

EFFECTO DEL TIPO DE LLENANTE EN LA ADHESIVIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL MÉTODO UCL

Claudia Stephany Aguilar Balderrama¹, Jahel Sarvia Ledezma Pérez²,
Sheila Tatiana Góngora Ayala³, Alexander Villa Orellana⁴,

¹ Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, caguilar25@est.fcyt.umss.edu.bo

² Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, sarvialedezma@fcyt.umss.edu.bo

³ Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia,
sgongora01@est.fcyt.umss.edu.bo

⁴ Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, avilla21@est.fcyt.umss.edu.bo

Resumen

En una mezcla asfáltica el llenante proporciona, entre otras características, el mejoramiento de las propiedades del medio bituminoso a través del mástico, incrementando la cohesión y adhesividad del conjunto. De esta forma, el presente trabajo analiza el efecto de diferentes tipos de llenantes: yeso, cal y llenante mineral en relación al parámetro de cohesión y adhesividad aplicando el método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL). Para esto, fue realizada la determinación de la concentración crítica (Cs) y la obtención de la concentración volumétrica (Cv) de los llenantes evaluados. Se elaboraron cuerpos de prueba donde se fue variando la relación Cv/Cs en un rango de 0.6 a 1.2, los cuales fueron acondicionados térmicamente para luego ser evaluados mediante el método UCL. De esta forma, la obtención de la relación de concentración óptima de cada tipo de llenante fue determinada mediante la selección de aquellos cuerpos de prueba que presentaron menor desgaste en el ensayo cántabro. Finalmente, fue evaluada la fuerza de tracción y determinada la energía convencional que presenta cada tipo de mástico a través del ensayo de fuerza ductilidad.

Palabras Clave: Adherencia, Cohesión, Llenantes, Concentración crítica, UCL.

1 Introducción

La adhesividad es una de las principales propiedades de diseño que debe presentar una mezcla asfáltica para su adecuado desempeño ante la presencia de agua. Una deficiente interacción entre pétreo-cemento asfáltico llega a incidir directamente en la reducción de la vida útil de los pavimentos. Sus consecuencias abarcan tanto la disminución de las condiciones de confort y seguridad como el perjuicio económico que significa realizar tareas frecuentes de mantenimiento y rehabilitación [1]. El cemento asfáltico y el llenante son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total. [2]

Por dicha razón se realizaron numerosos estudios analizando la mejora de esta propiedad, como ser la aplicación de aditivos en el cemento asfáltico para mejorar la interacción con el pétreo; o la incorporación de diferentes tipos de llenantes a las mezclas asfálticas para optimizar las propiedades del material bituminoso. Este último modifica la viscosidad y consistencia del cemento asfáltico mediante la formación de

una lámina de mástico de mayor espesor que recubre a los agregados, mejorando, entre otras características, la cohesión y adhesividad del conjunto [3].

El llenante como componente de la mezcla asfáltica, juega un papel importante en la determinación de las propiedades y el comportamiento de las mismas. Por una parte, sirve de material inerte para rellenar los huecos presentes en la mezcla, mientras que por otro lado, dada su finura y las características superficiales que presenta, participa como material activo en las propiedades físico-químicas entre el llenante y el cemento asfáltico. [4]

De acuerdo al contexto anterior, el presente trabajo realiza el estudio del efecto del tipo de llenante en la adhesividad en mezclas asfálticas aplicando el método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL), el cual permite evaluar los cementos asfálticos a partir de las propiedades cohesivas que este proporciona a la mezcla, determinando la susceptibilidad térmica, la adherencia agregado-cemento asfáltico ante la acción del agua, la resistencia al envejecimiento y las características del llenante. Así también, se evalúa la energía de cohesión mediante el ensayo fuerza ductilidad.

2 Evaluación de la acción del llenante en las mezclas asfálticas

El pavimento tiene la capacidad de deformarse sin romperse al absorber esfuerzos relativamente elevados y repetidos; éste es el principio de funcionamiento de los pavimentos flexibles. La medida esencial para tal comportamiento es la resistencia al corte, con sus dos componentes: la fricción y la cohesión. [5] El factor friccional se analiza generalizando los postulados de la mecánica de suelos al estudio de las mezclas asfálticas, puesto que los agregados conforman una estructura granular; en cambio, la cohesión debe evaluarse a partir de las propiedades reológicas del medio continuo presente en la mezcla, el sistema llenante-cemento asfáltico, que define su comportamiento ante las sollicitaciones deformantes. [5]

Por tales razones, es más apropiado pensar en las cualidades que el mástico proporciona a la mezcla, en lugar de considerar aisladamente al cemento asfáltico. La incorporación de llenantes a las mezclas permite mejorar las propiedades del medio continuo bituminoso: espesar el cemento asfáltico con el fin de modificar su fluir viscoso, mejorar la adherencia y proveer de un mayor espesor a la lámina que recubre a los agregados, permitiendo retardar el envejecimiento [6, 7]

La falta de ensayos que permiten una adecuada valoración del efecto que el llenante confiere al mástico, y en particular en lo que se refiere a la cohesión y adhesividad que éste proporciona a la mezcla bituminosa, da lugar a que los llenantes no sean empleados de forma óptima o incluso correcta en muchos casos.

En este sentido, la metodología que permite caracterizar a los cementos asfálticos, y el sistema llenante/cemento asfáltico cuando se encuentran aglomerando los agregados en una mezcla asfáltica, es el denominado "Método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL)". [5]

2.1 Método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL)

El método UCL se desarrolló pensando en la caracterización de los cementos asfálticos desde el punto de vista de su uso en carreteras. En este sentido, no se tuvo en cuenta su consistencia, composición y viscosidad, sino aquellas características que se relacionan con las propiedades que debe proporcionar el cemento asfáltico a la

mezcla para su adecuado comportamiento en el revestimiento, es decir, sus propiedades funcionales.

Estas propiedades funcionales que los cementos asfálticos deben aportar al comportamiento de las mezclas bituminosas son las siguientes: [8]

- Cohesión. El poder aglomerante que proporciona a la mezcla, entendida ésta como el trabajo necesario para separar las partículas que une y no como la fuerza máxima aplicada.
- Susceptibilidad térmica. El comportamiento mecánico de los cementos asfálticos varía con la temperatura y el tiempo de aplicación de carga. A temperaturas altas, o tiempos largos de aplicación de carga, el cemento asfáltico puede fluir, es inconsistente, y la mezcla se deforma. A temperaturas bajas, o tiempos cortos de aplicación de cargas el cemento asfáltico se fragiliza y la mezcla pierde tenacidad.
- Adhesividad. La acción del agua produce un efecto de desprendimiento, siendo muy importante conocer la adhesión del cemento asfáltico al agregado en presencia de agua (adhesividad).
- Durabilidad. Por acción del aire, del calor y de los rayos ultravioletas se va produciendo una oxidación y envejecimiento del cemento asfáltico, haciéndose éste cada vez más duro y frágil.

Para la medida de estas propiedades el método UCL evalúa las propiedades funcionales del cemento asfáltico a partir de la determinación del grado de cohesión que proporciona a una mezcla patrón y de la observación de cómo esta propiedad varía con la temperatura, la acción del agua y el envejecimiento a través del ensayo Cántabro. [8]

Se dio a este procedimiento el nombre de universal por ser aplicable a cualquier cemento asfáltico. El principio del mismo es comparar directamente las respuestas de estos materiales como parte integrante de una mezcla asfáltica, exaltando sus diferencias relativas y las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos. [3]

2.2 Ensayo fuerza ductilidad

El ensayo fuerza ductilidad determina las propiedades a tracción de cementos asfálticos sobre probetas de ensayo especialmente moldeadas, bajo unas condiciones definidas de temperatura y velocidad de elongación [9]. Así también, permite conocer la energía por unidad de superficie de los cementos asfálticos en base a su resistencia a la tracción según normativa europea [10] [11].

Los resultados del ensayo se utilizan para evaluar las características de cohesión de cementos asfálticos.

3 Metodología

La metodología de investigación consta del desarrollo de ensayos de laboratorio para el análisis del comportamiento de una mezcla patrón elaborada con diferentes tipos y proporciones de llenantes. A través de la cual se pretendió profundizar el conocimiento acerca de los beneficios de la incorporación de llenantes en la adhesividad y cohesión de las mezclas asfáltica.

Variando las temperaturas y condición del ensayo además del tipo y contenido del llenante, se llevó a cabo el desarrollo experimental empleando el método UCL, mediante la aplicación del ensayo cántabro, en el cual se obtuvieron las

correspondientes curvas de comparación para la condición seca y húmeda. Los llenantes fueron utilizados en proporciones variables respecto de sus correspondientes concentraciones críticas que es aquella en la cual el mástico comienza a rigidizarse.

Esta concentración corresponde a una dispersión de las partículas de llenante en el cemento asfáltico en el estado más suelto posible, pero con contacto entre ellas, es decir cuando el esfuerzo aplicado es consumido en la deformación viscosa del medio continuo bituminoso y la resistencia friccional entre las partículas tiende a un mínimo [3]. Por ser un ensayo de sedimentación, se llamó Cs (concentración del sedimento) al valor obtenido, aunque por tratarse de un valor crítico para asegurar un comportamiento viscoso del mástico (condición necesaria para que la mezcla tenga capacidad de deformación sin fractura), se le conoce como “Concentración Crítica” (Norma IRAM 1542) [5] y cuyo valor es calculado mediante la ecuación (1)

$$C_s = \frac{m}{V - \rho} \quad (1)$$

donde: Cs es la concentración crítica, m es la masa de la muestra del llenante ensayado, ρ es la densidad de llenante mineral y V es el volumen asentado del llenante en kerosene anhidrido después de 24 hr.

Al adicionar llenantes a las mezclas asfálticas se produce un incremento progresivo de la viscosidad del mástico, que es función de la concentración volumétrica del llenante en el mismo y es calculado mediante la ecuación (2)

$$C_v = \frac{\text{Vol.llenante}}{\text{Vol.llenante} + \text{Vol.ligante}} = \frac{\frac{P_f}{\rho_f}}{\frac{P_f}{\rho_f} + \frac{P_b}{\rho_b}} \quad (2)$$

donde: Pf es el porcentaje en peso del llenante, ρ_f es densidad del llenante mineral, Pb es el porcentaje en peso de cemento asfáltico y ρ_b es la densidad de cemento asfáltico.

Para la evaluación de la energía de cohesión que el mástico proporciona a la mezcla se lo realizó a través del ensayo fuerza ductilidad, el cual se basa en el cálculo de la energía de deformación. Se ensayaron tres probetas tipo, para cada uno de los llenantes que modifica el cemento asfáltico, a una acción de tracción en el ductilometro a velocidad constante de 50 mm/min hasta una elongación final de 400 mm, el cual se lo realiza bajo un baño de agua. Se lleva a acabo a 5 ° C, pero también se lo pude realizar a diferentes temperaturas.

3.1 Materiales empleados

Los cuerpos de prueba se elaboraron siguiendo la granulometría patrón que se muestra en la Tabla 1. con una masa total de la briqueta de 1000 gr y un porcentaje de cemento asfáltico constante de 4.5% como se muestra en la Tabla 2. con una energía de compactación de 50 golpes por cara.

Tabla 1. Granulometría patrón

Tamiz	Pasa (%)
N°. 4	100
N°. 8	20
N°. 30	0

Tabla 2. Valores para a dosificación

Variable	Características	Valor
Agregados	Mezcla UCL con granulometría según Tabla 1.	1000 gr distribuidos según granulometría y % de llenante
Llenantes	llenante de recuperación, cal y yeso	Cv/Cs =0.6 Cv/Cs =0.8 Cv/Cs =1.0 Cv/Cs =1.2 % de llenante dentro los 1000 gr
Cemento asfáltico	Clasificación por penetración 85/100	45 gr (4.5%)

Con el objetivo de evaluar exclusivamente las propiedades que el mástico confiere a la mezcla en relación a la adhesividad y cohesión, tanto en condiciones normales como bajo efecto del agua se efectuaron pruebas a temperaturas de 25 y 60°C, con un cemento asfáltico convencional con clasificación por penetración 85/100, cuyas características se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Características del cemento asfáltico

Ensayo	Cemento asfáltico 85-100
Penetración a 25°C, 100 gr, mm. (ASTM D-5 AASHTO T-49)	85
Ensayo de ductilidad a 25°C, cm. (ASTM D-113 AASHTO T-51)	107
Peso específico, gr/cm ³ . (ASTM D-71 AASHTO T-43)	1.019

Según especificaciones técnicas de la Administradora Boliviana de Carreteras [12] se define al polvo mineral fino o llenante como el material que pasa por el tamiz No.200. Los llenantes de estudio corresponden a cal hidratada, yeso y llenante de recuperación cuyas características se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Características de los llenantes empleados

Ensayo	Cal hidratada	Yeso	Llenante de recuperación
Densidad de Bulk en kerosene (g/ml) (INV. E – 225 – 13)	0.4	0.5	0.8
Densidad del llenante (g/cm ³) (IRAM 1542-92)	2.273	2.674	2.778

Concentración crítica del filler (Cs) (IRAM 1542)	0.21	0.23	0.36
--	------	------	------

4 Resultados

4.1 Ensayo cántabro para la medida de la adhesividad del mástico

Los resultados obtenidos mediante el ensayo Cántabro de pérdidas por desgaste se presentan en la Tabla 5. respecto a cada tipo de llenante empleado.

Tabla 5. Resultados ensayo cántabro

Tipo de llenante	Cv/Cs	% Pérdidas por desgaste				
		0.00%	0.60%	0.80%	1.00%	1.20%
Yeso	Condición Seca	19.6	12.0	11.4	12.2	12.2
	Condición Húmeda	48.8	54.5	57.0	61.2	78.6
Cal hidratada	Condición Seca	19.6	16.0	19.2	26.4	40.5
	Condición Húmeda	48.8	59.7	57.6	65.2	68.9
Llenante de recuperación	Condición Seca	19.6	14.7	14.0	15.6	11.1
	Condición Húmeda	48.8	58.3	56.5	53.0	51.8

Las curvas de comparación en estado seco y húmedo que reflejan la susceptibilidad térmica del mástico con incorporación de yeso, cal y llenante de recuperación, evaluado a partir de sus propiedades adhesivas y cohesivas por el método UCL, se presentan en la Figura 1, 2 y 3, respectivamente.

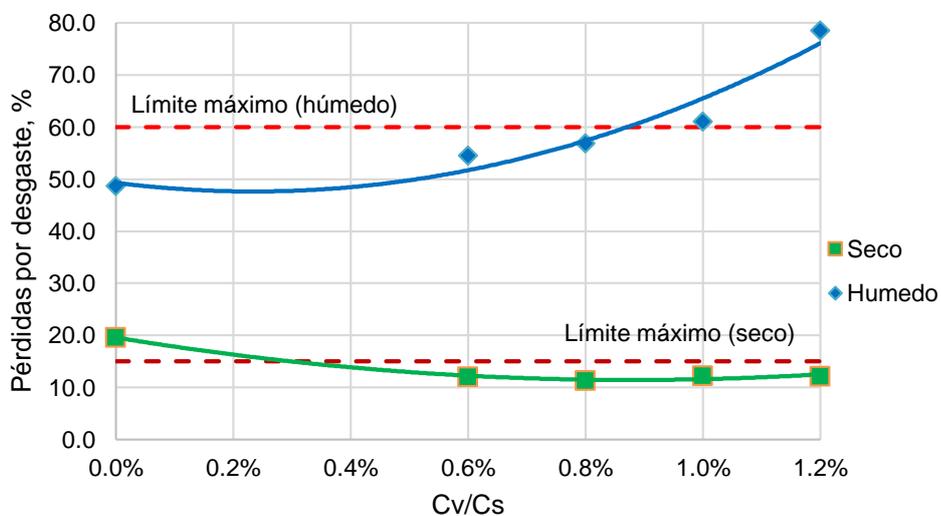


Figura 1. Resultado de ensayo cántabro condición seca y húmeda, llenante yeso

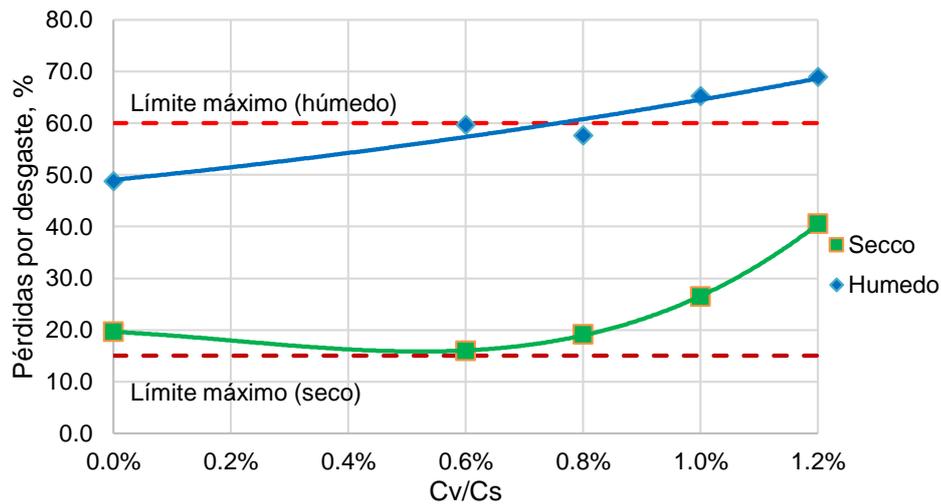


Figura 2. Resultado de ensayo cántabro condiciones seca y húmeda, llenante cal

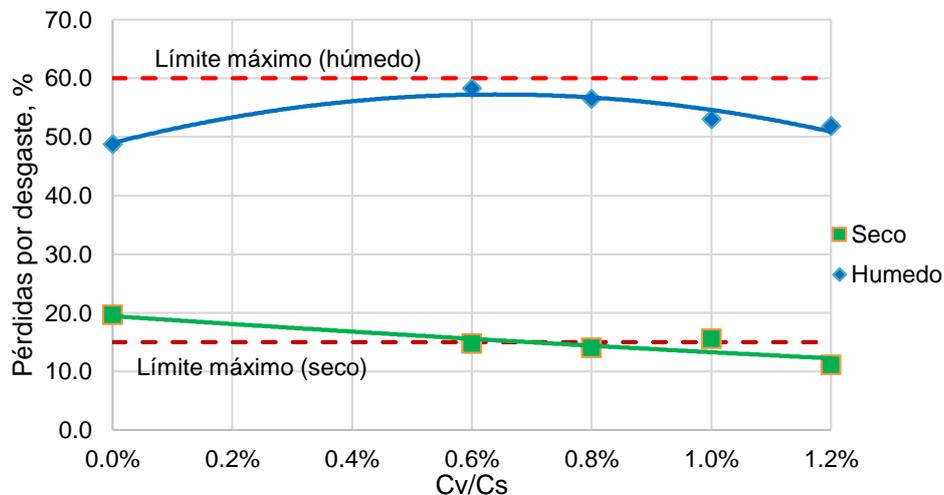


Figura 3. Resultado de ensayo cántabro condiciones seco y húmedo, llenante de recuperación

Una vez aplicado el ensayo cántabro a los cuerpos de prueba se procedió a la determinación del porcentaje óptimo de los llenantes de estudio.

4.1.1 Selección del porcentaje óptimo del llenante mineral

Para la determinación del porcentaje óptimo del llenante mineral se adoptaron tres parámetros para el que control de los resultados obtenidos los cuales se describen en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros de selección para porcentaje óptimo del llenante

Parámetros	Requerimiento para selección
Vacios en la mezcla, %	> 20
Pérdida por desgaste condición seca, %	< 15
Pérdida por desgaste condición húmeda, %	< 60

Cabe resaltar que, en el caso de que varios valores del porcentaje del llenante cumplan con los parámetros admisibles, fue seleccionado el que presente una menor relación Cv/Cs o el que manifieste menores porcentajes de pérdidas por desgaste tanto por vía seca como húmeda.

Analizando los resultados obtenidos a partir del ensayo Cántabro (Tabla 5.) por vía seca, se observa que las menores pérdidas para los llenantes de estudio se encuentran alrededor de las mismas relaciones Cv/Cs, a diferencia de los porcentajes de pérdidas en el ensayo por vía húmeda, los cuales se muestran dispersos.

Tomando en cuenta lo mencionado se procedió a la elección del porcentaje óptimo de cada llenante en la mezcla. Para el llenante yeso se observa, en la Tabla 7., que el porcentaje de llenante en función a la relación Cv/Cs = 0.6% cumple con los parámetros admisibles como también el Cv/Cs = 0.8%, pero este último tiende a ser más susceptible en cuanto a pérdidas por desgaste mediante vía húmeda se refiere, por lo cual se definió como porcentaje óptimo el correspondiente a la relación Cv/Cs = 0.6% es decir del 1,89%.

Tabla 7. Selección del porcentaje óptimo del llenante yeso

Cuadro de selección del porcentaje óptimo del llenante					
Parámetro	Cv/Cs =0%	Cv/Cs =0.6%	Cv/Cs =0.8%	Cv/Cs =1.0%	Cv/Cs =1.2%
Llenante mineral, %	0.00	1.89	2.66	3.53	4.50
Vacíos en la mezcla, %	26.8	25.8	25.1	24.1	23.6
Pérdida por desgaste condición seco, %	19.6	12.0	11.4	12.2	12.2
Pérdida por desgaste condición húmedo, %	48.8	54.5	57.0	61.2	78.6

De la misma manera, en el caso del llenante cal se observa, en la Tabla 8., que el valor del porcentaje de llenante en función a la relación Cv/Cs=0.6% y Cv/Cs=0.8% cumplen con dos de los parámetros admisibles, vacíos en la mezcla y pérdidas por desgaste condición húmeda. En este caso se observa que a medida que se incrementa la relación Cv/Cs, éste presentó mayores pérdida tanto por vía seca como húmeda. En esta situación se tomó en consideración el de menor porcentaje de pérdida por desgaste en condición seca para la elección del porcentaje óptimo, siendo este 1.45% lo que corresponde a la relación Cv/Cs=0.6%.

Tabla 8. Selección del porcentaje óptimo del llenante cal

Cuadro de selección del porcentaje óptimo del llenante					
Parámetro	Cv/Cs =0%	Cv/Cs =0.6%	Cv/Cs =0.8%	Cv/Cs =1.0%	Cv/Cs =1.2%
Llenante mineral, %	0.00	1.45	2.03	2.67	3.38
Vacíos en la mezcla, %	26.8	26.6	25.5	25.3	25.1
Pérdida por desgaste condición seco, %	19.6	16.0	19.2	26.4	40.5
Pérdida por desgaste condición húmedo, %	48.8	59.7	57.6	65.2	68.9

Por último para el llenante de recuperación, la presencia del éste en la mezcla proporciona mejoras en la disminución de pérdidas por desgaste en el ensayo cántabro. En la Tabla 9. se observa que en condiciones húmedas cumple con el parámetro máximo admisible, sin embargo en condición seca el valor que corresponde a la relación $Cv/Cs=1.0\%$ no cumple con el parámetro admisible establecido. Esto pudo deberse a las variaciones en la elaboración de los cuerpos de prueba o a su relación de concentración crítica vs volumétrica.

Tabla 9. Selección del porcentaje óptimo del llenante de recuperación

Cuadro de selección del porcentaje óptimo del llenante					
Parámetro	$Cv/Cs = 0\%$	$Cv/Cs = 0.6\%$	$Cv/Cs = 0.8\%$	$Cv/Cs = 1.0\%$	$Cv/Cs = 1.2\%$
Llenante mineral, %	0.00	3.38	4.96	6.90	9.33
Vacíos en la mezcla, %	26.8	25.7	24.9	23.9	21.3
Pérdida por desgaste condición seco, %	19.6	14.7	14.0	15.6	11.1
Pérdida por desgaste condición húmedo, %	48.8	58.3	56.5	53.0	51.8

Para la selección de porcentaje óptimo se tomó en cuenta las pérdidas por desgaste menores tanto en condición húmeda como seca, permitiendo elegir entre la relación $Cv/Cs=0.8\%$ y $Cv/Cs=1.2\%$. Como parte del proceso de selección se consideró el valor que tenga la relación Cv/Cs menor, proporcionándonos el porcentaje óptimo del llenante de recuperación un valor de 4.96% el cual corresponde a la relación $Cv/Cs=0.8\%$.

4.2 Ensayo de Fuerza ductilidad

Dado que a la temperatura de prueba de 5 y 10°C las probetas presentaron una fractura frágil, es decir en la prueba fuerza-ductilidad la muestra se fracturo antes de los 400 mm, el ensayo fue realizado a una temperatura de 15°C. En la Tabla 10. se presenta los resultados obtenidos del cemento asfáltico modificado con los llenantes de estudio y el cemento asfáltico convencional sin modificación

Tabla 10. Resultados de ensayo fuerza ductilidad

Nombre de muestra	Velocidad [mm/min]	Temp. [°C]	Max Carga [N]	Max L. Def. [mm]	Energía cohesión [Nm/cm ²]	Carga de Rotura [N]	Rotura Def. [mm]
Mástico_LR	50	15	27.4	4.02	0	0.02	257.23
Mástico_LC	50	15	19.3	7.00	1.1	0.01	400
Mástico_LY	50	15	16.1	7.09	1.0	0.08	400
CA_85/100	50	15	6.6	11.19	0.47	0.01	400

El cemento asfáltico convencional dio como resultado una energía de cohesión de 0.47 Nm/cm² siendo ésta bastante baja en comparación del mástico formado con cal de 1.1 Nm/cm² y con yeso de 1.0 Nm/cm². Los resultados se representan en la Figura 4. donde se muestra la variación de la fuerza de tracción respecto a la elongación de la probeta.

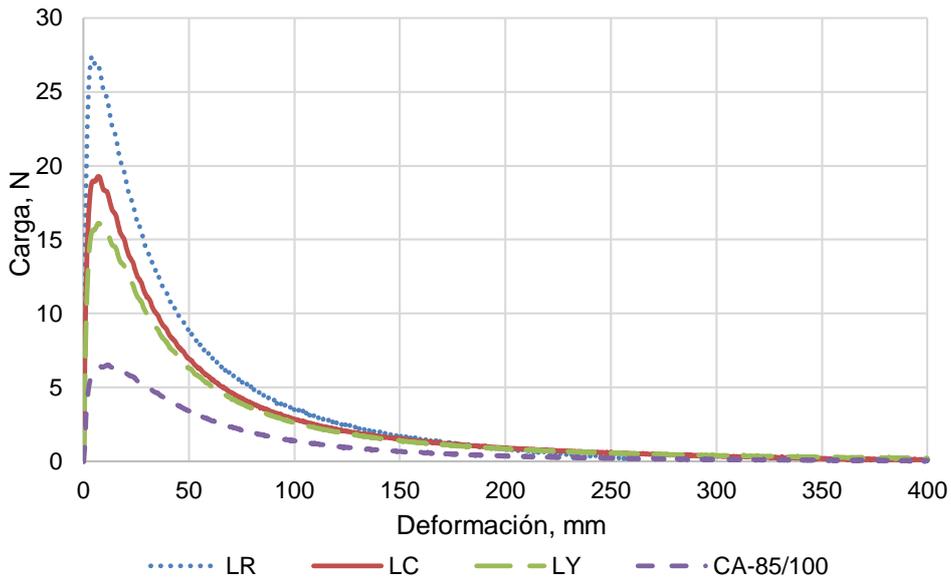


Figura 4. Resultados del ensayo fuerza-ductilidad a 15°C

Se observa que el mástico formado con llenante de recuperación presenta de nuevo una fractura frágil a los 15°C, evidenciando la falta de una energía de cohesión a esta temperatura, debido a esto, únicamente la muestra con el llenante de recuperación se lo realizo nuevamente pero esta vez una temperatura de 20°C dando como resultado los datos que se muestran en la Tabla 11. y su representación gráfica en la Figura 5.

Tabla 11. Resultados de ensayo fuerza ductilidad

Nombre de muestra	Velocidad [mm/min]	Temp. [°C]	Carga Max [N]	L. Def Max. [mm]	Energía cohesión [Nm/cm ²]	Carga de Rotura [N]	Rotura Def. [mm]
Mástico_LR	50	20	11.7	6.79	0.66	0.02	400

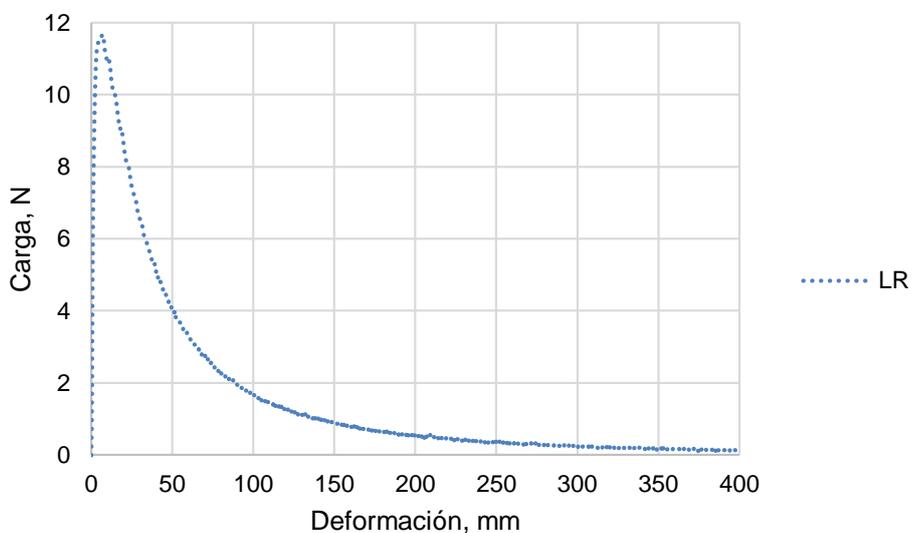


Figura 5. Resultado del ensayo fuerza-ductilidad a 20°C para el llenante de recuperación

A esta temperatura obtuvo una energía de cohesión del 0.66 Nm/cm² siendo este valor levemente superior al que se generó con el cemento asfáltico convencional. Cabe mencionar que la temperatura influye de manera inversa en este valor, debido a esto no llega a existir un punto de comparación con la modificación de este llenante de recuperación en el cemento asfáltico respecto a los demás llenantes que se ensayaron a los 15°C.

5 Conclusiones

A través de los datos obtenidos por medio del Método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL), elegido para la determinación del porcentaje óptimo del llenante, se concluyó que para los llenantes estudiados se observa una relación óptima entre la concentración volumétrica llenante-cemento asfáltico y el valor de su concentración crítica comprendida dentro el rango Cv/Cs = 0.6 y 0.8%. Los valores por debajo de este rango no permiten al llenante proporcionar su potencial adhesivo.

Se determinó el porcentaje óptimo para el llenante yeso y cal el cual corresponde al valor de la relación Cv/Cs = 0.6%, siendo este de 1.89% y 1.45% respectivamente. En cuanto al llenante de recuperación su valor óptimo se encuentra en la relación Cv/Cs=0.8%, lo que corresponde a 4.96% siendo este el que presentó mejores resultados tanto en condición húmeda como en seca del ensayo cántabro.

Respecto a los valores obtenidos evidenció que la adhesividad de las mezclas bajo la acción del agua se reduce considerablemente, en consecuencia, la cohesión también se ve afectada, disminuyendo su valor y provocando desprendimientos.

A través del ensayo fuerza ductilidad se observa que la energía de cohesión que aporta el cemento asfáltico a la mezcla es bajo a comparación del que se produce cuando se incorpora el llenante cal o yeso, generando un aumento aproximadamente del 130% en la energía de cohesión dando como resultados del 1.1 y 1.0 Nm/cm² respectivamente.

Debido a que el mástico formado con llenante de recuperación presentó una fractura frágil a la temperatura de ensayo de 15°C con el que se realizaron los demás llenantes, no registra un punto de comparación con ellos, traduciendo esto a que el llenante de recuperación aportó mayor rigidez a la mezcla.

6 Referencias

- [1] Urrego, E.C.; Ruiz, C.C. Determinación de la adherencia en mezclas asfálticas elaboradas con asfaltos convencionales y materiales de Peña y Río. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia; 2016.
- [2] Valdés, G. *et al.* Matriz árido-ligante: factores implicados en la capacidad adhesiva y cohesiva del ligante asfáltico. Revista Ingeniería De Obras Civiles, v. 5, n. 0, 12/09 2015.
- [3] Sánchez, A. M. Efecto de la concentración volumétrica filler/betún en la cohesión y adhesividad del mástico. España: Universidad Politécnica de Cataluña. 2007.
- [4] Ruiz, C. L. "Concentración crítica" de filler, su origen y significado en la dosificación de mezclas asfálticas. Provincia De Buenos Aires: Ministerio de Obras Publicas Dirección de Vialidad, 1960.
- [5] Bianchetto, H. D.; Miro R. R.; Perez J. F. Resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en caliente: Beneficios y limitaciones de la incorporación de fílleres comerciales. Primera parte: Estudios en base al método UCL. Argentina: Universidad Nacional de la Plata Argentina 2006.

- [6] Martínez, R. Tipos de Fallas en Pavimento Flexible. 2014. Disponible en: < <http://fallasenpavimentoflexible.blogspot.com/2014/05/tipos-de-fallas-en-pavimento-flexible.html> >. Acceso en: 10/12/17.
- [7] Amaya, W.; Soto, J. Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla de asfalto discontinua con adición de cemento portland. Colombia: Universidad de Cartagena 2015.
- [8] Miro, J. R. Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo cántabro. España: Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos 1994.
- [9] Eurobitume. Fuerza Ductilidad. Betunes y ligantes bituminosos: Determinación de las propiedades de tracción de betunes modificados por el método de fuerza-ductilidad (EN 13589), 2018.
- [10] Normativa Europea. Betunes y ligantes bituminosos - Determinación de las propiedades de tracción del betún modificado por el método de fuerza-ductilidad (EN 13589:06), 2008.
- [11] Normativa Europea. Betunes y ligantes bituminosos - Determinación del trabajo realizado (EN 13703), 2003.
- [12] ABC. Manual de Especificaciones Técnicas Generales de Construcción. Bolivia: Administradora Boliviana de Carreteras, 2011.