)	δ (gr/cm ³)	Pea (Gmb)	δ (gr/cm ³)
4.75 %	2.245	2.235	2.179	2.179	2.219	2.217	2.228	2.228
5.25 %	2.283	2.273	2.186	2.186	2.218	2.218	2.228	2.228
5.75 %	2.170	2.160	2.199	2.199	2.204	2.204	2.223	2.223
6.25 %	2.180	2.170	2.171	2.172	2.210	2.210	2.213	2.214
6.75 %	2.151	2.141	2.159	2.160	2.191	2.191	2.192	2.192
% óptimo (6%)		2.184		2.176		2.205		2.212

Fuente: Elaboración propia.

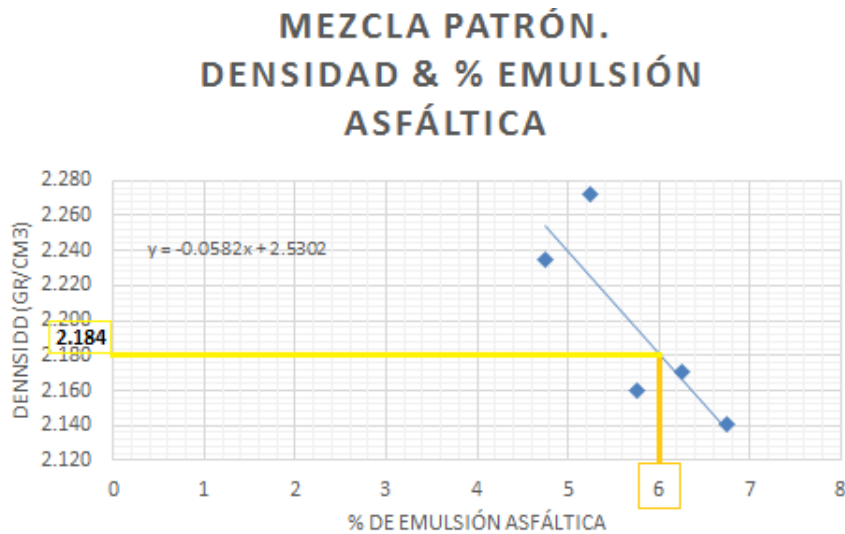


Figura 71. Determinación de la densidad de la mezcla patrón respecto al porcentaje óptimo de emulsión (6%),

Fuente: Elaboración propia.

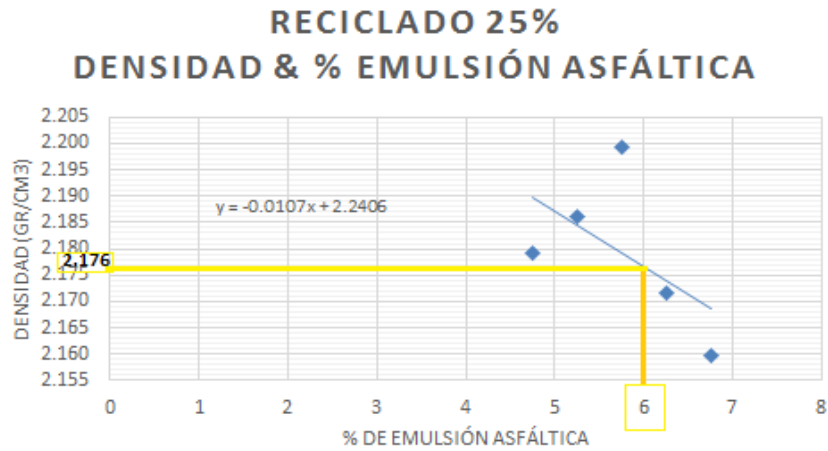


Figura 72. Determinación de la densidad de la mezcla asfáltica con agregado reciclado al 25% respecto al porcentaje óptimo de emulsión (6%), Fuente: Elaboración propia.

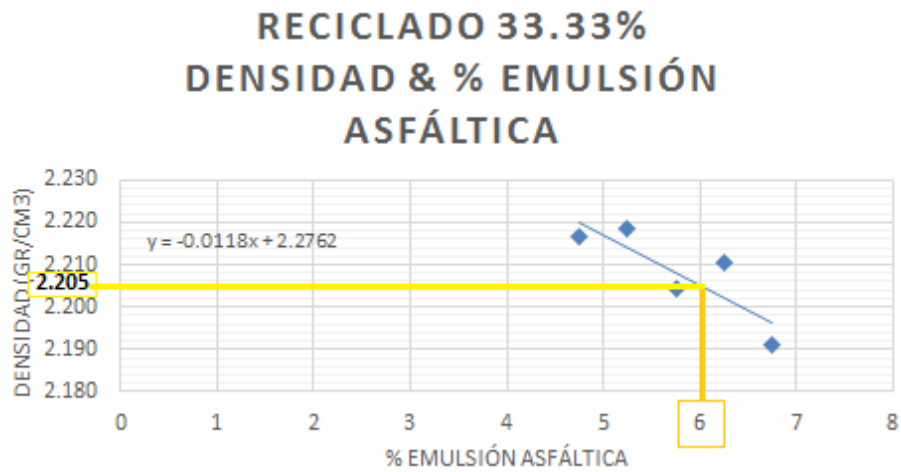


Figura 73. Determinación de la densidad de la mezcla asfáltica con agregado reciclado al 33.33% respecto al porcentaje óptimo de emulsión (6%), Fuente: Elaboración propia.

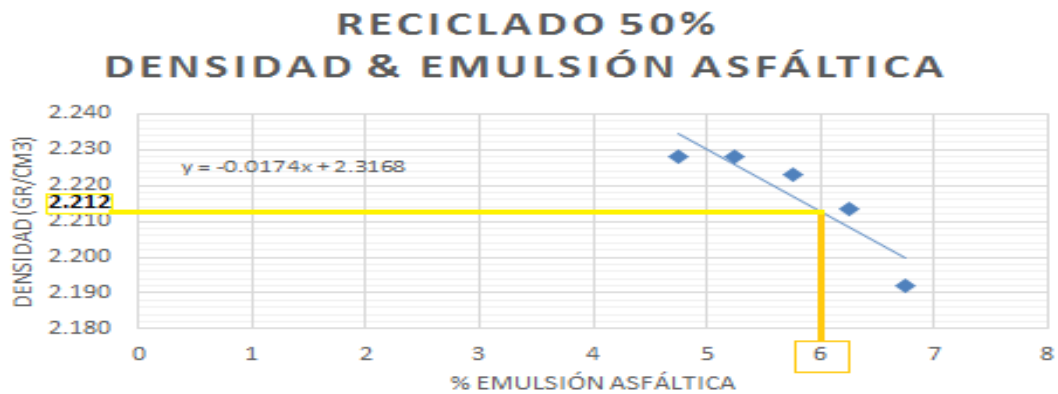


Figura 74. Determinación de la densidad de la mezcla asfáltica con agregado reciclado al 50% respecto al porcentaje óptimo de emulsión (6%), Fuente: Elaboración propia.

Según la **Tabla 135**. Se tiene los pesos específicos aparentes determinados para cada juego de briquetas en los porcentajes definidos en cuanto a emulsión asfáltica y porcentaje de agregados tanto patrón como reciclados, se colocan los promedios de cada juego que corresponde a 3 briquetas (total 60 briquetas ensayadas); para la determinación de la densidad se multiplica por la densidad del agua a la temperatura de ensayo o su corrección a 25 °C, esto está detallado en la aplicación de fórmulas del capítulo III (de la presente tesis); teniendo las densidades promedios se grafica en relación (densidad & % de emulsión asfáltica) como se tiene que el óptimo de emulsión asfáltica es de 6% se intercepta con la línea de tendencia gráfica y se ubica la densidad, esto se realiza para los cuatro diseños (patrón, reciclado a 25% 33.33%, 50%) respectivamente como se observa en la **Figuras 71, 72, 73, 74**.

4.18. Resultados Peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas, Norma MTC E-508.

Tabla 136. Resultados peso específico teórico máximo de la mezcla y de las diferentes proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%).

Expresión de resultados.				
% de emulsión asfáltica	Peso específico teórico máximo (Gmm)			
	Patrón	Reciclado 25%	Reciclado 33.33%	Reciclado 50%
4.75	2.44	2.41	2.37	2.41
5.25	2.40	2.37	2.38	2.36
5.75	2.33	2.35	2.37	2.36
6.25	2.30	2.31	2.29	2.32
6.75	2.32	2.31	2.33	2.28

Fuente: Elaboración propia.

El peso específico teórico máximo de la mezcla asfáltica es determinado con la finalidad de encontrar el porcentaje de vacíos de las mezclas asfálticas compactadas ya que es un componente de la aplicación de fórmula junto al peso específico aparente, su determinación es similar a la realización del ensayo de peso específico del agregado fino en un sistema de vacío; para ello se prepara la mezcla y se extrae en lo posible todo el material grueso de ella; así como el aire en su interior, se determinaron 20 pesos específicos teóricos máximos; es decir para los 5 porcentajes de

emulsión asfáltica (4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25%, 6.75%) y los 4 diseños de mezcla considerados (patrón, reciclado al 25%, 33.33%, 50%) respectivamente tal como se muestra en la **Tabla 136**; si observamos bien los resultados obtenidos podemos notar que el peso específico máximo baja en todos los diseños según va aumentando el porcentaje de emulsión asfáltica, esto por la densidad de la emulsión asfáltica (0.95 gr/cm³) promedio, que es bajo en relación a la densidad de los agregados (2.6 gr/cm³) promedio.

4.19. Resultados Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas, Norma MTC E-508.

Tabla 137. Resultados Porcentaje de vacíos de aire de la mezcla patrón y a de las diferentes proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%).

Expresión de resultados				
% de emulsión asfáltica	Porcentaje de vacíos de aire % (Pa)			
	Patrón	Reciclado 25%	Reciclado 33.33%	Reciclado 50%
4.75	6.493	7.821	5.652	7.699
5.25	3.433	5.916	6.133	5.510
5.75	5.366	4.343	6.499	5.698
6.25	3.822	3.989	2.715	4.458
6.75	5.872	4.433	5.363	3.761

Fuente: Elaboración propia.

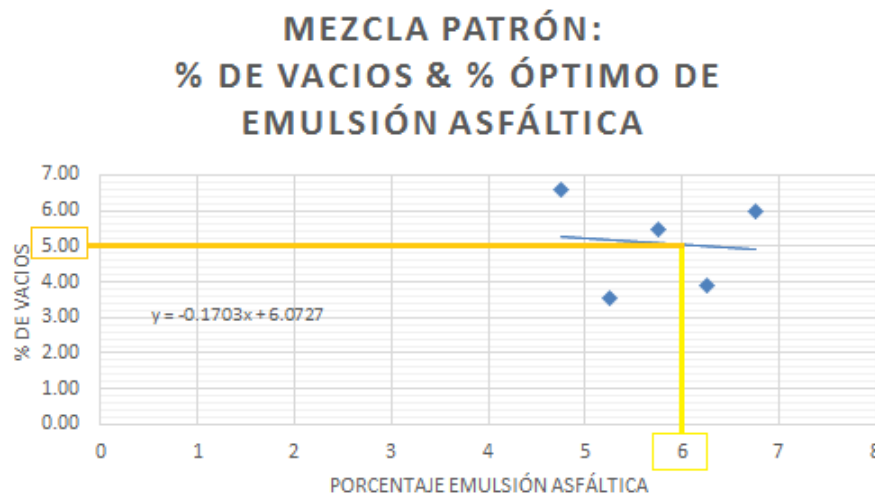


Figura 75. Determinación del porcentaje óptimo de emulsión asfáltica de la mezcla patrón respecto al porcentaje promedio de vacíos de aire, Fuente: Elaboración propia.

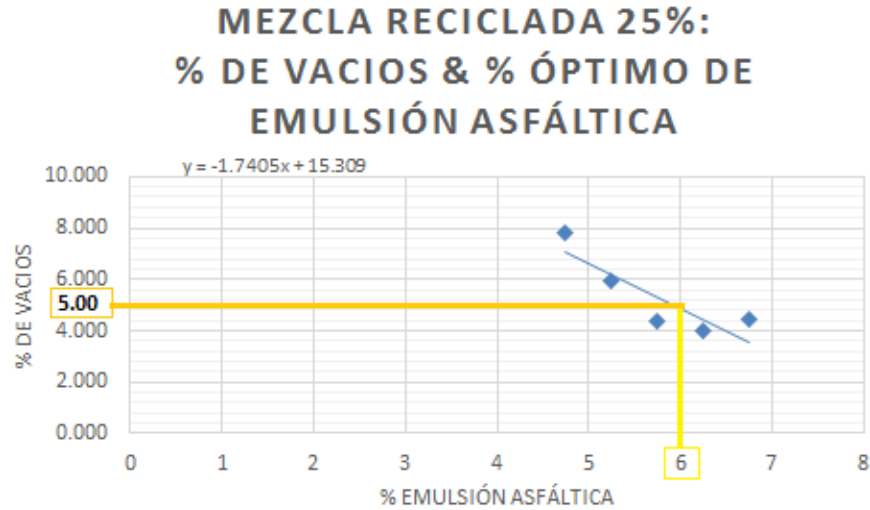


Figura 76. Determinación del porcentaje óptimo de emulsión asfáltica de la mezcla con agregado reciclado al 25% respecto al porcentaje promedio de vacíos de aire, Fuente: Elaboración propia.

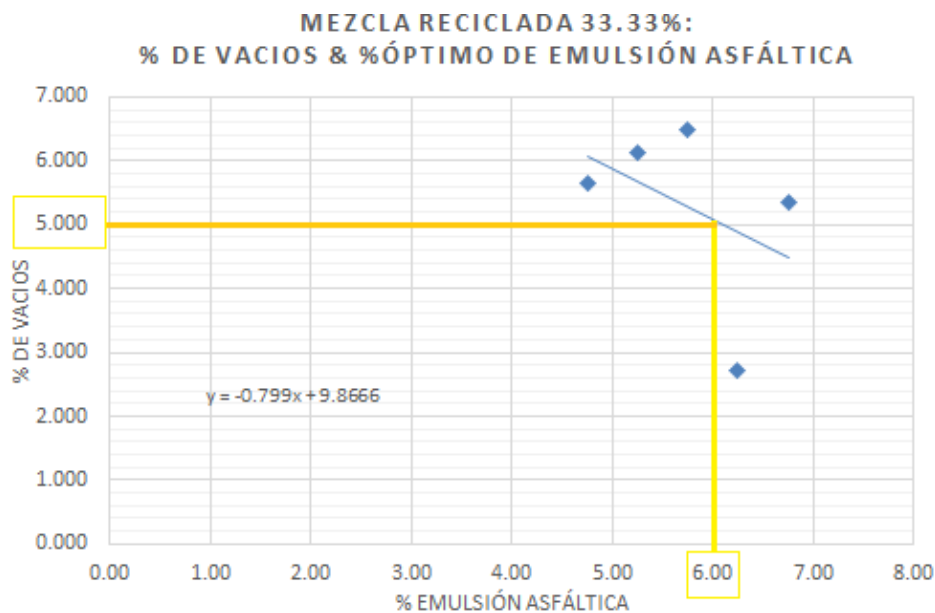


Figura 77. Determinación del porcentaje óptimo de emulsión asfáltica de la mezcla con agregado reciclado al 33.33% respecto al porcentaje promedio de vacíos de aire, Fuente: Elaboración propia.

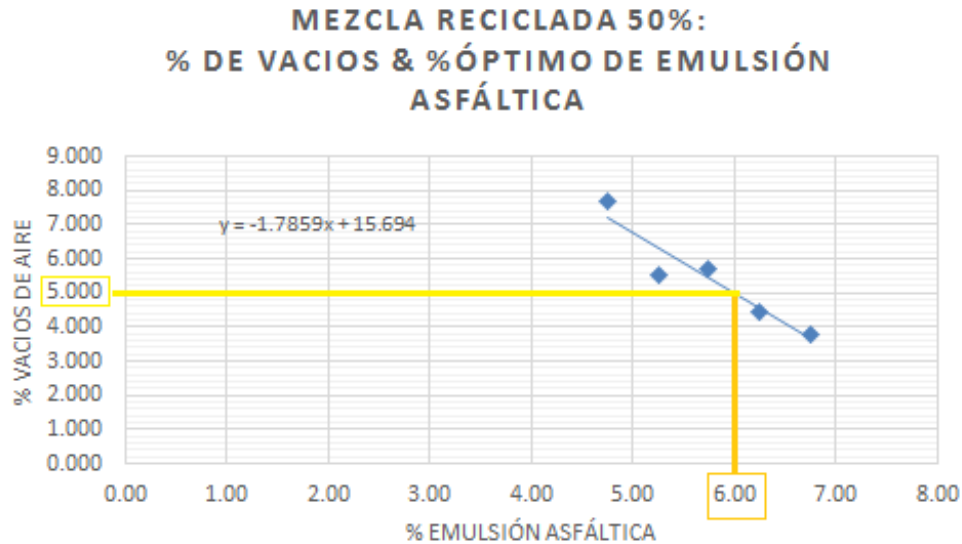


Figura 78. Determinación del porcentaje óptimo de emulsión asfáltica de la mezcla con agregado reciclado al 50% respecto al porcentaje promedio de vacíos de aire, Fuente: Elaboración propia.

Con los datos obtenidos en la **Tabla 135. (Peso específico aparente)** y los datos obtenidos en la **Tabla 136 (Peso específico teórico máximo)** por aplicación de fórmula se obtienen los datos de la **Tabla 137. (Porcentaje de vacíos de aire)**; con ello se determina el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica de diseño para la presente tesis, según el **Manual MS-14 (Anexo 2)**, el porcentaje de vacíos en emulsiones asfálticas está en el rango 4% a 6%, bajo esta premisa se toma el promedio en porcentaje de vacíos (5%); entonces se grafica la relación porcentaje de vacíos de aire & porcentaje de emulsión asfáltica como se observa en las **Figuras 75, 76, 77, 78.**

Para cada grafica con los diseños propuestos y los porcentajes de emulsión asfáltica asignados, teniendo 4 graficas se traza la línea de tendencia en cada gráfica, se ubica el porcentaje de vacíos de aire (5%) en todas las gráficas, y esta define el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica en la línea de abscisas, aproximándose en todas a **6%** el cual se toma como porcentaje óptimo de asfalto (emulsión asfáltica) para los cuatro diseños planteados.

4.20. Resultados Estabilidad y Flujo Marshall, Norma MTC E-504.

Tabla 138. Resultados estabilidad Marshall a diferentes porcentajes de emulsión asfáltica y proporción de agregados reciclados en la mezcla asfáltica.

Expresión de resultados				
% de emulsión asfáltica	Estabilidad Marshall (KN)			
	Patrón	Reciclado 25%	Reciclado 33.33%	Reciclado 50%
4.75	44.50	21.14	20.36	19.61
5.25	32.82	17.66	24.76	19.87
5.75	22.95	23.54	16.81	19.16
6.25	17.09	12.38	20.17	11.94
6.75	14.51	10.95	13.96	8.33
% óptimo (6%)	22.00	16.00	18.00	14.00

Fuente: Elaboración propia.

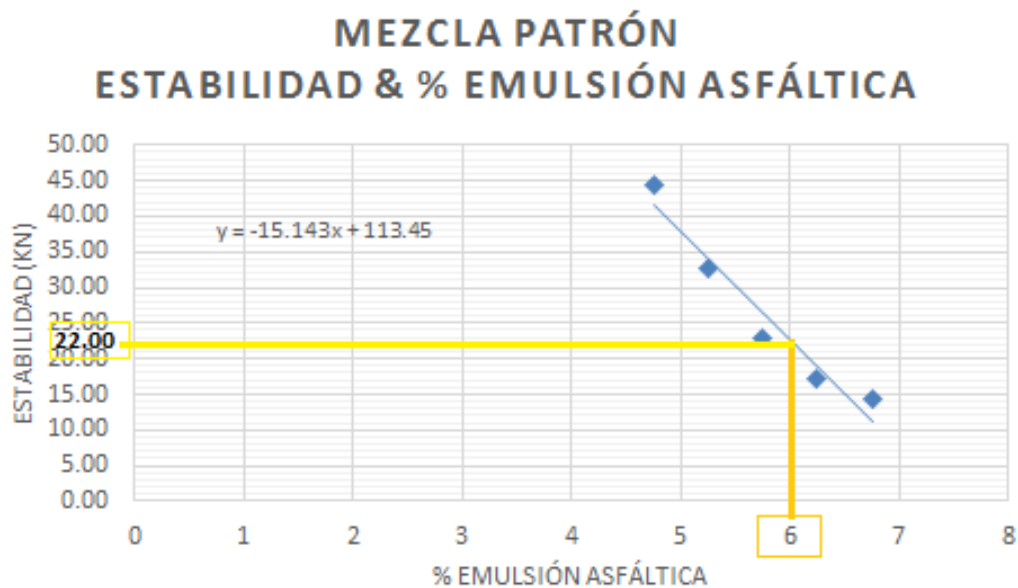


Figura 79. Determinación de la estabilidad con referencia al porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%) de la mezcla patrón, Fuente: Elaboración propia.

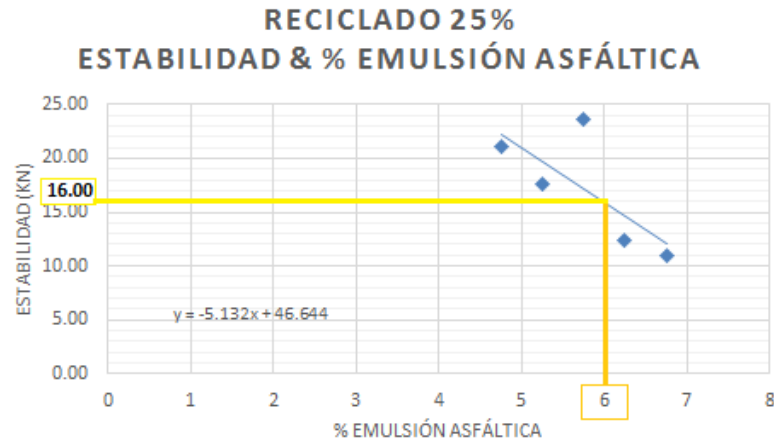


Figura 80. Determinación de la estabilidad con referencia al porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%) de la mezcla con agregado reciclado al 25%, Fuente: Elaboración propia.

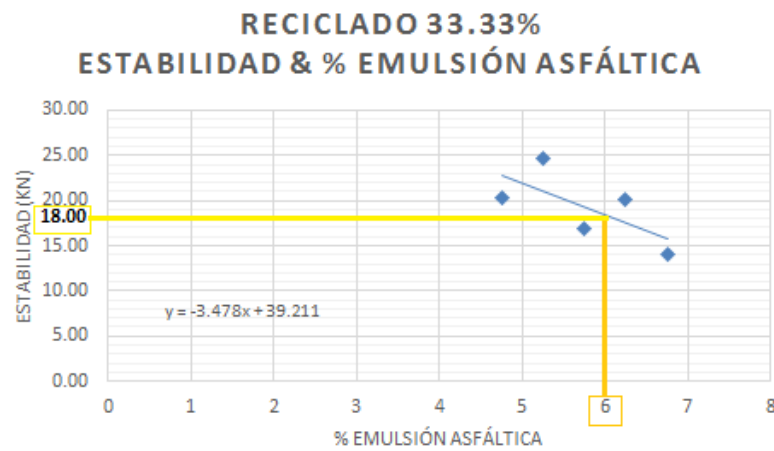


Figura 81. Determinación de la estabilidad con referencia al porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%) de la mezcla con agregado reciclado al 33.33%, Fuente: Elaboración propia.

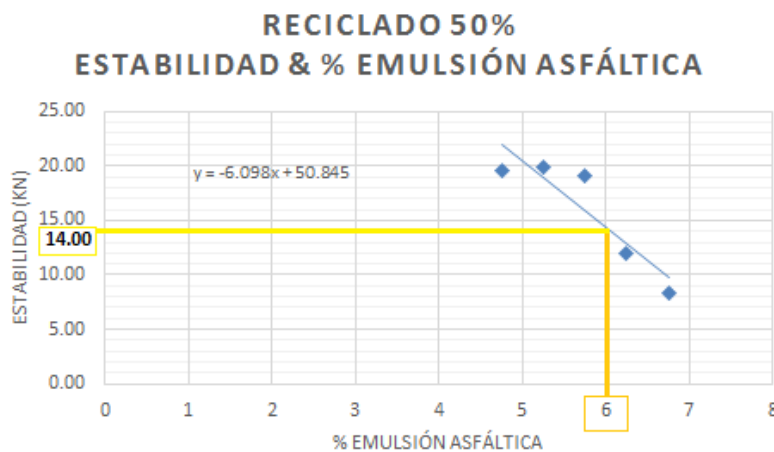


Figura 82. Determinación de la estabilidad con referencia al porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%) de la mezcla con agregado reciclado al 50%, Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la **Tabla 138**. Se tiene la estabilidad medida en KN, esta estabilidad es la carga máxima que soporta la briqueta antes de fallar, esta se ensaya para los diferentes porcentajes de emulsión asfáltica determinados para cada de las mezcla de diseño; es decir patrón, reciclado a 25%, 33.33%, 50%; teniendo los resultados que se aprecian, luego de realizar 60 ensayos en el equipo Marshall, 3 briquetas ensayadas por cada porcentaje de emulsión para cada diseño de mezcla; con ellos se lleva a gráficas y así poder determinar la carga máxima o estabilidad Marshall para cada diseño, se tiene determinado el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica de 6%; se traza la línea de tendencias respectiva y realizamos la intercepción de línea con las Abscisas que corresponde a la emulsión óptima y las ordenadas de la gráfica que corresponde a la estabilidad Marshall; tal como se observa en las **Figuras 79, 80, 81, 82**. Se repite los pasos para todas las mezclas de diseño.

Tabla 139. Resultados flujo Marshall a diferentes porcentajes de emulsión asfáltica y proporción de agregados en la mezcla asfáltica.

Expresión de resultados				
% de emulsión asfáltica	Flujo Marshall (mm)			
	Patrón	Reciclado 25%	Reciclado 33.33%	Reciclado 50%
4.75	4.496	3.052	3.293	3.557
5.25	4.430	3.820	3.056	3.706
5.75	3.990	3.843	3.239	3.306
6.25	4.061	3.930	2.993	4.662
6.75	4.523	4.156	3.517	3.334
% óptimo (6%)	2.280	3.900	3.240	3.700

Fuente: Elaboración propia.

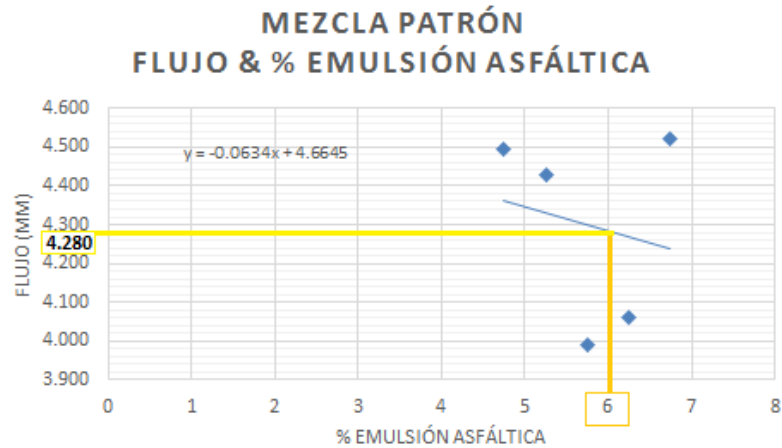


Figura 83. Determinación del flujo con referencia al porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%) de la mezcla patrón, Fuente: Elaboración propia.

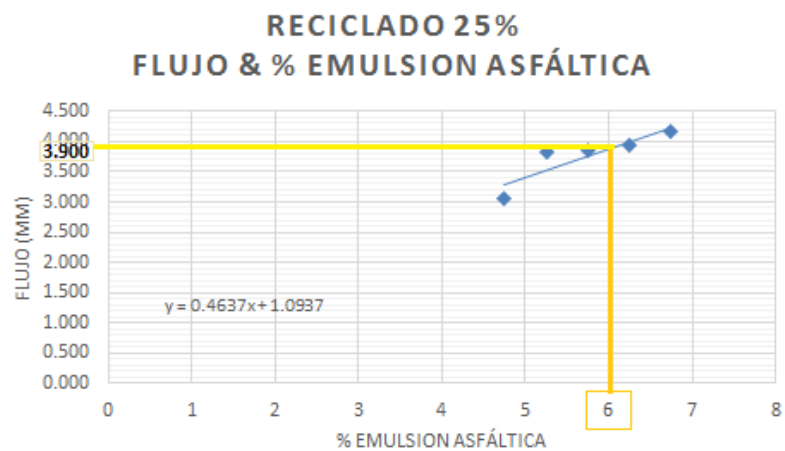


Figura 84. Determinación del flujo con referencia al porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%) de la mezcla con agregado reciclado al 25%, Fuente: Elaboración propia.

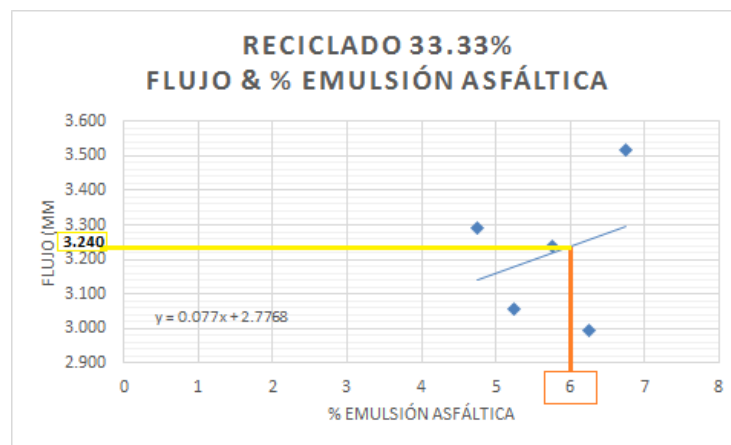


Figura 85. Determinación del flujo con referencia al porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%) de la mezcla con agregado reciclado al 33.33%, Fuente: Elaboración propia.

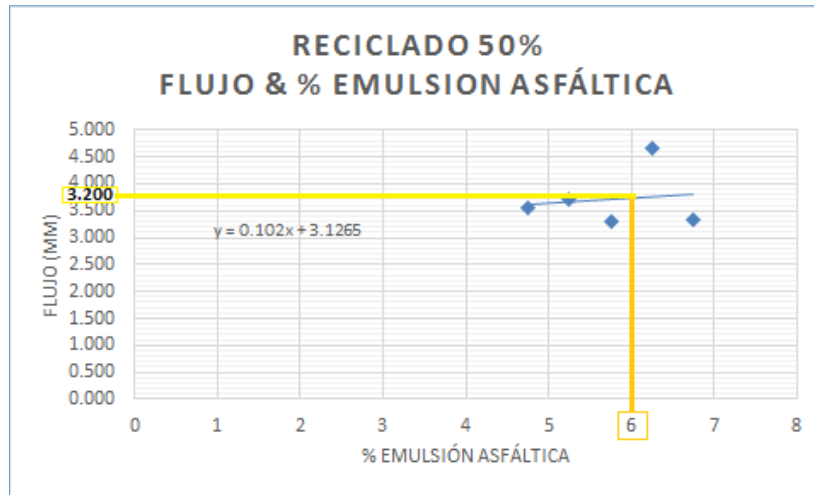


Figura 86. Determinación del flujo con referencia al porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%) de la mezcla con agregado reciclado al 50%, Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la **Tabla 139**. Se tiene el flujo máximo que soporta la briqueta medido en mm, esto para los diferentes porcentajes de emulsión asfáltica determinados para cada de las mezcla de diseño; es decir patrón, reciclado a 25%, 33.33%, 50%; teniendo los resultados que se aprecian, luego de realizar 60 ensayos en el equipo Marshall, 3 briquetas ensayadas por cada % de emulsión para cada diseño de mezcla; con ellos se lleva a las gráficas y así se determina el flujo o deformación máxima para cada diseño, se tiene definido el óptimo de emulsión asfáltica (6%); se traza la línea de tendencias respectiva y su intercepción de línea con las Abscisas que corresponde a la emulsión óptima y las ordenadas de la gráfica que corresponde al flujo; tal como se indica en las **Figuras 83, 84, 85, 86**. Se repite los pasos para todas las mezclas de diseño.

Tabla 140. Estabilidad y flujo Marshall mezcla patrón y agregado reciclado con óptimo de asfalto definido (6%).

Expresión de resultados					
Mezcla asfáltica al 6% (óptimo emulsión asfáltica)	Estabilidad (KN) y flujo (mm) Normas EG-2013			Estabilidad y flujo Marshall hallados.	
	Estabilidad	Estabilidad	Flujo	Estabilidad (KN)	Flujo (mm)
Patrón	> 2.22	> 5.88	< 4.00	22.00	4.28
Reciclado 25%	> 2.22	> 5.88	< 4.00	16.00	3.90
Reciclado 33.33%	> 2.22	> 5.88	< 4.00	18.00	3.24
Reciclado 50%	> 2.22	> 5.88	< 4.00	14.00	3.70

Fuente: Elaboración propia (de la Tabla N°2 de la presente tesis pág. 13).

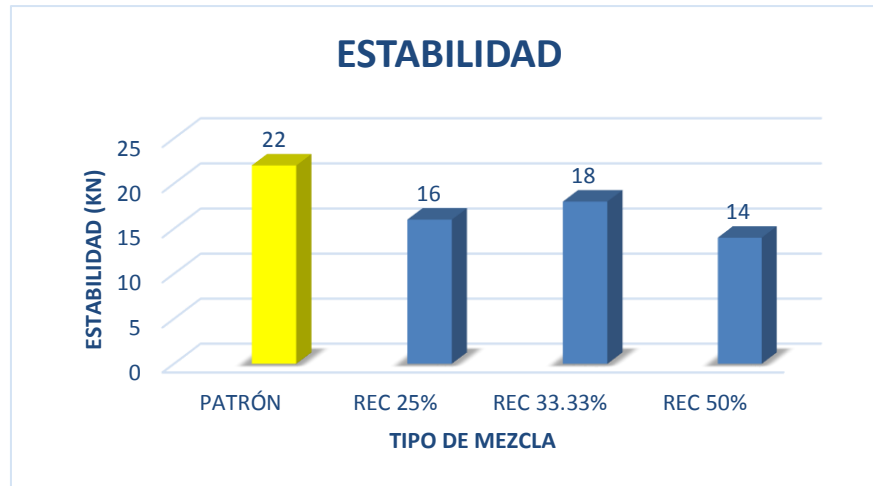


Figura 87. Estabilidad de la mezcla patrón y de las proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%), en función al óptimo de emulsión asfáltica definido, (Fuente: Elaboración propia).

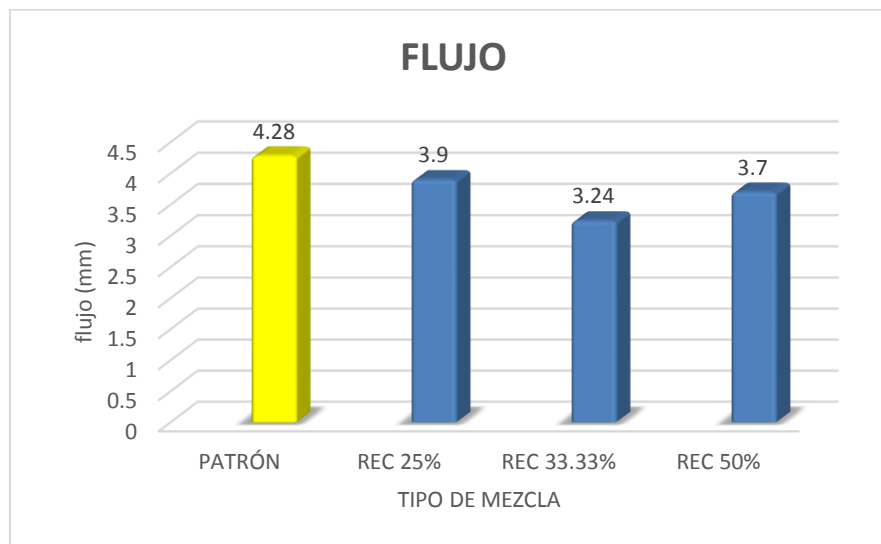


Figura 88. Flujo de la mezcla patrón y de las proporciones de agregado reciclado (25%,33.33%,50%), en función al óptimo de emulsión asfáltica definido, (Fuente: Elaboración propia).

El producto final de los ensayos para determinar estabilidad y flujo es la **Tabla 140**. Expresada en las **figuras 87 y 88**. Donde se aprecia que el mejor resultado en cuanto a estabilidad es de la mezcla patrón teniendo una diferencia de 4KN por encima del mejor resultado de los reciclados que es 18KN, para una mezcla de reciclado de 33.33%; haciendo la relación porcentual se tiene que la **mezcla patrón es superior en +18.18% en función al mejor resultado de las mezclas recicladas en cuanto a estabilidad Marshall**.

Por otro lado se tiene el flujo Marshall, que tiene los resultados observados en la **Figura 88**. De ello también se tiene que el mayor resultado es para la mezcla patrón que es: 4.28mm; sin embargo este es el peor resultado ya que como es deformación debería ser el más bajo; en este sentido la menor deformación es 3.24 mm, que corresponde a la mezcla reciclada de 33.33%; haciendo la relación porcentual, **se tiene que el flujo del reciclado a 33.33% es +24.29% superior al de la mezcla patrón.**

Si seguimos analizando podemos ver que el reciclado al 33.33% obtiene los mejores resultados frente a los otros reciclados; por tanto esto indica según la estabilidad y flujo que es la mejor proporción en cuanto adición de agregados reciclados; generalmente solo se toma este ensayo como determinante.

Seguidamente podemos observar en la **Tabla 140**. La comparación con la exigencia de la normativa según el manual EG-2013 en cuanto a Estabilidad muestra solo 2.22 KN como mínimo exigido los resultados obtenidos están muy por encima, teniendo el mínimo en 14 KN no se tiene rango para flujo; también se tienen datos de los antecedentes en el cual se tiene como mínimo 5.88 KN ; los valores hallados se encuentran por encima de estos rangos por tanto son satisfactorios; en relación al flujo; según los antecedentes este debe ser menor a 4.00 mm los hallados están entre 3.24mm y 4.28mm; esto quiere decir que la deformación de nuestras briquetas es menor por tanto son más rígidas.

4.21. Resultados resistencia a inmersión – compresión, Norma MTC E-518.

Tabla 141. Resultados resistencia inmersión-compresión de la mezcla patrón y de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%), en función del óptimo de asfalto definido (6%).

Expresión de resultados									
Mezcla	Compresión según EG-2013 (kg-f/cm2)			Compresión según Antecedentes (kg-f/cm2)			Compresión obtenida (kg-f/cm2)		
	Seco	Húmedo	R.C.	Seco	Húmedo	R.C.	Seco	Húmedo	R.C.
Patrón	> 25.00	> 20.00	> 75%	> 25.4	> 20.40	> 75%	16.076	13.231	82.30%
Reciclado 25%	> 25.00	> 20.00	> 75%	> 20.4	> 20.40	> 75%	13.371	11.019	82.41%
Reciclado 33.33%	> 25.00	> 20.00	> 75%	> 20.4	> 20.40	> 75%	14.670	12.704	86.60%
Reciclado 50%	> 25.00	> 20.00	> 75%	> 20.4	> 20.40	> 75%	15.835	12.080	76.29%

Fuente: Elaboración propia (datos de Tabla N°2 de la presente tesis pág. 13, R.C. = Resistencia Conservada).

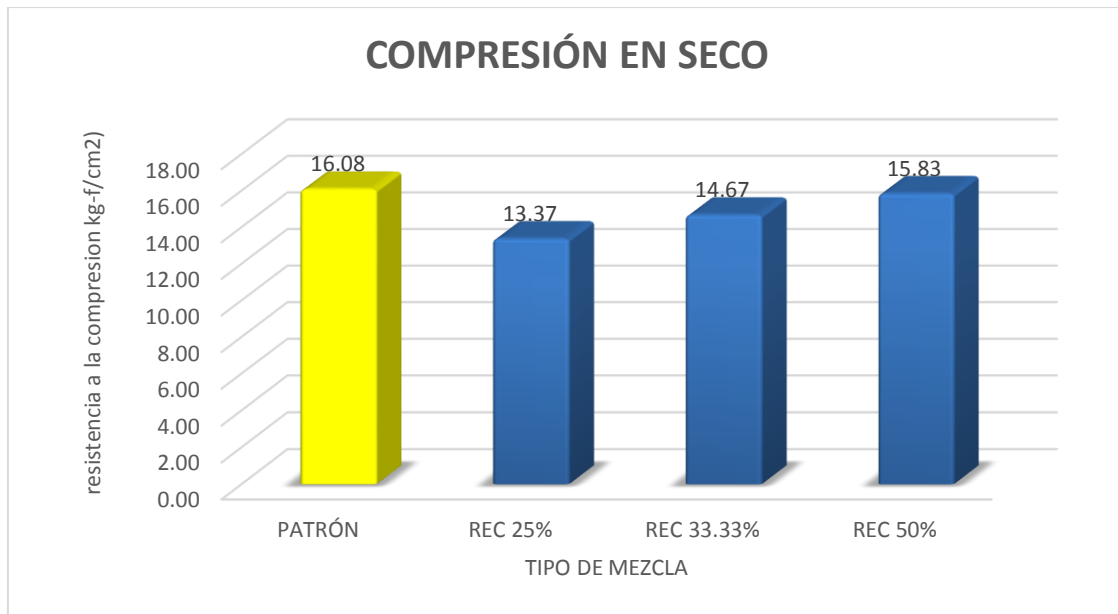


Figura 89. Resistencia a la compresión en seco de la mezcla patrón y de las proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%), en función al óptimo de emulsión asfáltica definido, (Fuente: Elaboración propia).

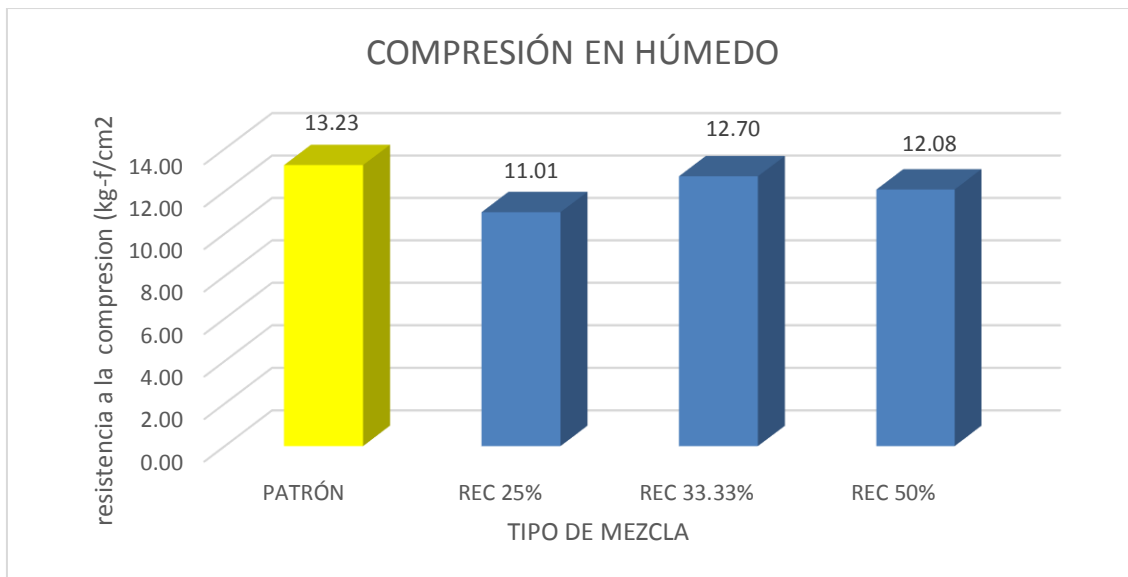


Figura 90. Resistencia a la compresión en húmedo de la mezcla patrón y de las proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%), en función al óptimo de emulsión asfáltica definido, (Fuente: Elaboración propia).

De acuerdo al análisis de resultados para la **Tabla 141**. Y las **Figuras 89 y 90**. Referidas a la Resistencia a Inmersión-Compresión de mezclas asfálticas, se elaboraron 6 briquetas por cada diseño de mezcla, 3 de ellas son sumergidas en agua por 24hrs a 60°C y 2 horas a 25°C para luego ser ensayadas saturadas; pero como son 4 diseños se tienen 24 briquetas en total; los resultados indican para la compresión en seco **Figura 89**. El mejor resultado es el patrón con 16.08 kg-f/cm² y el mejor resultado en las mezclas recicladas es 15.83 kg-f/cm² esto para el diseño de mezcla reciclado al 50%, **la diferencia porcentual es de solo +1.55% que hace superior a la mezcla patrón en este porcentaje.**

Haciendo el mismo análisis en la **Figura 90**. Para la compresión por inmersión en húmedo se tiene que la mezcla patrón obtiene el mejor resultado con 13.23 kg-f/cm² y el mejor resultado en cuanto a las mezclas recicladas es: 12.70 kg-f/cm² que corresponde al diseño de mezcla con 33.33% de reciclado; la diferencia porcentual es de 4 %; **es decir la mezcla patrón es superior en +4% respecto al mejor resultado de las mezclas recicladas.**

Por otro lado se tiene que los resultados obtenidos están por debajo de la norma expresada en el manual EG-2013 MTC que pide 25 kg-f/cm² en seco y 20.00 kg-f/cm² en húmedo y de los Antecedentes 25.5 kg-f/cm² en seco y 20.4 kg-f/cm² en húmedo, más la resistencia conservada mínima de 75% requerida si se alcanza y supera.

4.22. Resultados Resistencia a la tracción indirecta, Norma INV E-785.

Tabla 142. Resultados resistencia a tracción indirecta de la mezcla patrón y proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%), en función del óptimo de asfalto definido (6%).

Mezcla	Expresión de resultados				
	Tracción indirecta normativa antecedentes (kg-f/cm ²)		Tracción indirecta obtenida (kg-f/cm ²)		
	En seco	R. Conservada	En seco	En húmedo	R. Conservada
Patrón	> 2.54	> 50%	9.12	8.04	88.16%
Reciclado 25%	> 2.54	> 50%	7.49	6.25	83.44%
Reciclado 33.33%	> 2.54	> 50%	9.88	6.30	63.77%
Reciclado 50%	> 2.54	> 50%	7.50	6.03	80.40%

Fuente: Elaboración propia (datos de Tabla N°2 de la presente tesis pág. 13).

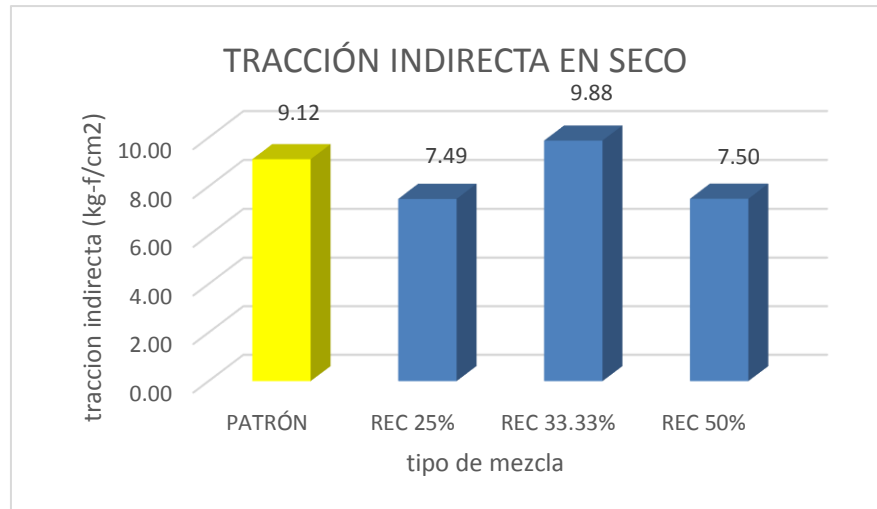


Figura 91. Resistencia a la Tracción indirecta en seco de la mezcla patrón y de las proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%), en función al óptimo de emulsión asfáltica definido, (Fuente: Elaboración propia).

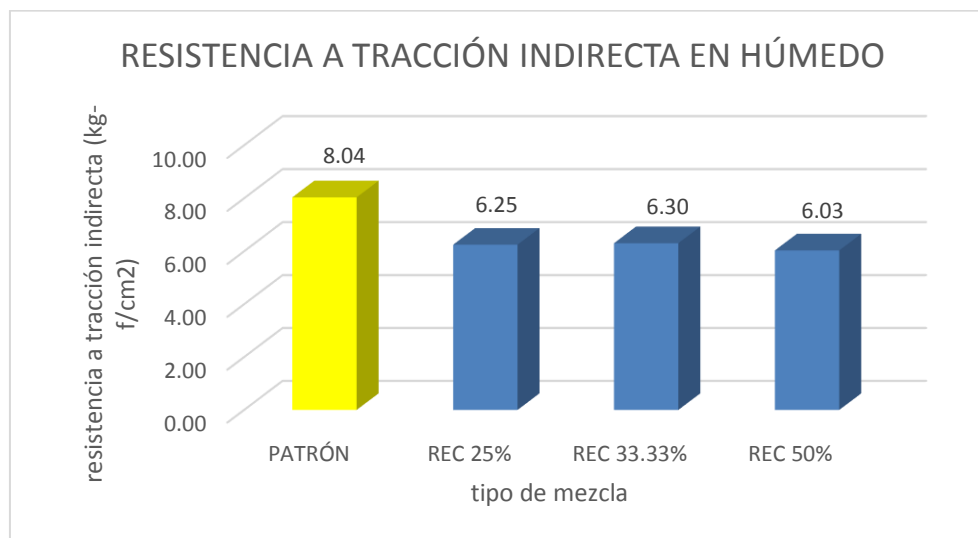


Figura 92. Resistencia a la Tracción indirecta en húmedo de la mezcla patrón y de las proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%), en función al óptimo de emulsión asfáltica definido, (Fuente: Elaboración propia).

De acuerdo al análisis de resultados para la **Tabla 142**. Y las **Figuras 91 y 92**. Referidas a la Resistencia a Tracción Indirecta de mezclas asfálticas, se elaboraron 6 briquetas por cada diseño de mezcla, 3 de ellas serán sumergidas en agua por 24hrs a 60°C y 2 horas a 25°C para luego ser ensayadas saturadas; pero como son 4 diseños se tienen 24 briquetas en total; los resultados para Tracción indirecta en seco se indican en la **Figura 91**. El mejor resultado es de 9.88 kg-f/cm² para la mezcla de reciclado a 33.33%, seguida de la mezcla patrón con 9.12 kg-f/cm², **la diferencia**

porcentual es de +7.69% que hace superior a la mezcla reciclada al 33.33% respecto a la mezcla patrón.

Haciendo el mismo análisis en la **Figura 92**. Para Tracción indirecta en húmedo, se tiene que la mezcla patrón obtiene el mejor resultado con 8.02 kg-f/cm² y el mejor resultado en cuanto a las mezclas recicladas es: 6.30 kg-f/cm² que corresponde al diseño de mezcla con 33.33% de reciclado; **la diferencia porcentual es de +21.44 %; es decir la mezcla patrón es superior en +21.44% respecto al mejor resultado de las mezclas recicladas.**

Por otro lado también se observa en la **Tabla 142**. Los referentes de nuestros resultados en la columnas de antecedentes; que muestran el rango de valores aceptables en el ensayo de Resistencia a Tracción Indirecta en seco y húmedo; todos los resultados obtenidos están dentro de los mínimos exigidos por la normativa de antecedentes.

4.23. Resultados análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas, norma INV E-799.

Tabla 143. Resultados porcentaje de vacíos en el agregado mineral VMA de la mezcla patrón y de las diferentes proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%).

Expresión de resultados				
% de emulsión asfáltica	Porcentaje de vacíos agregado mineral % (VMA)			
	Patrón	Reciclado 25%	Reciclado 33.33%	Reciclado 50%
4.75	12.77	14.89	13.14	12.42
5.25	11.12	15.21	14.04	13.78
5.75	15.36	14.63	14.54	13.99
6.25	14.78	15.64	14.27	14.37
6.75	15.78	16.05	14.99	15.22
% óptimo (6%)	14.40	15.40	14.40	14.20

Fuente: Elaboración propia.

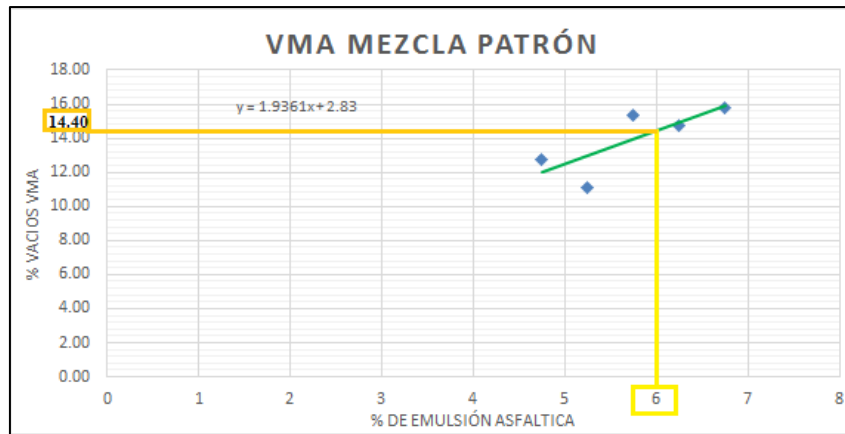


Figura 93. Determinación gráfica de vacíos de agregado mineral VMA de la mezcla patrón en función del óptimo de emulsión asfáltica (6%), (Fuente: Elaboración propia).

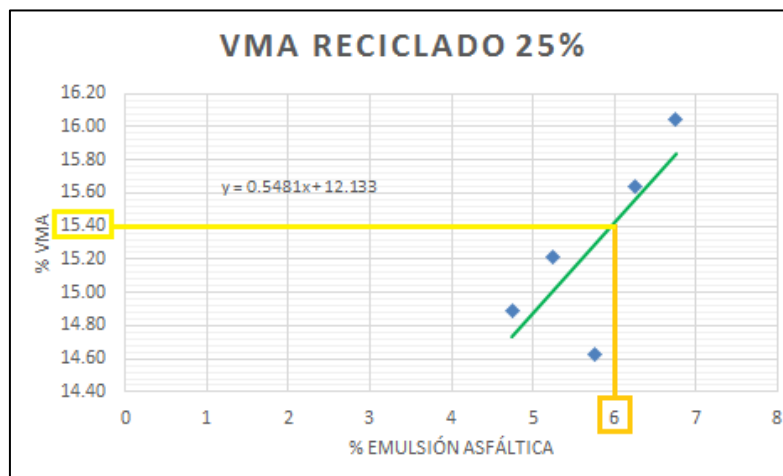


Figura 94. Determinación gráfica de vacíos de agregado mineral VMA de la mezcla con agregado reciclado al 25%, en función del óptimo de emulsión asfáltica (6%), (Fuente: Elaboración propia).

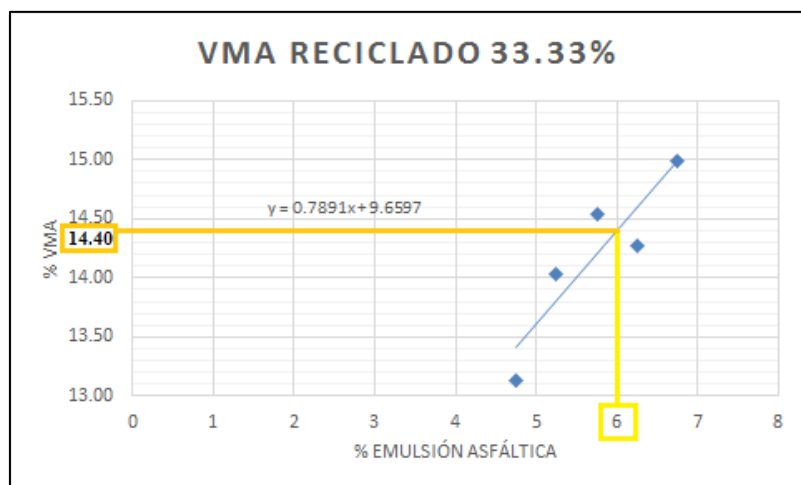


Figura 95. Determinación gráfica de vacíos de agregado mineral VMA de la mezcla con agregado reciclado al 33.33%, en función del óptimo de emulsión asfáltica (6%), (Fuente: Elaboración propia).

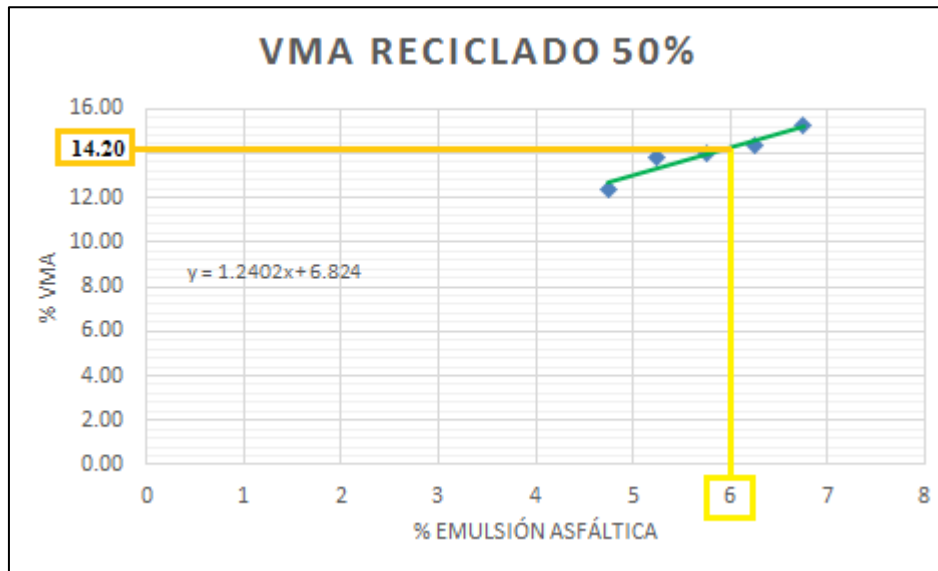


Figura 96. Determinación gráfica de vacíos de agregado mineral VMA de la mezcla con agregado reciclado al 50%, en función del óptimo de emulsión asfáltica (6%), (Fuente: Elaboración propia).

Según el análisis de la Tabla 143. Para determinar los valores de porcentaje de vacío en agregado mineral VMA, se toman los datos descritos en el capítulo III (**Ítem 3.6.23.**), donde se explica los componentes de la fórmula de VMA como son: la gravedad específica de la combinación de agregados **Gbs**, gravedad específica aparente de la mezcla compactada **Gmb**, porcentaje de agregado por peso total en la mezcla **Ps**; para la gravedad específica de la combinación de agregados **Gbs**, se determinaron todos los pesos específicos de los agregados utilizados (nuevos y reciclados), de acuerdo a la mallas granulométricas en su totalidad, el porcentaje de agregado por peso total de la mezcla **Ps** no es otro que el peso total de la briqueta sin emulsión asfáltica; es decir se considera como 100%; teniendo todos los valores del VMA como se observa en la **Tabla 143**. Se relaciona con los porcentajes de emulsión asfáltica definidos y gráficamente se encuentra la línea de tendencia que se intercepta las abscisas con las ordenadas, como ya se definió el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%), con ellos se encuentra el porcentaje de vacíos de agregado mineral VMA (ordenadas) con se observa en las **figuras 93, 94, 95, 96**.

Tabla 144. Resultados porcentaje de vacíos llenos de asfalto VFA de la mezcla patrón y de las diferentes proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%).

Expresión de resultados				
% de emulsión asfáltica	Porcentaje de vacíos llenos de asfalto % (VFA)			
	Patrón	Reciclado 25%	Reciclado 33.33%	Reciclado 50%
4.75	48.43	47.48	56.98	37.99
5.25	68.24	61.11	56.31	60.02
5.75	64.44	70.31	55.30	59.26
6.25	73.48	74.50	80.98	68.97
6.75	62.19	72.37	64.23	75.30
% óptimo (6%)	43.00	52.00	44.00	42.00

Fuente: Elaboración propia.

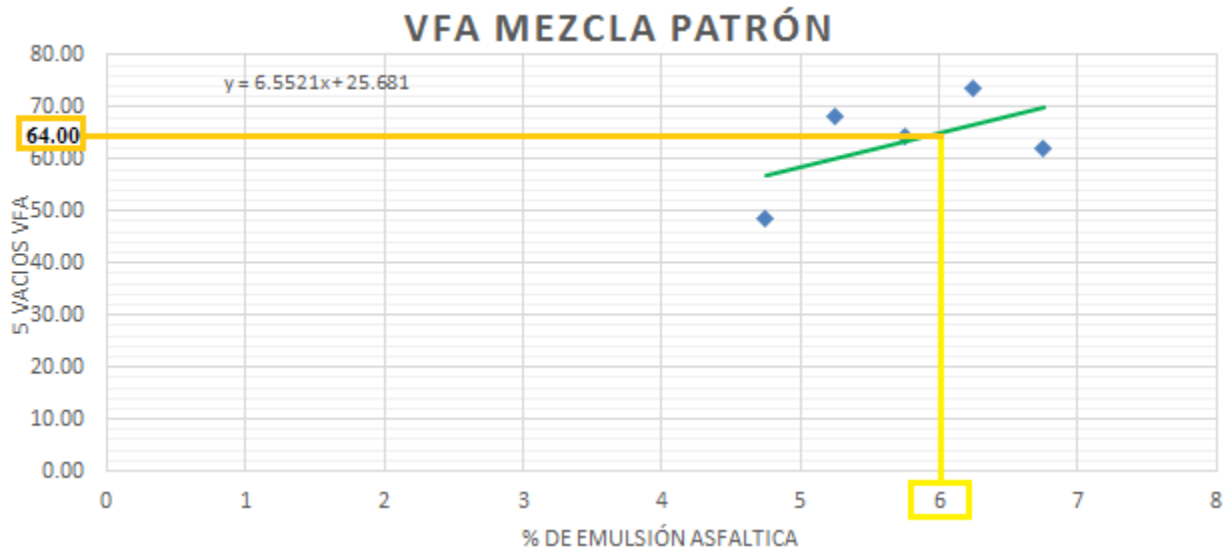


Figura 97. Determinación grafica de vacíos llenos de asfalto VFA de la mezcla patrón en función del óptimo de emulsión asfáltica (6%), (Fuente: Elaboración propia).

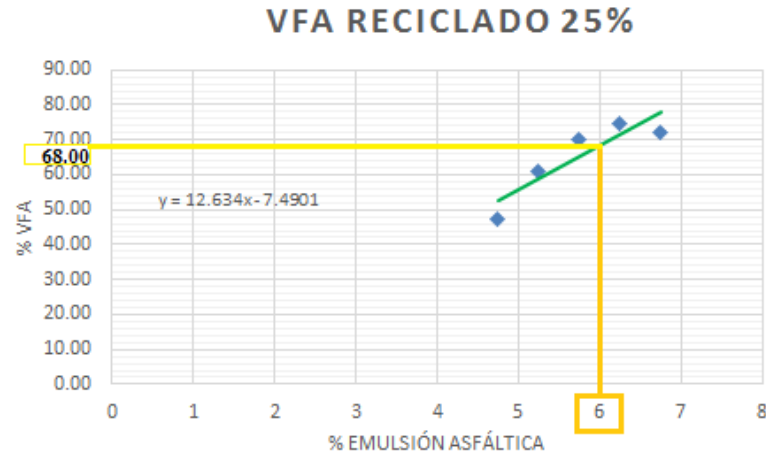


Figura 98. Determinación grafica de vacíos llenos de asfalto VFA de la mezcla con agregado reciclado al 25%, en función del óptimo de emulsión asfáltica (6%), (Fuente: Elaboración propia).

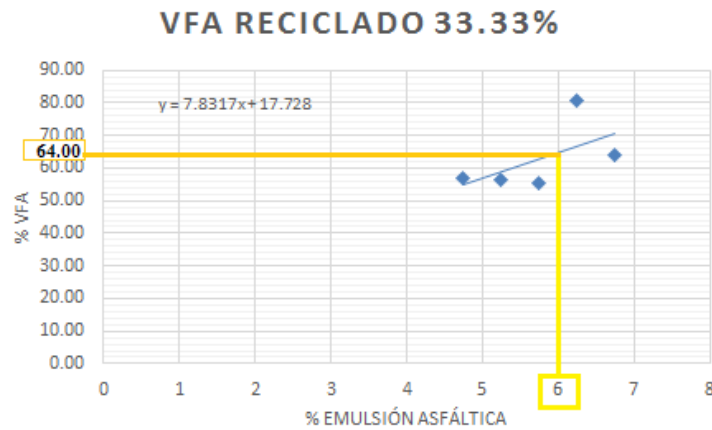


Figura 99. Determinación grafica de vacíos llenos de asfalto VFA de la mezcla con agregado reciclado al 33.33%, en función del óptimo de emulsión asfáltica (6%), (Fuente: Elaboración propia).

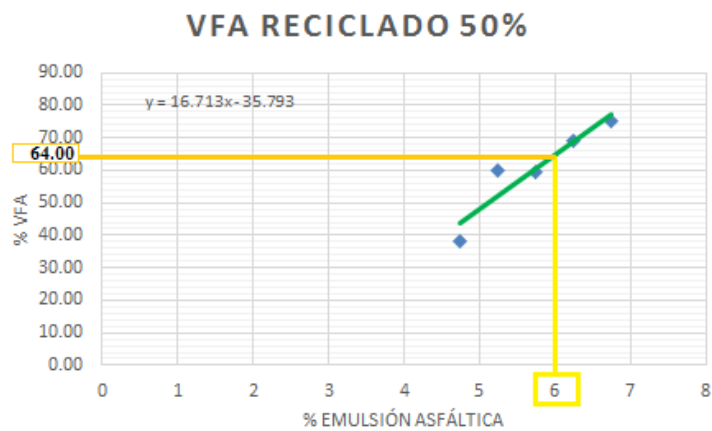


Figura 100. Determinación grafica de vacíos llenos de asfalto VFA de la mezcla con agregado reciclado al 50%, en función del óptimo de emulsión asfáltica (6%), (Fuente: Elaboración propia).

Con la ayuda de los datos de porcentaje de vacíos en el agregado mineral VMA de la **Tabla 143**. Y el porcentaje de vacíos de aire (**Pa**) de la **Tabla 137**. Se determinan los valores de porcentaje de vacíos llenos de asfalto **VFA** mediante una relación de fórmula y de la misma manera descrita que para los anteriores figuras se traza la línea de tendencias, como ya se tiene definido el porcentaje de emulsión asfáltica óptimo en la línea de abscisas el cual es 6% se intercepta con las ordenadas y la línea de tendencia y se encuentra el valor de vacíos llenos de asfalto **VFA** en las ordenadas, esto se realiza para cada diseño de mezcla el cual se observa en las **figuras 97, 98, 99, 100**.

Tabla 145. Resultados porcentaje de vacíos de agregado mineral VMA y porcentaje de vacíos llenos de asfalto VFA en función del porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%).

Expresión de resultados		
Mezcla asfáltica al 6% (óptimo emulsión asfáltica)	% de vacíos agregado mineral y vacíos llenos de asfalto hallados gráficamente.	
	VMA (%)	VFA (%)
Patrón	14.40	64.00
Reciclado 25%	15.40	68.00
Reciclado 33.33%	14.40	64.00
Reciclado 50%	14.20	64.00

Fuente: Elaboración propia.

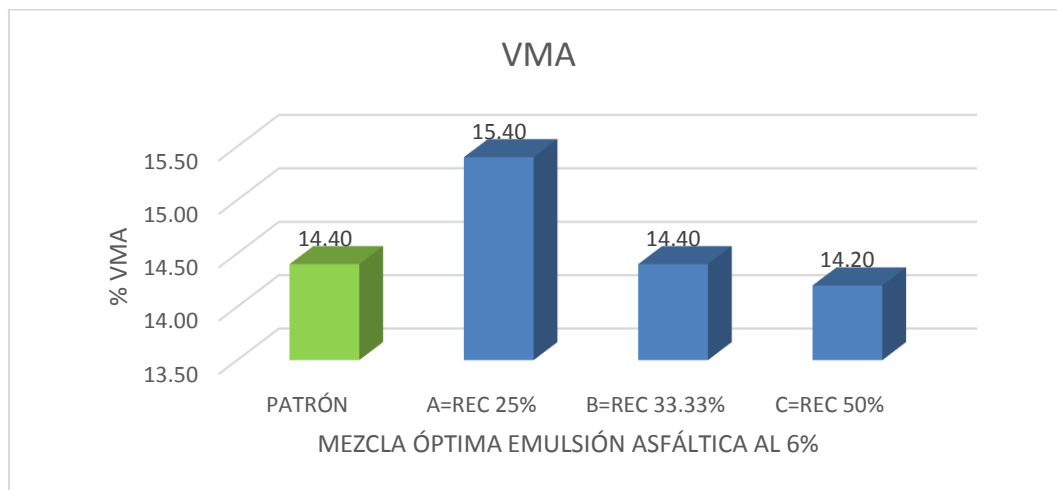


Figura 101. Porcentaje de vacíos de agregado mineral VMA de la mezcla patrón y de los diferentes porcentajes de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%), en función al óptimo de emulsión asfáltica (6%), (Fuente: Elaboración propia).

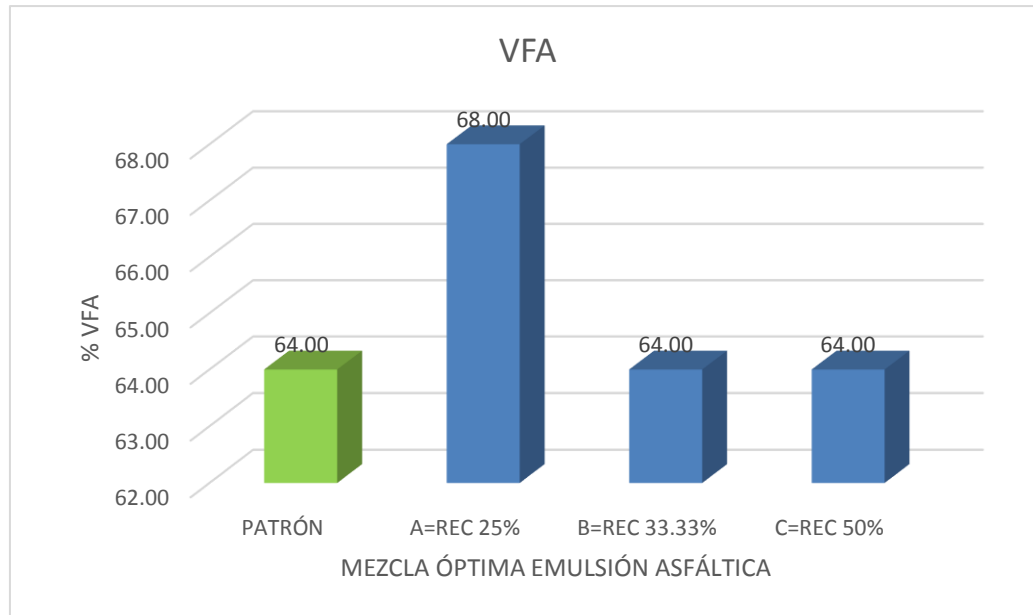


Figura 102. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto VFA de la mezcla patrón y de los diferentes porcentajes de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%), en función al óptimo de emulsión asfáltica (6%), (Fuente: Elaboración propia).

Se observa en la **Tabla 145**. Los resultados finales de la evaluación volumétrica de la mezcla asfáltica y con la ayuda de las **figuras 101 y 102**. Podemos deducir lo siguiente: el porcentaje de vacíos de agregado mineral VMA en la mezcla patrón es de **14.40%** y el VMA más alto se encuentra en la mezcla con reciclado al 25% con un **15.40%**, el más bajo es **14.20%** para la mezcla con reciclado al 50% y un valor de **14.40%** en el reciclado a 33.33%; de acuerdo a ello es notorio que al aumentar el contenido de reciclado en la mezcla se va reduciendo el porcentaje de VMA siendo similares e incluso menor al patrón en 33.33% y 50% de reciclado respectivamente.

En cuanto a los vacíos llenos de asfalto VFA, en las mezclas asfálticas consideradas, si observamos la **Figura 102**. En la mezcla patrón podemos llenar hasta un **64%** con emulsión asfáltica los espacios del VMA, teniendo un mejor llenado a 25% de reciclado que nos da **68%** y llenados similares a 33.33% y 50%.

4.24. Resultados modelos de predicción matemáticos para obtener el módulo de rigidez o módulo dinámico de mezclas asfálticas compactadas (método correlacional).

Tabla 146. Resultados predicción matemática del módulo de rigidez de la mezcla asfáltica compactada diseñado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, modelo 1.

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Patrón	Reciclado		
			25%	33.33%	50%
0°C	1	159096.19	159836.64	160367.89	162727.62
0°C	3	174890.58	175565.47	176049.32	178194.99
0°C	5	179221.17	179855.09	180309.41	182322.86
0°C	10	182729.91	183304.20	183715.64	185537.53
0°C	20	184275.34	184789.96	185158.51	186789.33
10°C	1	95462.42	95906.46	96225.16	97641.32
10°C	3	113382.19	113819.47	114133.09	115524.39
10°C	5	120538.79	120964.89	121270.39	122624.83
10°C	10	129258.30	129664.30	129955.28	131244.28
10°C	20	137385.34	137768.80	138043.52	139259.58
20°C	1	53974.96	54225.86	54406.01	55206.88
20°C	3	66895.05	67152.86	67337.84	68158.89
20°C	5	72914.72	73172.28	73357.03	74176.53
20°C	10	81335.74	81591.02	81774.07	82585.37
20°C	20	90743.21	90996.28	91177.69	91981.09
30°C	1	29098.32	29233.49	29330.59	29762.44
30°C	3	36379.97	36520.06	36620.63	37067.26
30°C	5	40112.28	40253.85	40355.46	40806.41
30°C	10	45855.98	45999.77	46102.93	46560.47
30°C	20	53202.69	53350.92	53457.23	53928.42

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 147. Resultados predicción matemática del módulo de rigidez de la mezcla asfáltica compactada diseñado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, modelo 2.

Modelo 2, WITCZAK					
Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo de rigidez de La mezcla asfáltica (Kg-F/Cm2)			
		Patrón	Reciclado		
			25%	33.33%	50%
- 17.7°C a 54.4°C	1	37773.74	40271.46	39682.52	42116.46
- 17.7°C a 54.4°C	3	67845.41	72360.22	71267.51	75785.27
-17.7°C a 54.4°C	5	93000.26	99210.20	97686.55	103987.40
-17.7°C a 54.4°C	10	150637.36	160748.37	158216.55	168690.30
-17.7°C a 54.4°C	20	263282.34	281060.43	276506.00	295354.98

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a las **Tablas 146 y 147**. Observamos los diferentes valores encontrados para el módulo de rigidez de la mezcla mediante la metodología de correlación por aplicación de modelos matemáticos de predicción; la **Tabla 146** muestra los módulos dinámicos a diferentes temperaturas en este caso a 0°C, 10°C, 20°C y 30°C; con el cual se puede predecir a una alta gama de temperaturas ya que considera en sus formula este parámetro; por tanto los resultados tienen una mayor validez, ya se puede saber bajo qué condiciones climáticas podemos usarla.

El modelo 2, da valores muy altos extremos por tanto este modelo es necesario comprobarlo con otros para ver su validez a pesar de usar muchos de los datos del primer modelo y más aún como los porcentajes de agregados, viscosidad de la emulsión asfáltica y el contenido efectivo de asfalto en la mezcla proyectada.

Tabla 148. Predicción matemática módulo de rigidez a 20°C y 10Hz,

Modelo 1; HWAING - WITCZAK

Parámetro	Antecedente	Modelo 1, resultados obtenidos			
	Hernández, 2014	Patrón	Reciclado a 25%	Reciclado a 33.33%	Reciclado a 50%
Temperatura (°C)	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
Frecuencia (Hz)	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Módulo dinámico (kg-f/cm2)	30298.00	81335.74	81591.02	81774.07	82585.37

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 149. Predicción matemática módulo de rigidez a 20°C y 10Hz,**Modelo 2; WITCZAK**

Parámetro	Antecedente	Modelo 2, resultados obtenidos			
	Hernández, 2014	Patrón	Reciclado a 25%	Reciclado a 33.33%	Reciclado a 50%
Temperatura (°C)	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
Frecuencia (Hz)	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Módulo dinámico (kg-f/cm ²)	30298.00	150637.36	160748.37	158216.55	168690.30

Fuente: Elaboración propia.

Las **Tablas 148, 149**; muestran el Análisis de predicción matemático del Módulo de Rigidez comparados con los valores del Módulo de rigidez de los Antecedentes (**Tabla N°3 pág. 14**), a la temperatura de 20°C y frecuencias de 10 Hertz; donde las predicciones indica valores muy altos en referencia al referente del antecedente, para el caso del Modelo 1; según el antecedentes da un valor de 30298 kg-f/cm²) y el de predicción está en 81335.74 kg-f/cm²; el modelo 2 está en 150637.36 kg-f/cm² mínimo, valores en algunos casos el doble y hasta el triple del referente, quiere decir que las mezcla en cualquiera de sus proporciones tiene muy buena respuesta a los esfuerzos por fatiga según los modelos utilizados.

4.25. Resultados, metodología de diseño Marshall modificado para el diseño de mezcla asfáltica patrón y diseño de mezcla asfáltica con agregados reciclados.

Del análisis de datos realizado en el ítem 3.6.25. Donde se determina la combinación de agregados a utilizar, los valores de los parámetros de diseño y la fórmula de trabajo de la mezcla de diseño Patrón, en esta parte se indican todos los resultados obtenidos, expresados en tablas, cabe indicar que en este mismo ítem no se muestra el procedimiento para los diseños de mezcla a 25%, 33.33%, 50% de agregado reciclado considerados en esta tesis, pero el procedimiento es el mismo con la diferencia que en la dosificación de agregados se agregan los agregados reciclados en los porcentajes mencionados ajustando los nuevos a este reemplazo, en cuanto a la dosificación de emulsión asfáltica se toma las cinco proporciones de prueba definidos en la explicación del diseño es decir: 4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25%, 6.75% y con ellos se encuentra el óptimo de emulsión asfáltica de diseño; a continuación se muestra los cuadros resumen de resultados de diseño obtenidos tanto para el diseño de mezcla Patrón como de los diseños de mezcla a 25%, 33.33%, 50%.

4.25.1. Resumen de resultados obtenidos para el diseño de mezcla Patrón.

Tabla 150A. Combinación de agregados definido para el diseño de mezcla Patrón, de acuerdo a la especificación MTC, mezclas densas en frío (MDF-2).

N° Tamiz	1"	3/4"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 50	N° 200
Tamaño de Tamiz (mm)	25.4	19	9.5	4.75	2.36	0.3	0.075
Especificación MDF-2	100	95/80	75/65	62/47	50/35	23/13	8/3
Promedio MDF-2	100.00	87.50	70.00	54.50	42.50	18.00	5.50
		Tanteo seleccionado					
		% pasante de cada agregado					
Tipo de agregado	% de cada agregado						
A. Grueso 1	22.72	22.72	10.68	1.82	0.91	0.00	0.00
A. Grueso 2	11.23	11.23	10.78	3.03	0.00	0.00	0.00
A. Fino 1	29.77	29.77	29.77	29.77	21.14	16.97	4.76
A. Fino 2	29.78	29.78	29.78	29.78	25.61	16.97	5.36
Filler	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	3.44
Combinación granulométrica	100.00	100.00	87.51	70.90	54.16	40.44	16.62

Fuente: Elaboración propia

Tabla 150B. Parámetros de diseño para el diseño de mezcla Patrón.

Parámetro de estudio	Valor de diseño
Emulsión Asfáltica CSS-1h	6.00 %
Porcentaje de vacíos de aire	5.00 %
Porcentaje de VMA	14.20 %
Porcentaje de VFA	60.40 %
Densidad	2.18 gr/cm ³
Estabilidad	22.00 KN
Flujo	4.28 mm

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 150C. Fórmula de Trabajo para el diseño de mezcla Patrón.

Parámetro de Trabajo	Valor de Trabajo
Emulsión Asfáltica CSS-1h	6.00 %
Agregado Grueso 1	22.72%
Agregado Grueso 2	11.23%
Agregado Fino 1	29.77%
Agregado Fino 2	29.78%
Filler	6.50%
Especificación MTC para mezclas densas en frío	MDF-2

Fuente. Elaboración propia.

4.25.2. Resumen de resultados obtenidos para el diseño de mezcla con 25% de agregado reciclado.

Tabla 151A. Combinación de agregado definido para el diseño de mezcla con 25% de agregados reciclado, de acuerdo a la especificación MTC, mezclas densas en frío (MDF-2).

N° Tamiz	1"	3/4"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 50	N° 200		
Tamaño de Tamiz (mm)	25.4	19	9.5	4.75	2.36	0.3	0.075		
Especificación MDF-2	100	95/80	75/65	62/47	50/35	23/13	8/3		
Promedio MDF-2	100.00	87.50	70.00	54.50	42.50	18.00	5.50		
Tanteo seleccionado									
% de cada agregado		% pasante de cada agregado							
Tipo de agregado	% de agregado								
A. Reciclado 1	12.5	12.50	10.75	9.75	7.75	6.00	2.50	0.38	
A. Reciclado 2	12.5	25	12.50	11.00	9.88	8.25	6.88	4.13	0.50
A. Grueso 1	17.00		17.00	6.80	1.19	0.00	0.00	0.00	0.00
A. Grueso 2	15.00		15.00	15.00	4.20	0.00	0.00	0.00	0.00
A. Fino 1	20.65		20.65	20.65	20.65	16.73	14.66	7.02	2.68
A. Fino 2	20.65		20.65	20.65	20.65	18.59	14.66	7.64	2.89
Filler	1.70		1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	0.83
Combinación granulométrica	100.00	100.00	86.55	68.02	53.01	43.90	22.99	7.28	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 151B. *Parámetros de diseño para el diseño de mezcla con 25% de agregado reciclado.*

Parámetro de estudio	Valor de diseño
Emulsión Asfáltica CSS-1h	6.00 %
Porcentaje de vacíos de aire	5.00 %
Porcentaje de VMA	15.40 %
Porcentaje de VFA	60.80 %
Densidad	2.175 gr/cm ³
Estabilidad	16.00 KN
Flujo	3.90 mm

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 151C. *Fórmula de Trabajo para el diseño de mezcla con 25% de agregado reciclado.*

Parámetro de Trabajo	Valor de Trabajo
Emulsión Asfáltica CSS-1h	6.00 %
Agregado reciclado 1	12.50 %
Agregado reciclado 2	12.50 %
Agregado Grueso 1	17.00 %
Agregado Grueso 2	15.00 %
Agregado Fino 1	20.65 %
Agregado Fino 2	20.65 %
Filler	1.70 %
Especificación MTC para mezclas densas en frío	MDF-2

Fuente. Elaboración propia.

4.25.3. Resumen de resultados obtenidos para el diseño de mezcla con 33.33% de agregado reciclado.

Tabla 152A. Combinación de agregado definido para el diseño de mezcla con 33.33% de agregados reciclado, de acuerdo a la especificación MTC, mezclas densas en frío (MDF-2).

N° Tamiz		1"	3/4"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 50	N° 200
Tamaño de Tamiz (mm)		25.4	19	9.5	4.75	2.36	0.3	0.075
Especificación MDF-2		100	95/80	75/65	62/47	50/35	23/13	8/3
Promedio MDF-2		100.00	87.50	70.00	54.50	42.50	18.00	5.50
Tanteo seleccionado								
	% de cada agregado	% pasante de cada agregado						
Tipo de agregado								
A. Reciclado 1	16.75	16.75	14.24	13.07	10.39	8.04	3.18	0.50
A. Reciclado 2	16.60	33.35	16.60	14.61	13.11	10.79	8.96	5.31
A. Grueso 1	12.15	12.15	4.86	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00
A. Grueso 2	14.00	14.00	14.00	3.92	0.00	0.00	0.00	0.00
A. Fino 1	22.20	22.20	22.20	22.20	17.98	15.76	7.55	2.89
A. Fino 2	18.00	18.00	18.00	18.00	16.20	12.78	6.66	2.52
Filler	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.15
Combinación granulométrica	100.00	100.00	88.21	71.45	55.66	45.85	23.00	6.55

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 152B. Parámetros de diseño para el diseño de mezcla con 33.33% de agregado reciclado.

Parámetro de estudio	Valor de diseño
Emulsión Asfáltica CSS-1h	6.00 %
Porcentaje de vacíos de aire	5.00 %
Porcentaje de VMA	14.40 %
Porcentaje de VFA	60.40 %
Densidad	2.205 gr/cm ³
Estabilidad	18.00 KN
Flujo	3.24 mm

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 152C. Fórmula de Trabajo para el diseño de mezcla con 33.33% de agregado reciclado.

Parámetro de Trabajo	Valor de Trabajo
Emulsión Asfáltica CSS-1h	6.00 %
Agregado reciclado 1	16.75 %
Agregado reciclado 2	16.60 %
Agregado Grueso 1	12.15 %
Agregado Grueso 2	14.00 %
Agregado Fino 1	22.20 %
Agregado Fino 2	18.00 %
Filler	0.30 %
Especificación MTC para mezclas densas en frío	MDF-2

Fuente. Elaboración propia.

4.25.4. Resumen de resultados obtenidos para el diseño de mezcla con 50% de agregado reciclado.

Tabla 153A. Combinación de agregado definido para el diseño de mezcla con 50% de agregados reciclado, de acuerdo a la especificación MTC, mezclas densas en frío (MDF-2).

N° Tamiz	1"	3/4"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 50	N° 200			
Tamaño de Tamiz (mm)	25.4	19	9.5	4.75	2.36	0.3	0.075			
Especificación MDF-2	100	95/80	75/65	62/47	50/35	23/13	8/3			
Promedio MDF-2	100.00	87.50	70.00	54.50	42.50	18.00	5.50			
Tanteo seleccionado										
	% de cada agregado			% pasante de cada agregado						
Tipo de agregado										
A. Reciclado 1	25.00			25.00	21.25	19.50	15.25	12.00	4.75	0.75
A. Reciclado 2	25.00	50.00		25.00	22.00	19.75	16.25	13.50	7.75	0.75
A. Grueso 1	15.00			15.00	6.75	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00
A. Grueso 2	10.00			10.00	10.00	2.50	0.10	0.00	0.00	0.00
A. Fino 1	13.00			13.00	13.00	13.00	10.01	8.58	4.29	1.43
A. Fino 2	11.50			11.50	11.50	11.50	10.24	7.59	4.03	1.38
Filler	0.50			0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.49
Combinación	100.00			100.00	85.00	67.35	52.35	42.17	21.32	4.80

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 153B. Parámetros de diseño para el diseño de mezcla con 50% de agregado reciclado.

Parámetro de estudio	Valor de diseño
Emulsión Asfáltica CSS-1h	6.00 %
Porcentaje de vacíos de aire	5.00 %
Porcentaje de VMA	14.10 %
Porcentaje de VFA	60.40 %
Densidad	2.212 gr/cm ³
Estabilidad	14.00 KN
Flujo	3.70 mm

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 153C. Formula de Trabajo para el diseño de mezcla con 50% de agregado reciclado.

Parámetro de Trabajo	Valor de Trabajo
Emulsión Asfáltica CSS-1h	6.00 %
Agregado reciclado 1	25.00 %
Agregado reciclado 2	25.00 %
Agregado Grueso 1	15.00 %
Agregado Grueso 2	10.00 %
Agregado Fino 1	23.00 %
Agregado Fino 2	11.50 %
Filler	0.50 %
Especificación MTC para mezclas densas en frío	MDF-2

Fuente. Elaboración propia.

4.26. Resultados finales de pruebas físico-mecánicas de comparación de rendimientos entre mezcla patrón y mezclas con agregados reciclados, expresado en porcentaje.

Tabla 154. Resumen comparativos finales estabilidad y flujo.

Estabilidad y flujo		
	Mezcla	Cumple valores mínimos de Norma (EG-2013) y antecedentes (IDU 510-11, GU-GE-011, 450-05/11; INVIAS 440-13, 461-13)
Estabilidad	Reciclado < 18.18% al patrón (-)	Es superior a mínimos requeridos
Flujo	Reciclado > 24.29% al patrón (+)	Es superior a mínimos requeridos

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 155. Resumen comparativos finales resistencia Inmersión – compresión.

Resistencia a Inmersión - compresión		
	Mezcla	Cumple valores mínimos de Norma (EG-2013) y antecedentes (IDU 510-11, GU-GE-011, 450-05/11; INVIAS 440-13, 461-13)
Compresión en seco	Reciclado < 1.55% al patrón (-)	Es inferior a mínimos requeridos
Compresión en húmedo	Reciclado < 4.00% al patrón (-)	Es inferior a mínimos requeridos
Resistencia conservada	Reciclado > 4.30% al patrón (+)	Es superior a mínimos requeridos

Fuente: Elaboración propia

Tabla 156. Resumen comparativos finales resistencia tracción indirecta.

Resistencia a Tracción indirecta		
	Mezcla	Cumple valores mínimos de Norma (EG-2013) y antecedentes (IDU 510-11, GU-GE-011, 450-05/11; INVIAS 440-13, 461-13)
Tracción indirecta en seco	Reciclado > 7.69% al Patrón (+)	Es superior a mínimos requeridos
Tracción indirecta en húmedo	Reciclado < 21.44% al Patrón (-)	Es superior a mínimos requeridos
Resistencia conservada	Reciclado < 4.72% al Patrón (-)	Es superior a mínimos requeridos

Fuente: Elaboración propia

Tabla 157. Resumen comparativos finales esfuerzo módulo de rigidez.

Esfuerzo módulo de rigidez		
	Mezcla	Cumple valores mínimos antecedentes (pág. 14)
Modelo 1, 20°C, 20 Hz	Reciclado > 1.53% al patrón (+)	Es superior a mínimo requerido
Modelo 2, -17.7 °C a 54.4°C, 20 Hz	Reciclado > 11.98% al patrón (+)	Es superior a mínimo requerido

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la **tabla 154, 155, 156, 157**. Es el resumen de los ensayos físico – mecánicos propuestos para la justificación de la hipótesis, de tal forma que ellos ayudan a explicar las conclusiones de la presente tesis de investigación.



5. Capítulo V: Discusión.

Temas asociados a la validación de la Hipótesis.

1. ¿Por qué se eligió la emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta en el diseño de mezclas en frío?

Se elige la emulsión asfáltica de rotura lenta por ser una emulsión que te da el tiempo prudente para poder trabajarla o manipularla sin que este se endurezca o pierda sus propiedades de fluido el cual puede ser hasta días, además su carácter de carga catiónica (positiva), da las condiciones de recubrimiento y adherencia con la mayoría materiales pétreos.

2. ¿Por qué se eligió una combinación de varios agregados incluyendo agregados reciclados y no de una cantera en particular?

Se quería demostrar que no necesariamente se puede usar un agregado específico en un diseño, si los ensayos de control de calidad son satisfactorios para todos o la mayoría de agregados; porque no realizar una combinación de los mismos, así se tiene más alternativas de uso de agregados y se rompe mitos de cual o tal cantera reúne las mejores características o usos y más aún si consideramos agregados reciclados en el que se desconoce la procedencia del mismo; además de ofrecer una ventaja ambiental de sobre explotación de recursos, ente caso canteras de agregados.

3. ¿Por qué se eligió dos carpetas asfálticas recicladas para los diseños planteados?

Se elige dos carpetas asfálticas recicladas en razón de que se desconocía exactamente la constitución granulométrica de las mismas; por tanto podríamos tener problemas en cumplir los Husos granulométricos que corresponde a un mezcla densa en frío tipo 2 (MDF-2); además se sabe que la mayoría de las vías que se construyen con asfalto son vías trabajadas en caliente por tanto las mallas granulométricas y los husos exigidos son distintos a los usados en mezclas en frío.



2. ¿Por qué se realizó el ensayo de módulo de rigidez o dinámico por modelos de predicción matemáticos – metodología correlacional?

Se realizó el ensayo de módulo dinámico por modelos de predicción matemáticos – correlacionales, a raíz de no contar con un equipo que mida esta condición en laboratorio al momento de realizar los ensayos; por otro lado se tiene conocimiento de otros trabajos donde utilizaron la metodología Shell con tablas específicas para determinar este módulo; por estas razones vimos por conveniente probar un método teórico de análisis, pero que usa datos de otros ensayos reales como el porcentaje de asfalto de las mezclas asfálticas, la viscosidad y penetración del asfalto o emulsión asfáltica, así como los porcentajes de agregado de diferentes mallas de acuerdo al diseño elaborado, porcentaje de vacíos en la mezcla; datos que si se manejan y pueden ser utilizados con estos modelos de predicción correlacionales.

Contraste de resultados con referente al marco teórico.

3. ¿Los agregados gruesos, finos y reciclados cumplen los ensayos de control de calidad exigidas para mezclas densas en frío de acuerdo al manual EG-2013 MTC?

Todos los agregados cumplen los ensayos exigidos en cuanto a calidad a excepción del ensayo de chatas y alargadas de agregado reciclado grueso 2 que sobrepasa los límites que según el manual EG-2103 MTC debe de ser máximo 10% y este reciclado da resultado de 15%, pero no excluye su uso ya que cumple con todos los demás ensayos.

4. ¿La emulsión asfáltica de rotura lenta cumple con los parámetros y especificaciones exigidas de acuerdo al manual EG-2013 MTC?

De acuerdo al manual EG-2013 MTC en la sección 415.02 referente a emulsiones asfálticas en la **Tabla 415-04** (Anexo 2 de la presente tesis) y la **Tabla 5** de la presente donde se encuentran las especificaciones que debe cumplir la emulsión asfáltica de rotura lenta seleccionada CSS-1h, que según los resultados obtenidos en el Laboratorio del Ministerio de Transportes Sede Lima para residuo por destilación (E.T. 57% , resultado 56.2%) y viscosidad Saybolt furol (E.T. 20.00 SSU,



resultado 15.8 SSU), dicha emulsión está por debajo de los parámetros mínimos exigidos; por tanto no es de buena calidad.

5. ¿La estabilidad y flujo se encuentra dentro de los parámetros exigidos por los antecedentes utilizados?

Según el **anexo 04** de la presente tesis referente a estabilidad y flujo, se observa que la estabilidad está en el rango de **660 kg-f a 2200 kg-f** y los resultados hallados en esta investigación están entre **1427.6 kg-f (14 KN)** y **2243.38 kg-f (22 KN)**.

Por otro lado el flujo está en el rango de **6.6mm a 9.7mm** y los resultados hallados en esta investigación están entre **3.24mm y 4.28mm**.

Por tanto para el primer caso Si estamos dentro de lo exigido, más para el segundo caso no estamos dentro de lo exigido; pero se tienen mejores resultados.

6. ¿La resistencia a inmersión - compresión se encuentra dentro de los parámetros exigidos por los antecedentes utilizados?

Según el **anexo 04** de la presente tesis referente a resistencia a inmersión - compresión, se observa que la resistencia en seco está en el rango de **20.4 kg-f/cm² a 25 kg-f/cm²** y los resultados hallados en esta investigación están entre **13.37 kg-f/cm² y 16.07 kg-f/cm²**.

Por otro lado la resistencia en húmedo está en el rango de **13.7 kg-f/cm² a 19.4 kg-f/cm²** y los resultados hallados en esta investigación están entre **11.02 kg-f/cm² y 13.23 kg-f/cm²**.

Por tanto, para el primer caso No estamos dentro de lo exigido, es más los valores hallados son muy bajos, más Si para el segundo caso que a pesar de ser bajo se aproxima al mínimo exigido.



7. ¿La resistencia a tracción indirecta se encuentra dentro de los parámetros exigidos por los antecedentes utilizados?

Según el **anexo 04** de la presente tesis referente a resistencia a tracción indirecta, se observa que la resistencia en seco está en el rango de **0,004 kg-f/cm² a 17.44 kg-f/cm²** y los resultados hallados en esta investigación están entre **7.49 kg-f/cm² y 9.88 kg-f/cm²**.

Por otro lado la resistencia en húmedo está en el rango de **0.0065 kg-f/cm² a 11.63 kg-f/cm²** y los resultados hallados en esta investigación están entre **6.03 kg-f/cm² y 8.04 kg-f/cm²**.

Por tanto, para ambos casos Si estamos dentro de lo exigido.

8. ¿El módulo de rigidez o dinámico se encuentra dentro de los parámetros exigidos por los antecedentes utilizados?

Según el **anexo 04** de la presente tesis referente al módulo de rigidez, se observa que está en el rango de **17 115 kg-f/cm² a 56 000 kg-f/cm²** y los resultados hallados en esta investigación están entre **29 028 kg-f/cm² y 295 355 kg-f/cm²**.

Por tanto Si estamos dentro de lo exigido y con mejores resultados.

Aportes de la investigación.

9. ¿Qué se demostró al aplicar métodos de predicción matemáticos correlacionales a ensayos físico – mecánicos a mezclas asfálticas en frío?

Que pueden ser de mucha ayuda si queremos conocer este parámetro, más aún si no se cuenta con los equipos necesarios para realizar este tipo de ensayos; pero depende de mucho criterio y experiencia validar estos resultados en aplicaciones prácticas, ya que uno de los modelos tiene un rango muy amplio de valores por considerar un rango amplio de temperatura; el otro modelo es más preciso, ya que considera temperaturas dadas por el diseñador.



10. ¿Es recomendable el uso de agregado reciclado en la construcción de vías; si es así hasta que porcentaje y en qué tipo de vías?

El uso de agregados reciclados es una buena alternativa para construir carreteras y vías secundarias en nuestro medio, además de reducir el uso excesivo de agregados nuevos extraídos de canteras, queda demostrado que cumple las normas y especificaciones exigidas vigentes en nuestro país; también es notorio el uso solo hasta el 50% ya que evidencia una baja en ciertos ensayos físico - Mecánicos; pero se ve muy buenos resultados reemplazando un tercio del agregado es decir 33.33% el cual es el óptimo a reemplazar o recomendado en la presente tesis.

Glosario.

- **Abrasión de agregados;** Desgaste producido por la fricción y/o impacto por esferas metálicas y el agregado en un tambor (máquina de los ángeles).
- **Absorción de agregados;** Capacidad que tiene el agregado de retener un fluido después de ser expuesto a este un determinado tiempo.
- **Afirmado:** Capa compactada de agregado granular de gradación definida que soporta directamente los esfuerzos y cargas del tráfico.
- **Aglomerante:** Aditivo con capacidad de unir partículas de material inerte por efectos físicos o químicas o ambas.
- **Agregado de gradación abierta:** Agregado con poco o ningún relleno mineral, donde los espacios vacíos al ser compactados son relativamente grandes.
- **Agregado de gradación cerrada o densa:** Agregado con alto relleno mineral y agregados finos, donde los espacios vacíos son claramente reducidos y mínimos.
- **Agregado fino:** Agregado que según las especificaciones técnicas, pasa la malla N° 4 (4.75 mm).
- **Agregado grueso:** Agregado que según las especificaciones técnicas, no pasa la malla N° 4 (4.75 mm); es decir todo lo retenido por encima de esta malla.
- **Agregado reciclado de carpetas asfálticas;** Agregado recuperado por medio de fresado y lavado de esta por medios mecánicos y uso de solventes.



- **Ahuellamiento;** Surcos que se producen en la superficie de rodadura del pavimento, y que es el resultado del movimiento lateral de los materiales por efectos del tránsito, deformación prematura por mala selección de materiales y diseño de mezcla.
- **Análisis granulométrico;** Proceso para definir la granulometría de un agregado, determinación cuantitativa de tamaños presentes en la misma usando mallas estandarizadas.
- **Asfalto;** Producto cementante, de color negro o marrón, compuesto principalmente por betunes de origen natural o por refinación del petróleo.
- **Bacheo;** Consiste en reparar por medio de relleno y compactación con una mezcla asfáltica los huecos o depresiones que se presentan en la superficie de rodadura de manera rutinaria.
- **Bitumen;** Producto cementante de color oscuro (sólida o viscosa), compuesta por hidrocarburos de alto peso molecular, siendo uno de ellos los asfaltos, las breas, los betunes.
- **Cantera de agregados;** Yacimiento natural de agregado apropiado para su uso en la construcción, rehabilitación, mejoramiento o mantenimiento de carreteras.
- **Canto rodado;** Rocas fragmentadas de formas no angulares (redondas) y de superficie lisa.
- **Carretera pavimentada;** Vía cuya superficie de rodadura, está conformada por mezcla asfáltica (flexible) o por concreto (rígida).
- **Cemento asfáltico;** Asfalto fluido o no, de calidad y consistencia adecuados para su uso en construcción de pavimentos flexibles de gran capacidad aglomerante.
- **Cemento portland;** producto obtenido de la pulverización y calcinación de la piedra caliza (Clinker) y yeso, gran capacidad aglomerante al adicionarle agua.
- **Compactación;** Operación manual o mecánico que permite reducir el volumen total de vacíos en suelos, mezclas asfálticas, morteros y concretos frescos, por medio de equipos de compactación en laboratorio o máquinas de compactación de gran tonelaje en obra.
- **Concreto asfáltico;** Mezcla compuesta por agregados gruesos y finos y asfalto, de ser necesario se incorpora aditivos para mejorar alguna propiedad, de uso en capas de base o de rodadura en la estructura del pavimento.
- **Contenido de humedad;** Cantidad de agua presente en el agregado, porcentaje en masa del elemento húmedo (masa seca + humedad).
- **Control de calidad;** Ensayos técnicos para determinar la correcta ejecución de los trabajos en relación a las especificaciones técnicas vigentes.



- **Curva granulométrica;** Esquema gráfico de la granulometría, proporciona la distribución de tamaños del agregado, en las abscisas están los logaritmos de los tamices usados y en las ordenadas los porcentajes que pasan o los retenidos acumulados.
- **Densidad de la mezcla asfáltica;** Relación entre el peso de la mezcla asfáltica y su volumen (forma de la briqueta).
- **Destilación de emulsión asfáltica;** Procedimiento que permite separar los volátiles de la emulsión como el agua del asfalto presente (cemento asfáltico), que forman la emulsión a través de la condensación o vaporización.
- **Durabilidad del concreto asfáltico;** Propiedad de una mezcla asfáltica pavimentada, para resistir la desintegración a efectos ambientales o de tráfico, como oxidación y volatilización inducidos principalmente por acción del agua.
- **Emulsión asfáltica;** Mezcla de cemento asfáltico, agua y emulsificante, de carácter acuoso.
- **Ensayo de compresión de briquetas asfálticas;** Ensayo de mide la resistencia de una briqueta sometida a un esfuerzo de compresión, de acuerdo a las especiaciones requeridas.
- **Ensayo Marshall;** Ensayo para determinar el contenido de asfalto y calidad de una mezcla asfáltica midiendo la estabilidad y flujo.
- **Equivalente de arena;** Porcentaje relativo del contenido de polvo fino o arcilla en los suelos o agregados finos.
- **Exudación de asfalto;** Flujo de asfalto en la superficie de pavimento asfáltico que forma una película sobre ella.
- **Fatiga de pavimento flexible;** Reducción progresiva de la resistencia de la carpeta asfáltica, debido a las cargas o sollicitaciones repetitivas.
- **Filler;** Caliza pulverizada, polvo de roca, cal hidratada, cemento Portland, de uso en la constitución de mezclas asfálticas como relleno de vacíos, espesante o mejorador de adherencia.
- **Firme;** Conjunto de capas ejecutadas con materiales seleccionados, generalmente tratados, que constituyen la superestructura de la plataforma, resiste las cargas del tránsito y permite que la circulación tenga lugar con seguridad y comodidad, está formado de abajo hacia arriba por las capas de sub-base, base y por el pavimento.
- **Fisura;** Fractura fina, de varios orígenes como cargas inducidas en ensayos, con un ancho igual o menor a 3 milímetros.



- **Fresado de pavimento;** Es la acción de retirar el firme o pavimento agotado, fisurado o en mal estado de la vía, el trabajo consiste en la retirada superficial del pavimento bituminoso existente en mal estado, a fin de restaurar el perfil longitudinal y transversal del mismo para luego posibilitar la colocación de una nueva capa de mezcla asfáltica, este es realizado por una máquina fresadora constituido por una rueda metálica circular acoplada con uñas tipo paletas que arrancan el pavimento.
- **Grado de penetración;** Clasificación de los cementos asfálticos en función la penetración medida en dmm a 25°C, los más conocidos son: 40-50, 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300.
- **Grado de viscosidad;** Clasificación de cementos asfálticos basado en la viscosidad máxima a 60°C y viscosidad mínima a 135°C, el propósito es establecer valores límites de consistencia a estas temperaturas, 60°C temperatura de servicio máxima de la superficie del pavimento asfáltico, los 135°C temperatura de mezclado y colocación de pavimentos de mezclas en caliente.
- **Granulometría;** Distribución de tamaños que posee el agregado mediante el tamizado de forma manual o mecanizada.
- **Impermeabilidad;** Capacidad del pavimento asfáltico de impedir el paso de aire o agua a través de él.
- **Imprimación asfáltica;** Aplicación de un material asfáltico, de baja viscosidad, para recubrir y aglutinar las partículas del suelo, previo a la colocación de la carpeta asfáltica.
- **Mezcla asfáltica en frío;** Constituida por agregados gruesos, finos y filler, aditivos de acuerdo a diseño y a las especificaciones técnicas vigentes, utilizada como capa de rodadura, forma parte de la estructura del pavimento.
- **Miscibilidad;** Capacidad de dos o más sustancias líquidas para mezclarse entre sí para formar una solución homogénea.
- **Pavimento;** Estructura colocada sobre la vía, para resistir y distribuir los esfuerzos dados por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito, está conformada por la sub base, base y capa de rodadura.
- **Pavimento asfáltico reciclado;** Resulta de la mezcla asfáltica antigua recuperada mediante operación por fresado y adición de asfalto, agregados y aditivos, según diseño.
- **Permeabilidad;** Capacidad de un material para permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna.



- **Resistencia a compresión;** Ensayo que se realiza sobre una muestra cilíndrica 4x4 pulgadas en una prensa a la que se aplica una fuerza hasta la rotura de la muestra, con la finalidad de obtener su capacidad de carga o soporte.
- **Resistencia al deslizamiento;** Capacidad para resistir el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos sobre la carpeta asfáltica mojada.
- **Riego de liga;** Aplicación delgada y uniforme de material asfáltico sobre una superficie existente de asfalto o de concreto hidráulico, con la finalidad de asegurar la adherencia.
- **Rotura de emulsión;** Fenómeno físico-químico de separación del agua y asfalto, en la emulsión asfáltica, en el proceso de curado su velocidad de rotura está dada por el agente emulsivo.
- **Sello asfáltico;** Consiste en la aplicación de un material bituminoso sobre la superficie de pavimento existente, al que se cubre con material granular fino según diseño, para finalmente proceder a su compactación.
- **Sub base;** Capa de un pavimento que se encuentra inmediatamente por debajo de la capa de Base.
- **Sub rasante;** Superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte o relleno), sobre la cual se coloca la estructura del pavimento o afirmado.
- **Superficie de rodadura;** Superficie plana del pavimento, que soporta directamente las cargas del tráfico.
- **Tamiz;** Equipo de laboratorio, usado para separar material por tamaño, consta de una malla de aberturas cuadradas de las más gruesas 4" a las más finas N° 200 (um).
- **Vida útil de una vía;** Tiempo previsto de una obra vial, en la cual debe prestar servicio en óptimas condiciones.
- **Viscosidad;** Es la resistencia a fluir, método usado para medir la consistencia del asfalto.
- **Viscosidad absoluta;** Método usado para medir la viscosidad en POISE, este método hace uso de un vacío parcial para inducir el flujo al viscosímetro.
- **Viscosidad cinemática;** Método usado para medir la viscosidad en STROKE.
- **Viscosímetro;** Tubo capilar de vidrio adecuado para inducir capilaridad en vacío.
- **Volumen de vacíos;** Cantidad total de espacios vacíos en una mezcla asfáltica compactada.



Conclusiones.

Conclusión general.

No se logró demostrar la Hipótesis general completamente, que a la letra dice: **“Los valores de las magnitudes de las propiedades físico-mecánicas, de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, han diferido positivamente en todos los ensayos físico-mecánicos definidos, en referencia a la mezcla patrón y son superiores a los valores mínimos requeridos”**; en razón a que la mayoría de los ensayos físico – mecánicos dan resultados favorables o bien a la mezcla asfáltica patrón o a la mezcla con agregado reciclado; por ello al establecer la diferencia entre la mezcla con agregado reciclado y la mezcla patrón esta diferencia solo es de 0.1%; además de los resultados obtenidos no todos se encuentran dentro de los mínimos requeridos indicados **en la normativa del manual EG-2013, IDU, INVIAS Tabla 2, Tabla 3 de la página 13, 14 y anexo 2 de la presente tesis.**

Conclusión N°1.

Se logró demostrar parcialmente la sub hipótesis N°1 que a la letra dice: **“La Estabilidad y Flujo de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, han diferido positivamente, en referencia a la mezcla patrón y los resultados obtenidos son superiores a los mínimos requeridos”**; en razón a que la estabilidad Marshall de la mezcla patrón es superior en **18.18%** al mejor resultado de la mezcla reciclada y el flujo o deformación Marshall de la mezcla reciclada al 33.33% es superior en **24.29%** en referencia a la mezcla patrón; por otro lado el mejor valor obtenido para la estabilidad es **22 KN** y para el flujo es **3.24 mm**; mismos que están muy por encima de los mínimos requeridos; **es decir mayor a una estabilidad de 5.88 KN (600 kg-f), 9.89 KN (2224 lb-f), 2.2 KN y un flujo menor a 4.00mm** indicado en la normativa del manual EG-2013 y IDU, INVIAS Tabla 2 pág. 13 y anexo 2 de la presente tesis.

Conclusión N°2.

Se logró demostrar parcialmente la sub hipótesis N°2 que a la letra dice: **“La resistencia a inmersión - compresión de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, ha diferido positivamente, en referencia a la mezcla patrón y los resultados obtenidos son superiores a los mínimos requeridos”**; en razón a que la



resistencia a inmersión-compresión en seco de la mezcla patrón es superior en **1.55%** frente al mejor resultado de la mezcla reciclada y la resistencia conservada de la mezcla reciclada al 33.33% es superior en **5.22%** en referencia a la mezcla patrón; por otro lado el mejor valor obtenido para la resistencia inmersión-compresión es **16.076 kg-f/cm²** y para la resistencia conservada es **86.60%**; mismo que es muy por debajo de los mínimos requeridos; **es decir mayor a 25 kg-f/cm² (resistencia en seco) y mayor a 75% (resistencia conservada) el cual si superamos, indicado en la normativa del manual EG-2013, IDU, INVIAS Tabla 2 pág. 13 y anexo 2 de la presente tesis.**

Los resultados obtenidos en los ensayos de absorción de los agregados reciclados indican un promedio de **1.04 %** el cual es muy bajo, esto nos indica que es un agregado compacto y poco poroso; la razón es que los poros han sido sellados por el asfalto usado anteriormente el cual impide el ingreso del nuevo asfalto (grado de adherencia), mismo que puede ser un factor de distorsión en el diseño escogido con adición de agregados reciclados y por ello la baja resistencia en el ensayo de inmersión-compresión.

Conclusión N°3.

Se logró demostrar parcialmente la sub hipótesis N° 3 que a la letra dice: **“La resistencia a tracción indirecta de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, ha diferido positivamente, en referencia a la mezcla patrón y los resultados obtenidos son superiores a los mínimos requeridos”**; en razón a que la resistencia a tracción indirecta en seco de la mezcla reciclada a 33.33% es superior en **7.69%** frente a la mezcla patrón; y la resistencia conservada de la mezcla patrón es superior en 5.65% en referencia al mejor resultado de la mezcla reciclada; por otro lado el mejor valor obtenido para la resistencia a tracción indirecta es **9.88 kg-f/cm²** y para la resistencia conservada es **93.64%**; mismos que están muy por encima de los mínimos requeridos; **es decir mayor a 2.54 kg-f/cm² (resistencia en seco) y mayor a 50% (resistencia conservada), indicado en la normativa del manual EG-2013, IDU, INVIAS Tabla 2 pág. 13 y anexo 2 de la presente tesis.**



Conclusión N°4.

Se logró demostrar totalmente la sub hipótesis N°4, que a la letra dice: **“El módulo de rigidez de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, ha diferido positivamente, en referencia a la mezcla patrón y los resultados obtenidos son superiores a los mínimos requeridos”**; en razón a que el módulo de rigidez **Modelo 1** de la mezcla reciclada a 50% es superior en **1.53 %** en referencia a la mezcla patrón, el módulo de rigidez **Modelo 2** de la mezcla reciclada a 50% es superior en **11.98%** en referencia a la mezcla patrón; por otro lado el mejor valor obtenido por el modelo 1 del módulo de rigidez es 82585.37 kg-f/cm² y del modelo 2 es 168690.30 kg-f/cm²; mismos que están muy por encima de los mínimos requeridos; **es decir mayor a 30 298.00 kg-f/cm² a 10 Hz y 20°C de temperatura indicado en la Tabla 3 pág. 14 de la presente tesis.**

Recomendaciones.

Recomendaciones asociadas a otras investigaciones.

Recomendación N°1.

Se recomienda investigar que tanto puede influir la variación de los porcentajes de cemento a 1%, 2%, 3%, 4%, 5% usado como filler en las propiedades físico - mecánica en mezclas asfálticas en frío.

Recomendación N°2.

Se recomienda comparar los resultados de módulo de rigidez teóricos obtenidos con datos reales de laboratorio para ver su valor de significancia, respecto a los teóricos obtenidos.

Recomendación N°3.

Se recomienda reemplazar solo hasta un 33.33 % con agregados reciclados en el diseño final en mezclas asfálticas en frío Tipo (MDF-2); en virtud de que los ensayos obtenidos en las pruebas físico-mecánicas de la presente Tesis, dan los mejores resultados hasta esta cantidad de sustitución.

**Recomendación N°4.**

De acuerdo a lo indicado en la conclusión de la sub hipótesis 2, para evitar la distorsión del diseño de mezcla por adición de agregados reciclados, se recomienda utilizar una emulsión asfáltica de rotura lenta con adición de polímeros, con la finalidad de garantizar la adherencia efectiva con los agregados que tienen los poros total o parcialmente saturados y evitar la distorsión del diseño elegido por uso de agregados reciclados, garantizando de esta manera los resultados en las pruebas de resistencia físico-mecánicas que se pueda realizar.

Recomendaciones para trabajos en laboratorio.**Recomendación N°5.**

Las probetas compactadas de mezclas asfálticas en frío deben de dejarse curar por lo menos un día al aire libre dentro del molde antes de extraerlas por eyección, de no ser así se corre el riesgo de malograr la briqueta; previo al moldeo y compactación los moldes deben de engrasarse, todo ello garantiza una buena extracción de la briqueta sin fallas.

Recomendación N°6.

Para el lavado de asfalto en el equipo de centrifugado es recomendable dejar reposar por lo menos una hora el material asfáltico en el solvente en este caso gasolina, en razón de que al momento de realizar el lavado se garantiza una limpieza total del agregado.

Recomendación N°7.

Al realizar el tamizado para cualquier agregado estos deben estar totalmente secos, ya que al tamizar los finos se pegan o adhieren al material más grueso ocasionando errores en pesaje y pérdidas porcentuales en las mallas más finas.

Recomendaciones de ejercicio profesional.**Recomendación N°8.**

Para la construcción de una vía nueva se recomienda la elección de la emulsión asfáltica en función de los tipos de agregados que se estén manejando sean estos agregados Básicos (calizas), ácidos (areniscas, cuarzos, silicatos) o neutras (silico-calizas, dioritas); porque de ello depende la buena adherencia de la emulsión asfáltica al agregado.

**Recomendación N°9.**

Para la construcción de carreteras o vías secundarias nuevas en nuestro medio, se recomienda esperar de 7 a 10 días antes de la puesta en servicio de la vía, con ello se garantiza la buena adherencia del asfalto y todos los constituyentes de la mezcla en la carpeta asfáltica; en este tiempo se logra la rotura o quiebre completo de la emulsión asfáltica; es decir la salida o evaporación total del agua que la constituye quedando solo el asfalto adherido a los agregados.

Recomendaciones para la Universidad Andina del Cusco.**Recomendación N°10.**

Se recomienda la continuación de adquisición de equipos de laboratorio para asfaltos y pavimentos, así de esta forma poder lograr mayores investigaciones u otros relacionados en este campo de la Ingeniería Civil, con trabajos mejor elaborados y de calidad a nivel de pre y posgrado.

Recomendación N°11.

Se recomienda a los estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad Andina del Cusco, seguir investigando y realizar proyectos de tesis referidos a pavimentos y mezclas asfálticas; en virtud de que es necesario contar con profesionales especialistas en este campo, que garanticen la calidad de nuestras vías.



Referencias bibliográficas.

- **Bracho C., (2002).** Emulsiones Asfálticas Usos, Universidad de los Andes, Venezuela.
- **Burbano C., (2011).**Influencia de la granulometría y la dosificación en el fresado estabilizado con emulsión asfáltica, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia.
- **Del Aguilar P., (2005).** Caracterización del asfalto recuperado de una carpeta en servicio para la evaluación del pavimento. Perú.
- **Díaz A.A., (2005).** Estudio del comportamiento de las mezclas recicladas en frío con emulsión incorporando distintos materiales de adición, Tesis menor, Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- **Allen D. D., (1990).** Cold-recycled bituminous concrete using bituminous materials, Transportation Research Board,U.S.A.
- **Fabela M., (1999).** Proceso de remoción de carpetas asfáltica, publicación técnica N°121 Secretaría de Comunicaciones y transportes – Instituto Mexicano del Transporte, México.
- **Flor G., (2012).**Aprovechamiento de hormigón reciclado en obras viales. Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
- **Witczak W., (2004).** Development of a master curve (e*) database for lime modified asphaltic mixtures. Arizona State University.U.S.A.
- Manual de ensayo de materiales EM 2000, edición 2016, Ministerio de Transportes y comunicaciones, Perú.
- Manual de carreteras, especificaciones técnicas generales, EG-2013, Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Perú.

**Enlaces web.**

- Moragués T. A. (2015). Procesos de hidratación del cemento y microestructura del hormigón. Universidad Politécnica de Madrid. España. Recuperado de <http://prt2.uprm.edu/Microestructura.pdf>
- Hernández P.(2014).Evaluación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas utilizando pavimento reciclado ligantes hidráulicos y emulsion asfáltica. Colombia. Recuperado.<http://webidu.idu.gov.co:9090/jspui/bitstream/123456789/35401/20/60018341-10.pdf>
- Anter. (2019). Asociación Técnica de estabilizado de suelos y Reciclado de firmes. España. Recuperado de <http://www.anter.es/pdf/L1.pdf>
- Moreno M.A. (2011). Efecto de la presencia de humedad en el comportamiento de mezclas asfálticas sometidas a ensayos de rueda de carga Norma NLT -173/84. Chile. Recuperado http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2011/cf-moreno_mc/pdfAmont/cf-moreno_mc.pdf
- Cornejo w. (2009). Manual básico de emulsiones asfálticas MS N° 19 para publicar. EE.UU.Recuperado.https://www.academia.edu/28399064/Manual_Basico_de_Emulsiones_Asfalticas_MS_No_19_para_Publicar
- Rojas J. (2013). Norma INV E-789-07 Ahuellamiento. Colombia. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/146091766/Norma-Inv-E-789-07-Ahuellamiento>
- Simieli D. (2007). Utilizao de agregados reciclados em pavimentos intertravados. Brasil. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/810/81050204.pdf>
- Pino L. (2013). Reciclado de pavimentos en carreteras aplicación en Cuba. Cuba. Recuperado de <https://www.monografias.com/trabajos98/reciclado-pavimentos-carreteras-aplicacion-cuba/reciclado-pavimentos-carreteras-aplicacion-cuba.shtml>
- Thenoux G. (2010). Análisis de casos de ahuellamiento en mezclas asfálticas chilenas. Chile.Recuperado.http://www2.udec.cl/~provincial/trabajos_pdf/16GmoThenouxAhuellamiento.pdf
- Rubio M.C. (2011). Propiedades mecánicas de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos reciclados de residuos Silestone. España. Recuperado de <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/download/618/665>



- Padilla A. (2004). Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. México. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3334>
- Ramírez A., ladino I., Rosas J. (2014). Diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología Gap Graded para la ciudad de Bogotá. Colombia. Recuperado de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1743/1/Dise%C3%B1o-mezcla-asf%C3%A1ltica-asfalto-caucho-tecnolog%C3%ADa-Gap-Grade.pdf>
- Vega D. (2016). Análisis del comportamiento a compresión de asfalto conformado por caucho reciclado de llantas como material constitutivo del pavimento asfáltico. Ecuador. Recuperado. <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/25264/1/Tesis%201113%20-%20Vega%20Zurita%20Danilo%20Sebasti%C3%A1n.pdf>
- Galván L. (2015). Criterios de análisis y diseño de una mezcla asfáltica en frío con pavimento reciclado y emulsión asfáltica tesis de grado UNI. Perú. Recuperado de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_93b1745109b6003e8204437daa285034
- MTC. (2013). Manual carreteras Especificaciones técnicas generales de construcción EG-2013. Perú. Recuperado. http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/P_recientes/4955.pdf
- Salazar J. (2011). Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el RTCA 75.01.22:047. Costa Rica. Recuperado de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/materiales/article/view/8392>
- MTC. (2016). Manual de ensayo de materiales EM-2000 edición 2016. Perú. Recuperado. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf
- Valdez E. (2019). Secciones 700-800 materiales, mezclas asfálticas, prospección de pavimentos. Colombia. Recuperado. <https://es.scribd.com/document/429174957/SECCION-ES-700-Y-800-segunda-parte-mod-2013-NOV-15-pdf>
- Humboldt. (2012). Catálogo de equipos Humboldt español. Soportedavi. EE.UU. recuperado de <https://www.yumpu.com/es/document/view/59430583/catalogo-humboldt-espanol>



- Marchan R. (2005). Métodos de rehabilitación de pavimentos. México. Recuperado de <https://www.coursehero.com/file/18009193/168-2005-ESIA-ZAC-SUPERIOR-marchan-moreno/>
- Rengifo K. (2014). Diseño de los pavimentos de la nueva carretera Panamericana Norte en el tramo de Huacho a Pativilca kilómetros del 188 a 189. Perú. Recuperado de <https://www.coursehero.com/file/47204959/RENGIFO-KIMIKO-PAVIMENTOS-CARRETERA-HUACHO-PATIVILCApdf/>
- Ulloa A. (2011). Guía de pruebas de laboratorio y muestreo en campo para la verificación de la calidad en materiales de un pavimento asfáltico. Costa Rica. Recuperado de <http://repositorio.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/13371/8393-11762-1SM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- MOPC. (2009). Manual de carreteras Normas para materiales y ensayos de materiales tomo 6-vol 2. Paraguay. Recuperado. <https://www.mopc.gov.py/userfiles/files/asfalto.pdf>
- De la Cruz R. (2010). Diseño y evaluación de un afirmado estabilizado con emulsión asfáltica, aplicación carretera Cañete – Chupaca tesis de grado. Perú. Recuperado de http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/457/1/delacruz_sd.pdf
- Rolando F. (2002). Estudio comparativo entre mezclas asfálticas con diluido RC-250 y emulsión tesis de grado Universidad de Piura Departamento de Ingeniería Civil. Perú. Recuperado. https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1334/ICI_076.pdf
- Zúñiga R, (2005). Estudio y evaluación preliminar de la mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA) mediante un tramo de prueba Universidad Andrés Bello. Chile. Recuperado de http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/Documents/investigacion/inv10_StoneMasticAsphalt.pdf
- Torres A. (2010). Propuesta metodológica para la evaluación y mejoramiento, con emulsión asfáltica y/o cemento, de los materiales granulares existentes en las vías terciarias Universidad Nacional de Colombia Bogotá. Colombia. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/a574/78be453db0c94a66c3b33490cb4b52c2c00e.pdf>
- Ontiveros L. (2013). Evaluación de la adherencia entre capas de pavimento empleando diferentes emulsiones asfálticas, Universidad Autónoma de México. México. Recuperado. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/6252/1/tesis.pdf.pdf>



- Villa V. (2007). Reciclado in situ en frío de pavimentos empleando emulsiones asfálticas aplicación Colegio FAP Manuel Polo Jiménez , Urb. San Gabino – Santiago de Surco tesis de grado Universidad Peruana de Ciencias aplicadas sede Lima. Perú. Recuperado de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/581465/Tesis%20Villa%20Cham%C3%A1n.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Paniagua R. (2013). Estudio experimental sobre métodos de ensayo de laboratorio en mezclas de pavimentos reciclados con asfalto espumado tesis de grado Universidad Católica de Chile. Chile Recuperado de <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/2938>
- Castañeda C. (2011). Aplicación del método Marshall y granulometría Superpave en el diseño de mezcla asfáltica templada con emulsión asfáltica tesis Universidad de El Salvador. El Salvador. Recuperado de <http://ri.ues.edu.sv/2079/>
- Ramos B. (2013). Propuesta de diseño de mezcla asfáltica en frío gradación densa como alternativa para el mantenimiento de pavimentos flexibles investigación monográfica. Nicaragua. Recuperado de <http://repositorio.uca.edu.ni/518/1/UCANI3500.PDF>
- Vallejo D. (2011). Diseño de mezclas asfálticas en frío empleando emulsión asfáltica y su evaluación del daño por humedad utilizando fillers comerciales tesis de grado UNI. Perú. file:///C:/Users/usuario/Downloads/vallejo_rd.pdf