

|   |   |                               |                            |                      |
|---|---|-------------------------------|----------------------------|----------------------|
|  | <b>UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA</b>             |                               |                            |                      |
|   | Documento<br><b>FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO</b> | Código<br><b>F-AC-DBL-007</b> | Fecha<br><b>08-07-2021</b> | Revisión<br><b>B</b> |
| Dependencia<br><b>DIVISIÓN DE BIBLIOTECA</b>                                      | Aprobado<br><b>SUBDIRECTOR ACADEMICO</b>                          |                               | Pág.<br><b>i(93)</b>       |                      |

## RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

|  |   |                         |                  |
|--|---|-------------------------|------------------|
| <b>AUTORES</b>   | Camilo Andrés Clavijo Chogo<br>Cristian Danilo Sánchez Roperero   |                         |                  |
| <b>FACULTAD</b>  | <b>Ingenierías</b>  |                         |                  |
| <b>PLAN DE ESTUDIOS</b>  | <b>Ingeniería Civil</b>   |                         |                  |
| <b>DIRECTOR</b>  | Katerine Carreño García   |                         |                  |
| <b>TÍTULO DE LA TESIS</b>  | Comparación de las propiedades físico-mecánicas, químicas y reológicas del cemento asfáltico con adición de distintos materiales      |                         |                  |
| <b>TITULO EN INGLES</b>  | Comparison of the physical-mechanical, chemical and rheological properties of asphalt cement with the addition of different materials |                         |                  |
| <b>RESUMEN</b><br>(70 palabras)  |   |                         |                  |
| <p>Monografía de compilación referente a las propiedades físico-mecánicas, químicas y reológicas obtenidas en el cemento asfáltico al adicionar materiales como: polímeros, caucho reciclado, arcilla calcinada, cerámica y almidón de yuca.</p> <p>El desarrollo de esta monografía permite la difusión de materiales alternativos en el cemento asfáltico, en pro de las nuevas exigencias medioambientales.</p> |   |                         |                  |
| <b>RESUMEN EN INGLES</b>   |   |                         |                  |
| <p>Compilation monograph referring to the physical-mechanical, chemical and rheological properties obtained in asphalt cement by adding materials such as: polymers, recycled rubber, calcined clay, ceramics and cassava starch.</p> <p>The development of this monograph allows the diffusion of alternative materials in asphalt cement, in favor of new environmental requirements.</p>                        |   |                         |                  |
| <b>PALABRAS CLAVES</b>   | Cemento asfáltico, polímeros, caucho reciclado, arcilla calcinada, cerámica, y almidón de yuca.                                       |                         |                  |
| <b>PALABRAS CLAVES EN INGLES</b>   | Asphalt cement, polymers, recycled rubber, calcined clay, ceramics, and cassava starch.   |                         |                  |
| <b>CARACTERÍSTICAS</b>   |   |                         |                  |
| <b>PÁGINAS: 93</b>   | <b>PLANOS: 0</b>  | <b>ILUSTRACIONES: 0</b> | <b>CD-ROM: 1</b> |



COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS, QUÍMICAS Y  
REOLÓGICAS DEL CEMENTO ASFÁLTICO CON ADICIÓN DE DISTINTOS  
MATERIALES

Autores

CAMILO ANDRES CLAVIJO CHOGO

CRISTIAN DANILO SÁNCHEZ ROPERO

Trabajo de grado modalidad monografía para optar el título de Ingeniero Civil

Director

MSc. KATERINE CARREÑO GARCÍA

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA CIVIL

Ocaña, Colombia

Agosto, 2021

### **Nota**

El Comité Curricular del Plan de Estudios de Ingeniería Civil, según consta en el Acta No. 0040 de fecha 04 de noviembre de 2020, acordó asignar como jurados de la presente monografía a los docentes **Leandro Ovallos Manosalva** y **Thomas Edison Guerrero Barbosa**.

## Agradecimientos

Los autores de esta monografía expresan su cordial agradecimiento al MSc. Katerine Carreño García, por la dirección del trabajo, su apoyo y colaboración permanente durante toda la investigación.

Así mismo agradecen a todas aquellas personas que de una u otra manera aportaron en este trabajo: amigos, compañeros y docentes, así como aquellos profesionales que brindaron su ayuda, especialmente al Ing. Luis Miguel Duarte Vergara por su acompañamiento y colaboración en todas las etapas del proyecto.

Finalmente agradecen a la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña por brindar los conocimientos y las herramientas necesarias para desarrollar este trabajo.

*Camilo Andrés Clavijo Chogó*

*Cristian Danilo Sánchez Roperó*

## Dedicatoria

Le doy gracias a Dios, y a sus continuas bendiciones, que permitieron cumplir un objetivo más, el desarrollar una carrera de muchas exigencias. Además, le quiero dar las gracias a mi familia por el apoyo que me ofrecieron en este periodo, en especial a mi madre, Edith Chogó, por su siempre optimista y razonables concejos que me animaron, a mis tíos por creer en mí y mantener su apoyo que constantes.

Con mucha alegría dedico a esta tesis a mi familia que es la base de mi fuerza y pilares en mi progreso, por ello en esta que es la culminación de todos mis esfuerzos universitarios, les dedico este trabajo, ya que sin su compañía nunca se habría realizado.

Además, agradezco a todos los docentes que de una u otra manera dejaron una enseñanza en mí, y de manera especial a la MSc. Katerine Carreño García, por su incansable apoyo para este trabajo el cual fue de mucha ayuda.

*Camilo Andrés Clavijo Chogó*

## **Dedicatoria**

Para mis padres.

*Cristian Danilo Sánchez Roperó*

## Tabla de contenido

|  |     |
|--|-----|
| Introducción.....  | xvi |
| Capítulo 1. Propiedades físicas y químicas del cemento asfáltico ..... | 1   |
| 1.1 Materiales adicionados al cemento asfáltico .....                  | 1   |
| 1.1.1 Polímeros.....   | 2   |
| 1.1.2 Caucho reciclado .....   | 3   |
| 1.1.3 Arcilla calcinada.....   | 4   |
| 1.1.4 Cerámica.....  | 5   |
| 1.1.5 Almidón de yuca.....   | 6   |
| 1.2 Estudios recopilados.....  | 7   |
| 1.3 Propiedades físicas y químicas del cemento asfáltico.....          | 12  |
| 1.3.1 Gravedad específica máxima.....                                  | 12  |
| 1.3.2 Punto de ignición.....   | 14  |
| Capítulo 2. Propiedades reológicas del cemento asfáltico .....         | 17  |
| 2.1 Penetración .....  | 17  |
| 2.2 Índice de penetración.....   | 25  |
| 2.3 Ductilidad .....   | 31  |
| 2.4 Punto de ablandamiento .....                                       | 35  |
| 2.5 Viscosidad .....   | 42  |
| Capítulo 3. Propiedades mecánicas del cemento asfáltico .....          | 49  |
| 3.1 Estabilidad y flujo.....   | 49  |

|  |    |
|--|----|
| 3.1.1 Estabilidad.....   | 49 |
| 3.1.2 Flujo.....   | 54 |
| 3.2 Resumen de las propiedades recopiladas .....                                     | 59 |
| Capítulo 4. Análisis ambiental y socioeconómico de las alternativas estudiadas ..... | 61 |
| 4.1 Polímeros.....   | 62 |
| 4.2 Caucho reciclado .....   | 63 |
| 4.3 Arcilla calcinada.....   | 64 |
| 4.4 Residuos de cerámica .....   | 64 |
| 4.5 Almidón de yuca.....   | 65 |
| Conclusiones.....  | 66 |
| Referencias .....  | 69 |

## Lista de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1 Estudios recopilados referentes a la adición de polímeros en el cemento asfáltico .            | 8  |
| Tabla 2 Estudios recopilados referentes a la adición de caucho recilcado en el cemento asfáltico.....  | 9  |
| Tabla 3 Estudios recopilados referentes a la adición de arcilla calcinada en el cemento asfáltico..... | 10 |
| Tabla 4 Estudios recopilados referentes a la adición de cerámica en el cemento asfáltico.              | 10 |
| Tabla 5 Estudios recopilados referentes a la adición de almidón de yuca en el cemento asfáltico.....   | 11 |
| Tabla 6 Número de investigaciones recopiladas por cada material .....                                  | 11 |
| Tabla 7 Datos de gravedad específica máxima con adición de caucho reciclado .....                      | 12 |
| Tabla 8 Datos de gravedad específica máxima con adición de cerámica.....                               | 13 |
| Tabla 9 Datos de punto de ignición con adición de caucho reciclado.....                                | 15 |
| Tabla 10 Datos de punto de ignición recopilados con adición de polímeros .....                         | 15 |
| Tabla 11 Datos de penetración con adición de polímeros recopilados .....                               | 19 |
| Tabla 12 Datos de penetración con adición de caucho reciclado recopilados .....                        | 19 |
| Tabla 13 Datos de penetración con adición de arcilla calcinada recopilados .....                       | 20 |
| Tabla 14 Datos de penetración con adición de cerámica recopilados .....                                | 20 |
| Tabla 15 Datos de penetración con adición de almidón de yuca recopilados .....                         | 20 |
| Tabla 16 Datos del índice de penetración con adición de polímeros recopilados.....                     | 26 |
| Tabla 17 Datos del índice de penetración con adición de caucho reciclado recopilados....               | 26 |
| Tabla 18 Datos del índice de penetración con adición de arcilla calcinada recopilados.....             | 27 |
| Tabla 19 Datos del índice de penetración con adición de cerámica recopilados .....                     | 27 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 20 Datos del índice de penetración con adición de almidón de yuca recopilados ....           | 28 |
| Tabla 21 Datos de la ductilidad con adición de polímeros recopilados .....                         | 32 |
| Tabla 22 Datos de la ductilidad con adición de caucho reciclado recopilados .....                  | 33 |
| Tabla 23 Datos de la ductilidad con adición de almidón de yuca recopilados.....                    | 33 |
| Tabla 24 Datos del punto de ablandamiento con adición de polímeros recopilados.....                | 37 |
| Tabla 25 Datos del punto de ablandamiento con adición de caucho reciclado recopilados              | 37 |
| Tabla 26 Datos del punto de ablandamiento con adición de arcilla calcinada recopilados.            | 38 |
| Tabla 27 Datos del punto de ablandamiento con adición de residuos de cerámica<br>recopilados ..... | 38 |
| Tabla 28 Datos del punto de ablandamiento con adición de almidón de yuca recopilados               | 38 |
| Tabla 29 Datos de la viscosidad con adición de polímeros recopilados .....                         | 43 |
| Tabla 30 Datos de la viscosidad con adición de caucho reciclado recopilados .....                  | 44 |
| Tabla 31 Datos de la viscosidad con adición de residuos de arcilla calcinada recopilados           | 44 |
| Tabla 32 Datos de la viscosidad con adición de residuos de cerámica recopilados.....               | 44 |
| Tabla 33 Datos de la viscosidad con adición de almidón de yuca recopilados .....                   | 45 |
| Tabla 34 Datos de la estabilidad con adición de polímeros recopilados .....                        | 50 |
| Tabla 35 Datos de la estabilidad con adición de caucho recilcado recopilados .....                 | 50 |
| Tabla 36 Datos de la estabilidad con adición de arcilla calcinada recopilados.....                 | 50 |
| Tabla 37 Datos de la estabilidad con adición de cerámica recopilados .....                         | 51 |
| Tabla 38 Datos de la estabilidad con adición de almidón de yuca recopilados .....                  | 51 |
| Tabla 39 Datos del flujo con adición de polímero recopilados .....                                 | 54 |
| Tabla 40 Datos del flujo con adición de caucho reciclado recopilados .....                         | 55 |
| Tabla 41 Datos del flujo con adición de arcilla calcinada recopilados .....                        | 55 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 42 Datos del flujo con adición de cerámica recopilados .....                                      | 55 |
| Tabla 43 Datos del flujo con adición de almidón de yuca recopilados .....                               | 56 |
| Tabla 44 Resumen del efecto de los materiales adicionados al cemento asfáltico en sus propiedades ..... | 60 |

## Lista de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Ejemplos de polímeros altamente desechados .....   | 2  |
| Figura 2. Basurero de llantas usadas. ....   | 3  |
| Figura 3. Arcilla calcinada. ....  | 4  |
| Figura 4. Productos cerámicos. ....  | 5  |
| Figura 5. Almidón de yuca. ....  | 6  |
| Figura 6. Gráfico de los datos de la gravedad específica máxima con adición de caucho reciclado..... | 13 |
| Figura 7. Gráfico de los datos de la gravedad específica máxima con adición de cerámica..            | 14 |
| Figura 8. Gráfico de los datos del punto de ignición con adición de caucho reciclado.. ....          | 16 |
| Figura 9. Gráfico de los datos del punto de ignición con adición de polímeros. ....                  | 16 |
| Figura 10. Penetrómetro digital.....   | 18 |
| Figura 11. Gráfico de los datos de penetración con polímero .....                                    | 22 |
| Figura 12 . Gráfico de los datos de penetración con caucho reciclado.....                            | 23 |
| Figura 13. Gráfico de los datos de penetración con arcilla calcinada.....                            | 23 |
| Figura 14. Gráfico de los datos de penetración con cerámica. ....                                    | 24 |
| Figura 15. Gráfico de los datos de penetración con almidón de yuca. ....                             | 24 |
| Figura 16. Gráfico de los datos del índice de penetración con polímeros.....                         | 29 |
| Figura 17. Gráfico de los datos del índice de penetración con caucho reciclado. ....                 | 29 |
| Figura 18. Gráfico de los datos del índice de penetración con arcilla calcinada.....                 | 30 |
| Figura 19. Gráfico de los datos del índice de penetración con residuos de cerámica .....             | 30 |
| Figura 20. Gráfico de los datos del índice de penetración con almidón de yuca.....                   | 31 |
| Figura 21. Ensayo de ductilidad en el cemento asfáltico .....  | 32 |
| Figura 22. Gráfico de los datos de la ductilidad con polímeros. ....                                 | 34 |
| Figura 23. Gráfico de los datos de la ductilidad con caucho reciclado. ....                          | 34 |
| Figura 24. Gráfico de los datos de la ductilidad con almidón de yuca. ....                           | 35 |
| Figura 25. Equipo para el ensayo de punto de ablandamiento. ....                                     | 36 |
| Figura 26. Gráfico de los datos del punto de ablandamiento con polímeros.....                        | 39 |
| Figura 27. Gráfico de los datos del punto de ablandamiento con caucho reciclado.....                 | 40 |
| Figura 28. Gráfico de los datos del punto de ablandamiento con arcilla calcinada.....                | 40 |
| Figura 29. Gráfico de los datos del punto de ablandamiento con residuos de cerámica. ...             | 41 |
| Figura 30. Gráfico de los datos del punto de ablandamiento con almidón de yuca. Autores, 2021.....   | 41 |
| Figura 31. Viscosímetro rotacional. ....   | 43 |
| Figura 32. Gráfico de los datos de la viscosidad con polímeros.....                                  | 46 |
| Figura 33. Gráfico de los datos de la viscosidad con caucho reciclado.. ....                         | 46 |
| Figura 34. Gráfico de los datos de la viscosidad con arcilla calcinada.. ....                        | 47 |
| Figura 35. Gráfico de los datos de la viscosidad con residuos de cerámica.....                       | 47 |

|   |    |
|---|----|
| <i>Figura 36.</i> Gráfico de los datos de la viscosidad con almidón de yuca. ....     | 48 |
| <i>Figura 37.</i> Gráfico de los datos de la estabilidad con polímeros. ....          | 52 |
| <i>Figura 38.</i> Gráfico de los datos de la estabilidad con caucho reciclado.. ....  | 52 |
| <i>Figura 39.</i> Gráfico de los datos de la estabilidad con arcilla calcinada.. .... | 53 |
| <i>Figura 40.</i> Gráfico de los datos de la estabilidad con cerámica.....            | 53 |
| <i>Figura 41.</i> Gráfico de los datos de la estabilidad con almidón de yuca.....     | 54 |
| <i>Figura 42.</i> Gráfico de los datos del flujo con polímeros.....                   | 56 |
| <i>Figura 43.</i> Gráfico de los datos del flujo con caucho reciclado.....            | 57 |
| <i>Figura 44.</i> Gráfico de los datos del flujo con arcilla calcinada.....           | 57 |
| <i>Figura 45.</i> Gráfico de los datos del flujo con cerámica.. ....                  | 58 |
| <i>Figura 46.</i> Gráfico de los datos del flujo con almidón de yuca.. ....           | 58 |
| <i>Figura 48.</i> Contaminación por polímeros en los manglares.. ....                 | 63 |

## Introducción

El cemento asfáltico, es un material extraído principalmente del petróleo, aunque también es común encontrarlo en yacimientos naturales. Se caracteriza por su viscosidad y su color negro. Es un material usado en todo el mundo, especialmente por ser el componente principal de las carpetas de rodadura de los pavimentos, gracias a que sirve como aglomerante e impermeabilizante. Como aglomerante ayuda a que los distintos agregados (finos y gruesos) resistan la acción mecánica generada por el tráfico vehicular. Como impermeabilizante garantiza que el agua no penetre en las distintas capas que conforman el pavimento (base, subbase y subrasante). Para pavimentación el cemento asfáltico puede ser empleado para conformar mezclas, bases estabilizadas, emulsiones asfálticas, riegos de impregnación, entre otras (Andrade & Murcia, 2013; Mendoza & Salazar, 2012; Villacis, 2017).

El cemento asfáltico ha sido durante décadas el material más empleado para la construcción de vías, pues las mezclas fabricadas con este material han representado grandes ventajas para el desarrollo de la infraestructura vial de muchos países, sin embargo, los problemas derivados en su funcionamiento, como la presencia de fisuras a edades tempranas, desprendimientos de partículas, mala adherencias entre el cemento asfáltico y los agregados, y el ahuellamiento, han conllevado a que se busque mejorar sus propiedades físicas, químicas, reológicas y mecánicas mediante la adición de materiales, conocidos como modificadores (Andrade & Murcia, 2013; Shirzad, et al., 2019).

Actualmente, diversas compañías constructoras e instituciones responsables de la construcción y mantenimiento de la red vial, han empleado diversos materiales en los cementos asfálticos, entre ellos polímeros, caucho reciclado, arcilla calcinada, cerámica y almidón de yuca, sin embargo, la adición de cada materiales representa modificaciones en el cemento asfáltico que se reflejan en sus propiedades, y que varían entre cada material, por tanto, se hizo necesario desarrollar una monografía donde se comparen este conjunto de propiedades (Cremades, 2000; Castro, Rondón, & Barrero, 2015).

En países como Colombia, la producción de cemento asfáltico es controlada por políticas económicas del Gobierno Nacional, las cuales buscan obtener el mayor beneficio del petróleo y sus derivados, razón por la cual los crudos son llevados a procesos más exigentes de refinación para lograr derivados que reporten mayores ingresos al país, dejando a los asfaltos con mínimas propiedades químicas y físicas indispensables para el buen desempeño en su utilización como ligante o material bituminoso en mezclas asfálticas (Cerón & Argote, 2019; Chavarro & Molina, 2015).

La importancia de este trabajo radica es resaltar aquellas investigaciones en las que se ha buscado mejorar las características y propiedades del cemento asfáltico a través de la adición de nuevos materiales, lo cual puede convertirse en una nueva alternativa para la producción de mezclas asfálticas, y para la construcción de pavimentos con menor impacto al medio ambiente, teniendo en cuenta que en la actualidad la mayor parte de las nuevas propuestas de desarrollo científico y tecnológico están orientadas en solucionar los crecientes problemas ambientales. De

esta manera se brinda una compilación que facilita la comparación de los materiales, y facilitan la toma de decisiones para escoger el material o materiales, que mejor se adapten a las condiciones de determinados estudios donde se busque una aplicación más completada, ya sea al estudiar las mezclas asfálticas, o su comportamiento en carpetas de rodadura.

El desarrollo del trabajo estuvo centrado en la consecución de los siguientes objetivos:

- Describir las propiedades físicas y químicas del cemento asfáltico, con adición de materiales: polímeros, caucho reciclado, arcilla calcinada, cerámica y almidón de yuca.
- Determinar las propiedades reológicas del cemento asfáltico, con adición de materiales: polímeros, caucho reciclado, arcilla calcinada, cerámica, y almidón de yuca.
- Determinar las propiedades mecánicas del cemento asfáltico, con adición de materiales: polímeros, caucho reciclado, arcilla calcinada, cerámica, y almidón de yuca.
- Realizar un análisis ambiental y socioeconómico de las alternativas estudiadas.

Para el desarrollo de estos objetivos, se utilizó una metodología denominada como metanálisis, la cual permitió sintetizar la evidencia procedente de estudios disponibles sobre el tema de interés en el marco de una revisión sistemática previa. La investigación fue de tipo descriptivo y cuantitativo. Comprendió tres etapas: recopilación de información bibliográfica, análisis y selección de la información, y desarrollo de los objetivos planteados. La duración estimada del trabajo fue de 24 semanas.

## **Capítulo 1. Propiedades físicas y químicas del cemento asfáltico**

Aunque el cemento asfáltico, ya sea natural o directamente obtenido del petróleo, posea características y propiedades que permiten su utilización directa, debido a las altas exigencias ocasionadas por el tráfico vehicular pesado y las condiciones medioambientales extremas y cambiantes, han hecho necesario adicionar ciertos materiales que permitan mejorar las propiedades innatas del cemento asfáltico. Estos materiales adicionados suelen ser denominados como modificadores (Andrade & Murcia, 2013; Villacis, 2017).

En este capítulo se hace una descripción de aquellos materiales que han sido adicionados en el cemento asfáltico para actuar como modificadores. Además se hace una breve compilación de los estudios que aportaron la información recopilada en esta monografía. Posteriormente se muestran las variaciones que producen la adición de los modificadores en cuanto a las propiedades físicas y químicas del cemento asfáltico. En los capítulos siguientes se abordan las propiedades reológicas y mecánicas.

### **1.1 Materiales adicionados al cemento asfáltico**

En la actualidad existe una diversidad de materiales que han sido aprovechados siendo adicionados al cemento asfáltico con el fin de mejorar sus propiedades, aumentando su calidad, y convirtiéndose en una alternativa para mitigar impactos ambientales. A continuación se



### 1.1.2 Caucho reciclado

El caucho puede ser de origen natural o sintético. El caucho natural se obtiene a partir del látex, el cual es una resina blanca y lechosa que se extrae de la corteza del árbol de caucho. Por su parte, el caucho sintético más común es el empleado en la fabricación de neumáticos y llantas. En la actualidad solo en el caso de Colombia, según datos de la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, se desechan más de 61 mil toneladas de neumáticos y alrededor de 5 millones de llantas cada año, de los cuales un gran porcentaje terminan arrojados en vías, lugares deshabitados y ríos. En la figura 2 se observa un basurero exclusivo de llantas utilizadas. Esta situación ha conllevado a que se busquen alternativas para aprovechar la gran cantidad de llantas y neumáticos disponible, entre las opciones más viables esta su empleo como modificador del cemento asfáltico (Andrade & Murcia, 2013; Revista AutoCrash, 2018).



*Figura 2.* Basurero de llantas usadas. Obtenido en: <https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/articulo/reaprovechamiento-de-llantas-usadas-podria-generar-combustible-ecologico.html>

### 1.1.3 Arcilla calcinada

La arcilla es clasificada como un material de granulometría fina (tamaño de partícula menor a 0,0074 mm de diámetro), empleada principalmente para la producción de materiales de construcción, como ladrillos y tejas. Se extrae de canteras, y a través de la técnica adecuada es moldeada para su posterior secado en horno, los cuales alcanzan temperaturas que oscilan entre los 850°C a 1000 °C, de tal forma que el material adquiere propiedades de un cerámico vidrioso. Sin embargo, durante este proceso de horneado, se generan residuos, específicamente arcilla calcinada, la cual es desechada en su totalidad. En la figura 3 se observa la arcilla desechada del proceso de horneado (Andrade & Murcia, 2013).



*Figura 3.* Arcilla calcinada. Obtenido en: [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-554783050-arcilla-calcinada-saco-23-kilos-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-554783050-arcilla-calcinada-saco-23-kilos-_JM)

### 1.1.4 Cerámica

La cerámica es un material producto de la cocción u horneado de la arcilla, sin embargo, a diferencia de la arcilla calcinada mencionada anteriormente, la cerámica se caracteriza por ser sometida a mayores variaciones de temperatura, por lo que al final se obtiene un producto de gran fragilidad, lo cual también está ligado a las dimensiones y forma de cada cerámica en específico. Es común considerar como cerámica a todos los materiales inorgánicos no metálicos que se forman por acción del calor. Como todo producto industrial, la cerámica es desechada directamente en basureros, por lo cual se ha buscado la forma de ser aprovechada en diferentes aplicaciones, entre ellas, adicionándola al cemento asfáltico. En la figura 4 se observa un ejemplo de cerámica (González & Beleño, 2015).



*Figura 4.* Productos cerámicos. Obtenido en:  
[https://elpais.com/elpais/2019/08/14/icon\\_design/1565773288\\_582153.html](https://elpais.com/elpais/2019/08/14/icon_design/1565773288_582153.html)

### 1.1.5 Almidón de yuca

El almidón es el principal carbohidrato de almacenamiento energético de las plantas, y está constituido principalmente por glucosa. El almidón de yuca es el producto resultante de la molienda de este tubérculo. Es un producto totalmente biodegradable, que actualmente cuenta con aplicaciones en las industrias alimenticias, cosmética y biomédica. Actualmente existen distintas iniciativas que buscan aumentar su aprovechamiento, entre ellas la adición en el cemento asfáltico. En la figura 5 se observa la forma común de este tipo de almidón (Cerón & Argote, 2019).



*Figura 5.* Almidón de yuca. Obtenido en: <http://salugran.com/producto/almidon-de-yuca/>

Se observa que los 5 materiales alternativos comúnmente utilizados en el cemento asfáltico están centrado en el aprovechamiento de producto altamente desechados, generados de contaminación, especialmente de fuentes hídricas, por lo cual, con su empleo en el cemento asfáltico se está brindando una nueva opción para su utilización.

## **1.2 Estudios recopilados**

En tablas 1 a 5 se indican los estudios recopilados en el presente trabajo de acuerdo al tipo de material adicionado al cemento asfáltico. Con este conjunto de referencias fue posible encontrar información referente a las siguientes propiedades: físicas y químicas (gravedad específica: máxima, y punto de ignición), reológicas (penetración, índice de penetración, ductilidad, punto de ablandamiento, viscosidad, módulo dinámico – ángulo de fase, y recuperación elástica por torsión) y mecánicas (módulo resiliente, estabilidad y flujo).

Tabla 1

*Estudios recopilados referentes a la adición de polímeros en el cemento asfáltico*

| Autor  | Año  | Título  | Ciudad         | País     | Institución                                    | Revista                                     | Tipo de trabajo     |
|--|------|---|----------------|----------|--|---|---------------------|
| Luque, H. & Rincón, A.                         | 2011 | Evaluación de las propiedades físicas de un cemento asfáltico 60/70 modificado con residuos de la fabricación de productos con polietileno de baja densidad | Bogotá         | Colombia | Pontificia Universidad Javeriana               | -   | Tesis de pregrado   |
| Castro, Rondón, & Barrero, J.                  | 2015 | Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD                                      | Bogotá         | Colombia | Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas | INGENIERÍA                                  | Artículo científico |
| Burak, S. & Giray, I.                          | 2007 | Analysis of styrene-butadiene-styrene polymer modified bitumen using fluorescent microscopy and conventional test methods                                   | Izmir          | Turquía  | Universidad Dokuz Eylul                        | Journal of Hazardous Materials              | Artículo científico |
| Delgado, et al.                                | 2018 | Influence of four non-conventional additives on the physical, rheological and thermal properties of an asphalt  | Bogotá         | Colombia | Pontificia Universidad Javeriana               | Ingeniería e Investigación                  | Artículo científico |
| Alves, et al.                                  | 2016 | Rheological studies of asphalt modified with elastomeric polymer  | Campina Grande | Brasil   | Universidad Federal de Campina Grande          | Construction and Building Materials         | Artículo científico |
| Kishchynskyi, S., Nagaychuk, V. & Bezuglyi, A. | 2016 | Improving quality and durability of bitumen and asphalt concrete by modification using recycled polyethylene based polymer composition                      | -              | -        | -  | Procedia Engineering                        | Artículo científico |
| Abd-Allah, A., et al.                          | 2014 | Effect of using polymers on bituminous mixtures characteristics in Egypt  | -              | -        | -  | Journal of Mechanical and Civil Engineering | Artículo científico |
| Jan, H., Aman, M., Tawab, M. & Ali, K.         | 2018 | Performance evaluation of hot mix asphalt concrete by using polymeric waste polyethylene  | -              | -        | -  | Procedia Engineering                        | Artículo científico |
| Jebur, Y. & Imran, M.                          | 2017 | Evaluation the effect of using polymers on the performance of wearing asphalt mixture   | -              | -        | -  | Journal of Babylon University               | Artículo científico |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 2

*Estudios recopilados referentes a la adición de caucho reciclado en el cemento asfáltico*

| Autor  | Año  | Título   | Ciudad      | País     | Institución   | Revista  | Tipo de trabajo     |
|--|------|--|-------------|----------|---|--|---------------------|
| Campaña, Galeas & Guerrero                     | 2015 | Obtención de asfalto modificado con polvo de caucho proveniente del reciclaje de neumáticos de automotores                             | Quito       | Ecuador  | Escuela Politécnica Nacional                                  | Revista Politécnica                              | Artículo científico |
| Figuroa, A.. & Fonseca, E.                     | 2008 | Contrastación entre el asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada empleando dos métodos de mezclado                        | Bogotá      | Colombia | Universidad de La Salle                                       | Épsilon. Revista de las facultades de ingeniería | Artículo científico |
| Goicochea, F.                                  | 2019 | Estudio de un asfalto con adición de caucho de neumático reciclado como polímero base, Chachapoyas-Amazonas-2017                       | Chachapoyas | Perú     | Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas | -  | Tesis de pregrado   |
| Carrizales, J.                                 | 2015 | Asfalto modificado con material reciclado de llantas para su aplicación en pavimentos flexibles  | Puno        | Perú     | Universidad Nacional del Altiplano                            | -  | Tesis de pregrado   |
| Kishchynskyi, S., Nagaychuk, V. & Bezuglyi, A. | 2016 | Improving quality and durability of bitumen and asphalt concrete by modification using recycled polyethylene based polymer composition | -           | -        | -   | Procedia Engineering                             | Artículo científico |
| Awwad, M. & Shbeeb, L.                         | 2007 | The use of polyethylene in hot asphalt mixtures  | -           | -        | -   | American Journal of Applied Sciences             | Artículo científico |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 3

*Estudios recopilados referentes a la adición de arcilla calcinada en el cemento asfáltico*

| Autor                     | Año  | Título   | Ciudad | País     | Institución                    | Revista                                | Tipo de trabajo     |
|---------------------------|------|--|--------|----------|--------------------------------|--|---------------------|
| Mendoza, M. & Salazar, M. | 2012 | Efecto de la arcilla calcinada en un asfalto B-60/70 en porcentajes de 5% al 50%             | Bogotá | Colombia | Universidad Piloto de Colombia | -                                      | Tesis de pregrado   |
| Andrade, W. & Murcia, D.  | 2013 | Efecto de la arcilla calcinada en un asfalto 80/100 modificado con grano de caucho reciclado | Bogotá | Colombia | Universidad Piloto de Colombia | -                                      | Tesis de pregrado   |
| Majeed, M.                | 2017 | Effect of adding clay with Natural and Recycled coarse aggregates on asphalt mixture         | -      | -        | -                              | Journal of Engineering and Development | Artículo científico |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 4

*Estudios recopilados referentes a la adición de cerámica en el cemento asfáltico*

| Autor                     | Año  | Título  | Ciudad | País     | Institución                    | Revista   | Tipo de trabajo     |
|---------------------------|------|---|--------|----------|--------------------------------|---|---------------------|
| Gonzales, T. & Beleño, M. | 2015 | Reología de asfaltos 60/70 modificados con residuo de ceramica  | Bogotá | Colombia | Universidad Piloto de Colombia | -   | Tesis de pregrado   |
| Kara, C. & Karacasu, M.   | 2015 | Use of ceramic wastes in road pavement design   | -      | -        | -                              | Proceedings of the World Congress on New Technologies | Artículo científico |
| Silvestre, R., et al.     | 2013 | Using ceramic wastes from tile industry as a partial substitute of natural aggregates in hot mix asphalt binder courses | -      | -        | -                              | Construction and Building Materials                   | Artículo científico |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 5

*Estudios recopilados referentes a la adición de almidón de yuca en el cemento asfáltico*

| Autor                        | Año  | Título   | Ciudad  | País     | Institución           | Revista  | Tipo de trabajo     |
|------------------------------|------|--|---------|----------|-----------------------|--|---------------------|
| Cerón, C. & Argote, G.       | 2019 | Análisis comparativo del comportamiento reológico de un asfalto convencional y un asfalto modificado con almidón de yuca | Popayán | Colombia | Universidad del Cauca | -  | Tesis de pregrado   |
| Al, A., Tan, Y., & Ayman, T. | 2011 | Starch as a modifier for asphalt paving materials  | Mosul   | Irak     | Universidad de Mosul  | Construction and Building Materials              | Artículo científico |
| Al, A. & Tan, Y.             | 2019 | Performance evaluation of prepared gelled hot sealant in cold climates   | -       | -        | -                     | School of Transportation Science and Engineering | Artículo científico |

*Nota:* Autores, 2021.

En la tabla 6 se resume el número de investigaciones recopiladas por cada material:

Tabla 6

Número de investigaciones recopiladas por cada material

| Material                  | Polímero | Caucho Reciclado | Arcilla Calcinada | Cerámica | Almidón de yuca |
|---------------------------|----------|------------------|-------------------|----------|-----------------|
| Número de Investigaciones | 9        | 6                | 3                 | 3        | 3               |

*Nota:* Autores, 2021.

### 1.3 Propiedades físicas y químicas del cemento asfáltico

#### 1.3.1 Gravedad específica máxima

La gravedad específica es definida como la relación entre la masa de un volumen dado de material, en este caso cemento asfáltico, y la masa de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura. Puede ser calculada mediante los procedimientos indicados en la I.N.V. E-735: Gravedad específica máxima de mezclas asfáltica para pavimentos, o con la I.N.V. E-803: Determinación de la gravedad específica máxima y de la densidad máxima de las mezclas asfáltica para pavimentación mediante el método de sellado automático por vacío (INVIAS, 2012).

En las tabla 7 y 8 se muestran los resultados recopilados referentes a la gravedad específica máxima:

Tabla 7

*Datos de gravedad específica máxima con adición de caucho reciclado*

| Autor                             | Año  | Unidad       | Porcentaje de material<br>adicionado al cemento asfáltico |       |       |       |
|-----------------------------------|------|--------------|---|-------|-------|-------|
|                                   |      |              | 0%  | 10%   | 15%   | 20%   |
| Campaña,<br>Galeas &<br>Guerrero  | 2015 | Adimensional | 2,409   | 2,354 | 2,383 | 2,375 |
| Wulandari,<br>P. &<br>Tjandra, D. | 2017 | Adimensional | 2,33  | 2,27  | -     | 2,23  |

*Nota:* Autores, 2021.

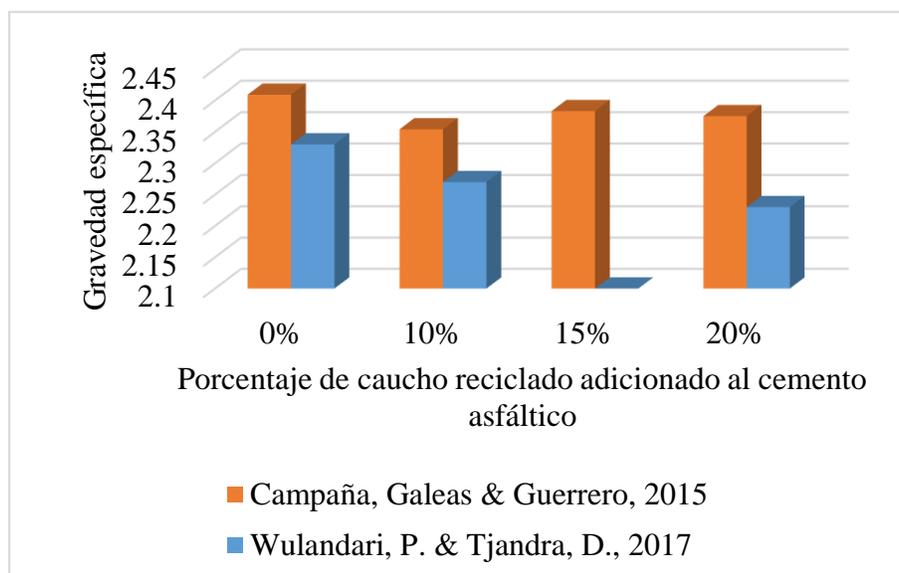
Tabla 8

*Datos de gravedad específica máxima con adición de cerámica*

| Autor                   | Año  | Unidad       | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |      |      |      |      |      |
|-------------------------|------|--------------|--|------|------|------|------|------|
|                         |      |              | 0%   | 10%  | 20%  | 30%  | 40%  | 50%  |
| Kara, C. & Karacasu, M. | 2015 | Adimensional | 2,44   | 2,38 | 2,31 | 2,2  | 2,12 | -    |
| Silvestre, R., et al.   | 2013 | Adimensional | 2,45   | -    | -    | 2,25 | -    | 2,09 |

*Nota:* Autores, 2021.

Se observa en las dos tablas anteriores que tanto la adición tanto de caucho reciclado como de cerámica, representa una disminución de la gravedad específica en comparación al cemento asfáltico convencional. Esta disminución se da entre un 1 a 2,28% para el caucho reciclado, y entre un 2,58 a 4% para la cerámica. En las 2 figuras siguientes se muestra la representación gráfica de los datos de las tablas 7 y 8.



*Figura 6.* Gráfico de los datos de la gravedad específica máxima con adición de caucho reciclado. Autores, 2021.

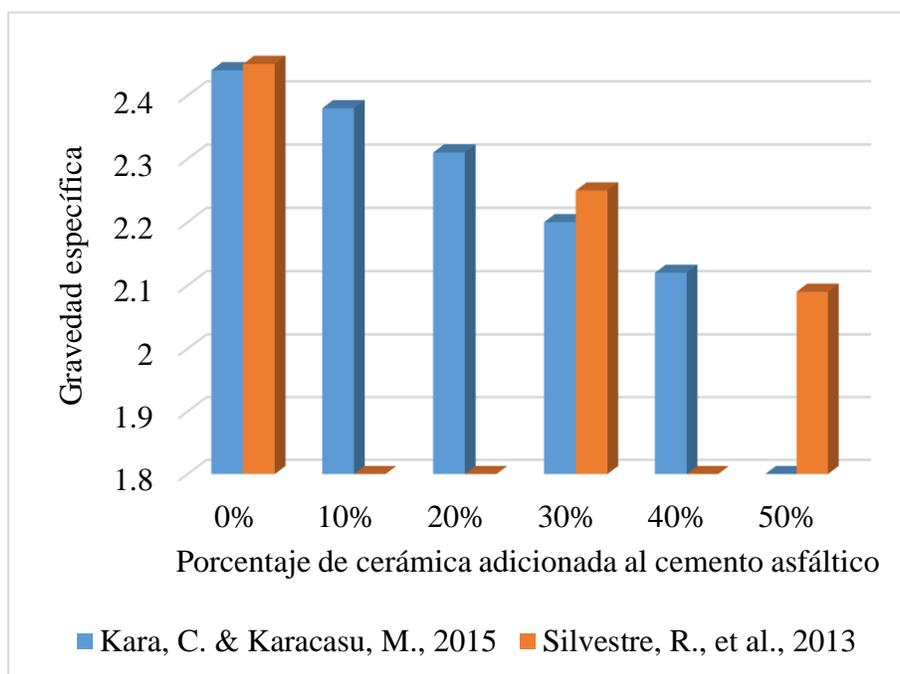


Figura 7. Gráfico de los datos de la gravedad específica máxima con adición de cerámica. Autores, 2021.

### 1.3.2 Punto de ignición.

Coloquialmente el punto de ignición, o punto de inflamación, hace referencia a la temperatura necesaria para que una sustancia empiece a arder ante la presencia de una fuente de calor, de tal forma que se mantenga la llama a pesar de que se retire la fuente de calor externo. En el caso del cemento asfáltico, el punto de ignición indica la temperatura con la cual se generan vapores en una muestra de material bajo las condiciones especificadas en la I.N.V. E-709: Puntos de inflamación y de combustión mediante la copa abierta Cleveland (INVIAS, 2012).

En la tabla 9 y 10 se muestran los resultados recopilados referentes a esta propiedad:

Tabla 9

*Datos de punto de ignición recopilados con adición de caucho reciclado*

| Autor                       | Año  | Unidad | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |     |     |     |     |
|-----------------------------|------|--------|--|-----|-----|-----|-----|
|                             |      |        | 0%   | 10% | 12% | 16% | 20% |
| Figueroa, A. & Fonseca, E.  | 2008 | °C     | 330  | -   | 333 | 343 | 356 |
| Wulandari, P. & Tjandra, D. | 2017 | °C     | 340  | 345 | -   | -   | 350 |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 10

*Datos de punto de ignición recopilados con adición de polímeros*

| Autor                         | Año  | Unidad | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |     |
|-------------------------------|------|--------|--|-----|
|                               |      |        | 0%   | 5%  |
| Castro, Rondón, & Barrero, J. | 2015 | °C     | 285  | 295 |
| Delgado, et al.               | 2018 | °C     | 296  | 303 |

*Nota:* Autores, 2021.

Se observa en los datos de las dos tablas anteriores que la adición de caucho reciclado y polímeros produce un aumento en el valor del punto de ignición del cemento asfáltico. En el caso del caucho reciclado, este aumento se da entre un 1 a 6%, mientras que con polímeros el aumento oscila entre el 2,4 y el 3,5%. En las figuras siguientes se muestra la representación gráfica de los datos anteriores.

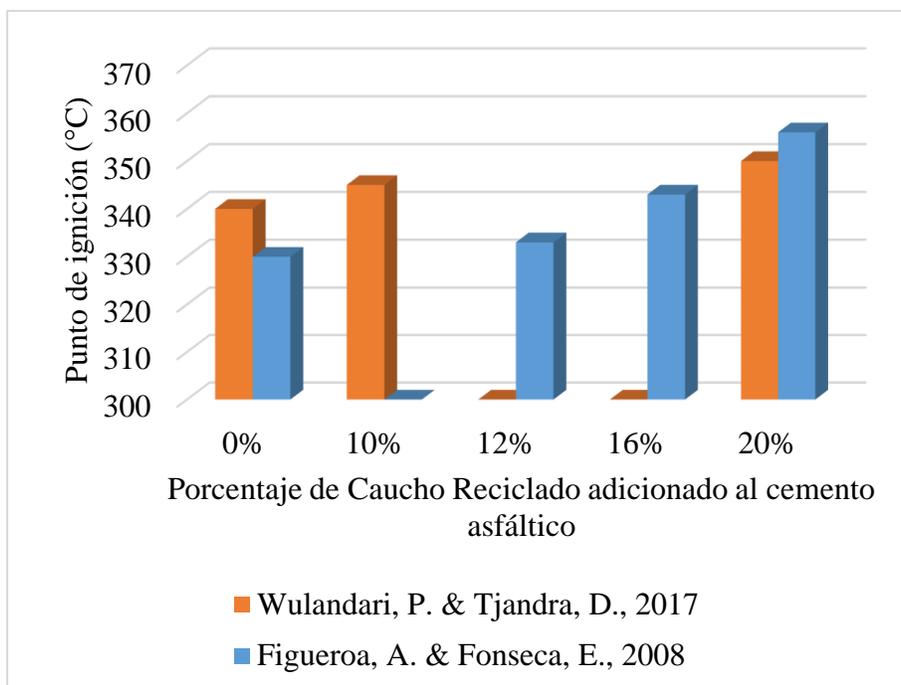


Figura 8. Gráfico de los datos del punto de ignición con adición de caucho reciclado. Autores, 2021.

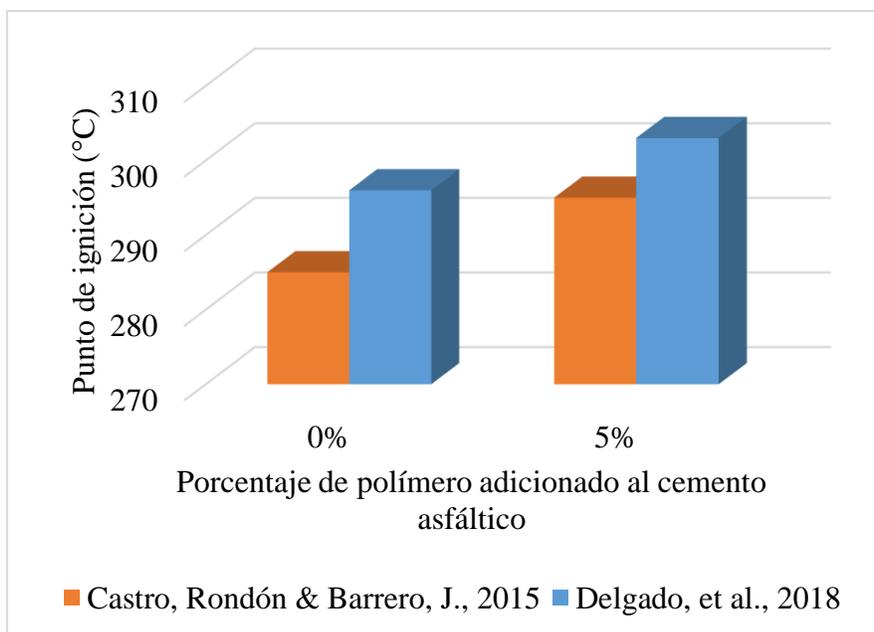


Figura 9. Gráfico de los datos del punto de ignición con adición de polímeros. Autores, 2021.

## Capítulo 2. Propiedades reológicas del cemento asfáltico

La reología es la encargada de estudiar el comportamiento de la deformación y el fluir de la materia, al ser sometido a esfuerzos externos. La reología se sustenta en conocimientos de la teoría de la elasticidad, resistencia de los materiales, la plasticidad, la viscosidad y la hidráulica. En cuanto a las propiedades reológicas del cemento asfáltico, se ha demostrado que se ven afectadas por la proporción en que estén presentes sus componentes, lo cual puede variar de acuerdo al origen del petróleo, o si se trata de cemento asfáltico natural, de la fuente de la cual fue extraído (Mendoza & Salazar, 2012; Andrade & Murcia, 2013).

Este capítulo se centra en describir las propiedades reológicas que se obtienen en el cemento asfáltico con la adición de los materiales estudiados: polímeros, caucho reciclado, arcilla calcinada, cerámica y almidón de yuca.

### 2.1 Penetración

La penetración indica la distancia hasta la cual penetra verticalmente una aguja normalizada en el cemento asfáltico en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. El ensayo de penetración se realiza de acuerdo a lo indicado en la I.N.V. E-706 *Penetración de los materiales bituminosos*, o de su norma referente, la ASTM D 5. Las condiciones generalizadas del ensayo consisten en ensayar el cemento asfáltico a una temperatura de 25°C (77°F) durante

un tiempo de 5 segundos y con una carga móvil total, incluida la aguja, de 100 g. En la figura 10 se observa un penetrómetro digital empleado para este ensayo (I.N.V. E-706, 2012).



*Figura 10.* Penetrómetro digital. Obtenido en:  
<https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/productos/asfaltos/analisis-de-mezclas-asfalticas/penetrometro-digital-asfaltos/>

En las tablas 11 a 15 se muestran los resultados recopilados referentes a esta propiedad para cada uno de los materiales estudiados en este trabajo. Los resultados de cada material se muestran en tablas por separado para facilitar su organización, debido principalmente a que los estudios emplean porcentajes diferentes de adición en el cemento asfáltico.

Tabla 11

*Datos de penetración con adición de polímeros recopilados*

| Autor  | Año  | Unidad | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |      |      |      |      |      |      |
|--|------|--------|--|------|------|------|------|------|------|
|  |      |        | 0%   | 1%   | 2%   | 3%   | 4%   | 5%   | 6%   |
| Luque, H. & Rincón, A.                         | 2011 |        | 68,0   | 66,0 | 62,0 | 60,0 | 58,0 | 57,0 | 55,0 |
| Burak, S. & Giray, I.                          | 2007 |        | 63,0   | -    | 61,0 | 51,0 | 49,0 | 48,0 | 48,0 |
| Alves, et al.                                  | 2016 |        | 49,5   | 45,3 | -    | 44,4 |      | 43,5 | -    |
| Delgado, et al.                                | 2018 |        | 64,2   | -    | -    | -    |      | 27,0 | -    |
| Castro, Rondón, & Barrero, J.                  | 2015 | mm     | 65,0   | -    | -    | -    |      | 35,0 | -    |
| Kishchynskyi, S., Nagaychuk, V. & Bezuglyi, A. | 2016 |        | 100,0  | -    | 74,0 | 70,0 | 63,0 | -    | -    |
| Abd-Allah, A., et al.                          | 2014 |        | 67,0   | -    | 42,0 | 32,0 | 25,0 | -    | -    |
| Jan, H., Aman, M., Tawab, M. & Ali, K.         | 2018 |        | 85,0   | 70,0 | 64,0 | 57,0 | 46,0 | -    | -    |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 12

*Datos de penetración con adición de caucho reciclado recopilados*

| Autor                       | Año  | Unidad | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------|------|--------|--|------|------|------|------|------|------|------|
|                             |      |        | 0%   | 10%  | 12%  | 14%  | 15%  | 16%  | 18%  | 20%  |
| Figueroa, A. & Fonseca, E.  | 2008 |        | 88,0   | -    | 78,0 | 73,1 | -    | 66,4 | 59,0 | 57,6 |
| Goicochea, F.               | 2019 | mm     | 65,0   | 35,0 | -    | -    | 30,0 | -    | -    | -    |
| Wulandari, P. & Tjandra, D. | 2017 |        | 64,3   | 43,8 | -    | -    | -    | -    | -    | 41,5 |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 13

*Datos de penetración con adición de arcilla calcinada recopilados*

| Autor                     | Año  | Unidad | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------|------|--------|--|------|------|------|------|------|------|------|
|                           |      |        | 0%   | 5%   | 10%  | 15%  | 20%  | 25%  | 35%  | 50%  |
| Andrade, W. & Murcia, D.  | 2013 | mm     | 84,8   | 54,8 | 53,5 | 52,5 | 50,6 | 48,2 | -    | -    |
| Mendoza, M. & Salazar, M. | 2012 |        | 66,2   | 64,7 | -    | 60,4 | -    | 58,7 | 45,2 | 41,9 |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 14

*Datos de penetración con adición de residuos de cerámica recopilados*

| Autor                     | Año  | Unidad | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |      |      |      |      |
|---------------------------|------|--------|--|------|------|------|------|
|                           |      |        | 0%   | 7%   | 10%  | 13%  | 20%  |
| Gonzales, T. & Beleño, M. | 2015 | mm     | 65,3   | 56,5 | 56,1 | 55,2 | 50,3 |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 15

*Datos de penetración con adición de almidón de yuca recopilados*

| Autor                        | Año  | Unidad | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |      |      |      |
|------------------------------|------|--------|--|------|------|------|
|                              |      |        | 0%   | 5%   | 7%   | 9%   |
| Cerón, C. & Argote, G.       | 2019 | mm     | 67,6   | 63,2 | 59,3 | 56,6 |
| Al, A., Tan, Y., & Ayman, T. | 2011 |        | 78,0   | 46,0 | -    | -    |
| Al, A. & Tan, Y.             | 2019 |        | 72,3   | 70,1 | 67,2 | 65,2 |

*Nota:* Autores, 2021.

Se evidencia en el conjunto de tablas anteriores, que la adición de cualquiera de los materiales estudiados (polímero, caucho reciclado, arcilla calcinada, cerámica, y almidón de yuca) producen una disminución de la penetración en el cemento asfáltico, lo que conlleva a una mayor rigidización de este y por lo tanto de su resistencia. La variación que produce en la penetración es diferente para cada material, los polímeros producen una disminución de entre un 3 a 58%; el caucho reciclado un 35%, la arcilla calcinada entre un 3 a 35%, la cerámica entre un 13 a 23%, y el almidón de yuca entre un 6 a 17%. De todos los materiales, el polímero es el que mayor disminución produce en la penetración. En las figuras siguientes se muestra la representación gráfica de las tablas anteriores.

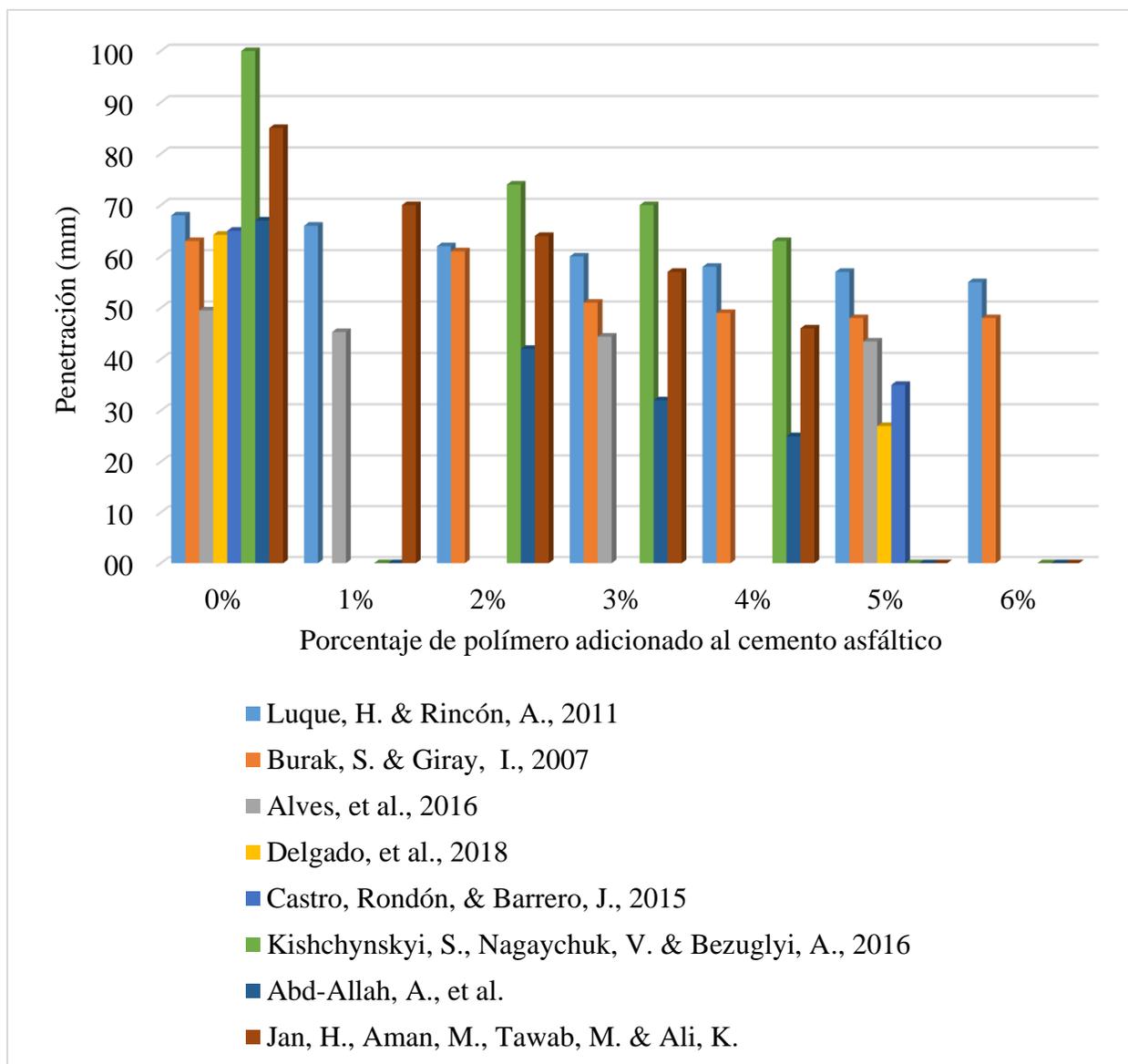


Figura 11. Gráfico de los datos de penetración con polímero. Autores, 2021.

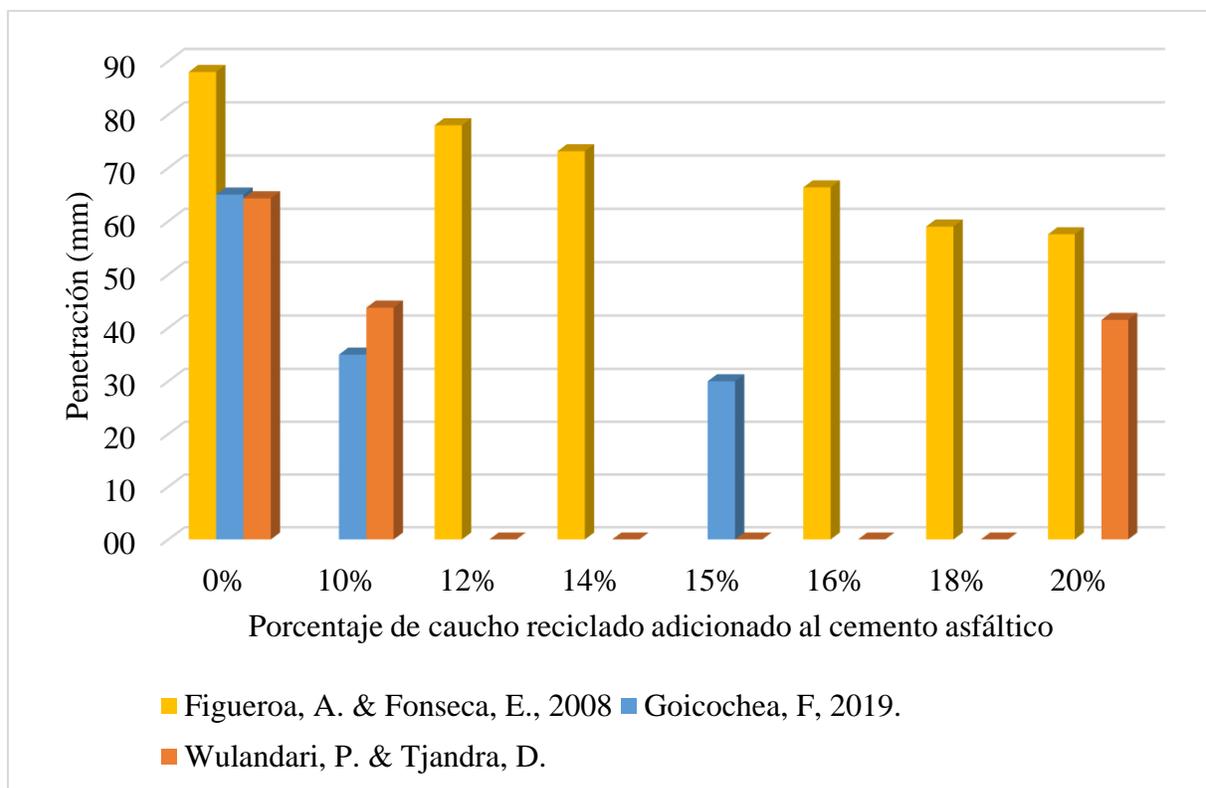


Figura 12 . Gráfico de los datos de penetración con caucho reciclado. Autores, 2021.

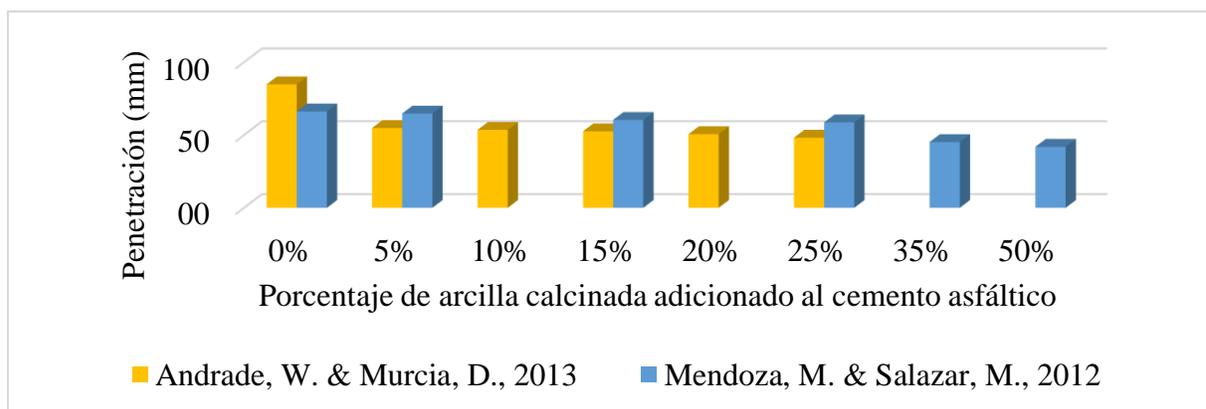


Figura 13. Gráfico de los datos de penetración con arcilla calcinada. Autores, 2021.

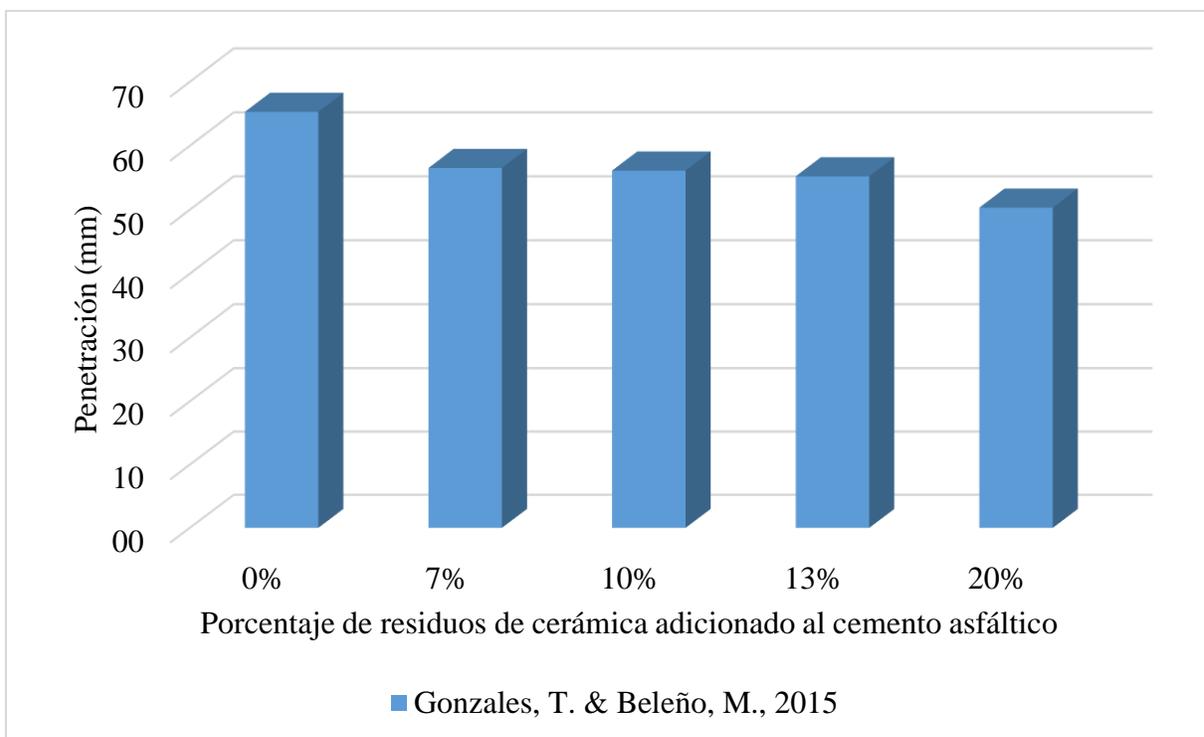


Figura 14. Gráfico de los datos de penetración con cerámica. Autores, 2021.

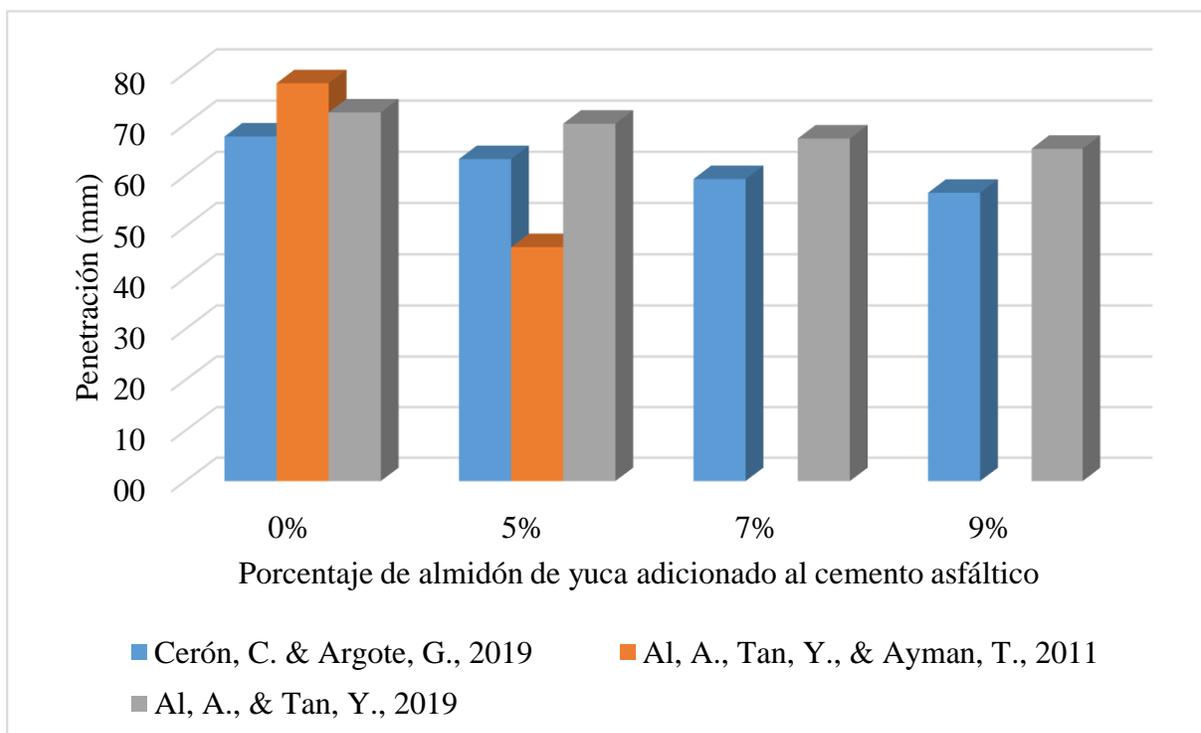


Figura 15. Gráfico de los datos de penetración con almidón de yuca. Autores, 2021.

## 2.2 Índice de penetración

El índice de penetración (IP) indica la susceptibilidad térmica del cemento asfáltico. Este valor se calcula a partir de los valores del índice de penetración y del punto de ablandamiento. Puede ser calculado a partir de las ecuaciones indicadas en la I.N.V. E-724 *Índice de penetración de los cementos asfálticos*. De acuerdo al valor del IP los cementos asfálticos pueden ser clasificados en tres grupos:

- $IP > +1$ : Son los cementos asfálticos con poca susceptibilidad a la temperatura, pero con alto grado de deformación elástica.
- $IP < -1$ : Son los cementos asfálticos con mayor susceptibilidad a la temperatura.
- $IP$  entre  $+1$  y  $-1$ : Corresponden a los cementos asfálticos con características intermedias entre los dos grupos anteriores, siendo estos valores los comunes en la mayoría de los cementos asfálticos empleados en pavimentaciones (I.N.V. E-724, 2012).

En las tablas 16 a 20 se muestran los resultados recopilados referentes a esta propiedad con los materiales con los cuales se encontró información disponible. Los resultados de cada material se muestran en tablas por separado para facilitar su organización, debido principalmente a que los estudios emplean porcentajes diferentes de adición en el cemento asfáltico.

Tabla 16

*Datos del índice de penetración con adición de polímeros recopilados*

| Autor                         | Año  | Unidad       | Material | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |       |       |      |      |      |
|-------------------------------|------|--------------|----------|--|-------|-------|------|------|------|
|                               |      |              |          | 0%   | 2%    | 3%    | 4%   | 5%   | 6%   |
| Castro, Rondón, & Barrero, J. | 2015 | Adimensional | Polímero | -0,92  | -0,73 | -0,16 | 0,35 | 0,98 | 1,46 |
| Burak, S. & Giray, I.         | 2007 |              |          | -0,80  | -     | -     | -    | 0,20 | -    |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 17

*Datos del índice de penetración con adición de caucho reciclado recopilados*

| Autor         | Año  | Unidad       | Material         | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |       |       |       |
|---------------|------|--------------|------------------|--|-------|-------|-------|
|               |      |              |                  | 0%   | 10%   | 15%   | 20%   |
| Goicochea, F. | 2019 | Adimensional | Caucho Reciclado | 0,30   | -1,40 | -0,80 | -0,40 |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 18

*Datos del índice de penetración con adición de arcilla calcinada recopilados*

| Autor   | Año  | Unidad       | Material             | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |      |      |      |      |      |      |      |
|---|------|--------------|----------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|
|   |      |              |                      | 0%   | 5%   | 10%  | 15%  | 20%  | 25%  | 35%  | 50%  |
| Andrade,<br>W. &<br>Murcia,<br>D.<br>Mendoza,<br>M. &<br>Salazar,<br>M. | 2013 | Adimensional | Arcilla<br>Calcinada | -  | 0,08 | 0,46 | 0,53 | 0,79 | 0,93 | -    | -    |
|   | 2012 |              |                      | -  | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
|   |      |              |                      | 1,92   | 0,96 | -    | 0,78 | -    | 1,08 | 1,03 | 0,94 |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 19

*Datos del índice de penetración con adición de residuos de cerámica recopilados*

| Autor                        | Año  | Unidad       | Material | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |       |       |      |      |
|------------------------------|------|--------------|----------|--|-------|-------|------|------|
|                              |      |              |          | 0%   | 7%    | 10%   | 13%  | 20%  |
| Gonzales, T. &<br>Beleño, M. | 2015 | Adimensional | Cerámica | -0,86  | -0,83 | -0,26 | 0,18 | 0,39 |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 20

*Datos del índice de penetración con adición de almidón de yuca recopilados*

| Autor                        | Año  | Unidad       | Material        | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |       |       |       |
|------------------------------|------|--------------|-----------------|--|-------|-------|-------|
|                              |      |              |                 | 0%   | 5%    | 7%    | 9%    |
| Cerón, C. & Argote, G.       | 2019 | Adimensional | Almidón de yuca | -0,92  | -1,17 | -1,46 | -1,38 |
| Al, A., Tan, Y., & Ayman, T. | 2011 |              |                 | -2,23  | 0,00  | -     | -     |

*Nota:* Autores, 2021.

Con el conjunto de datos anteriores se puede detallar lo siguiente: la adición de polímeros, arcilla calcinada y residuos de cerámica tiende a aumentar el valor del índice de penetración ( $IP > +1$ ), lo que representa un mayor grado de deformación plástica aunque al mismo tiempo menor o poca susceptibilidad a la temperatura, mientras que la adición de caucho reciclado tiene a disminuir los valores del índice de penetración ( $IP < -1$ ), lo que conlleva a una mayor susceptibilidad a los cambios de temperatura.

Es de resaltar que en el caso de la adición de almidón de yuca, las dos referencias muestran resultados contrarios, pues mientras Cerón, C. & Argote, G., 2019, indican una disminución del valor del índice de penetración ( $IP < -1$ ), Al, A., Tan, Y., & Ayman, T., 2011, señalan un aumento de esta propiedad.

En los gráficos de las figuras 16 a la 20 se muestran los datos de las tablas anteriores:

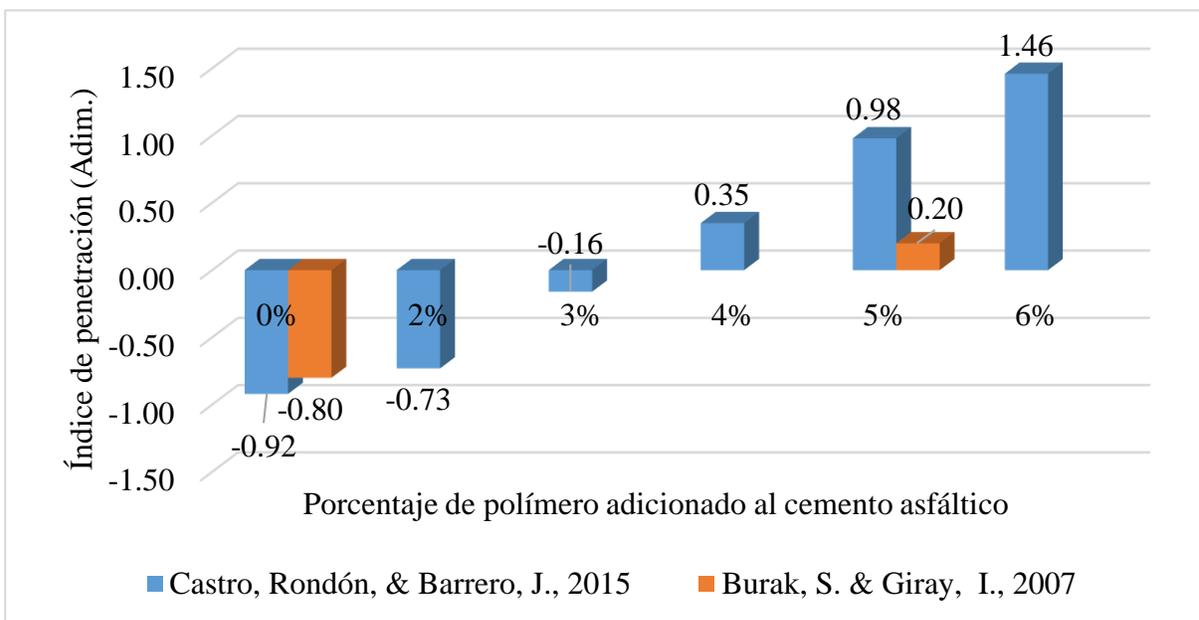


Figura 16. Gráfico de los datos del índice de penetración con polímeros. Autores, 2021.

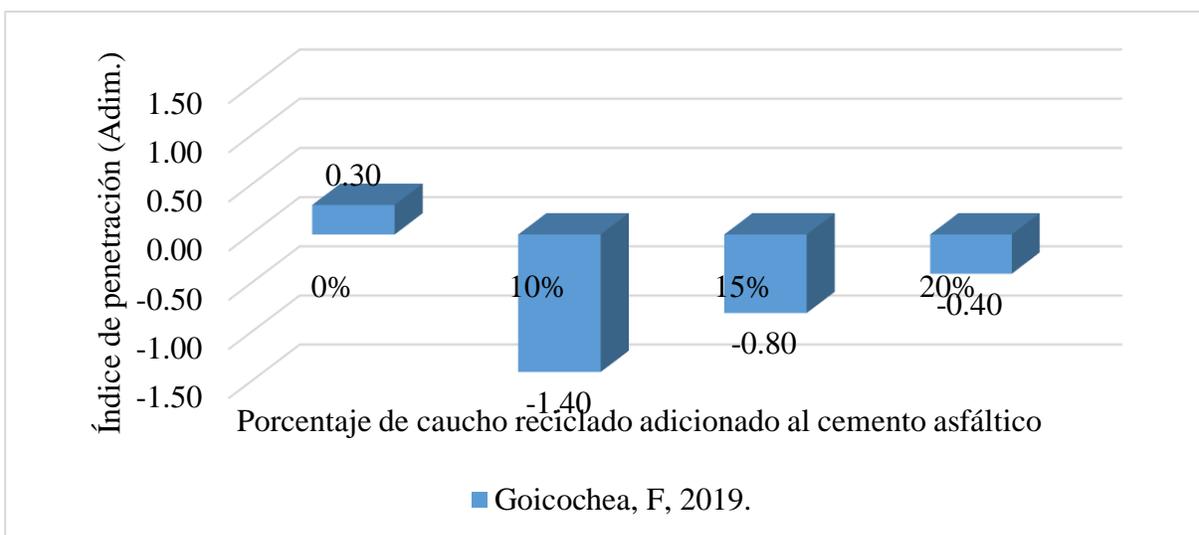


Figura 17. Gráfico de los datos del índice de penetración con caucho reciclado. Autores, 2021.

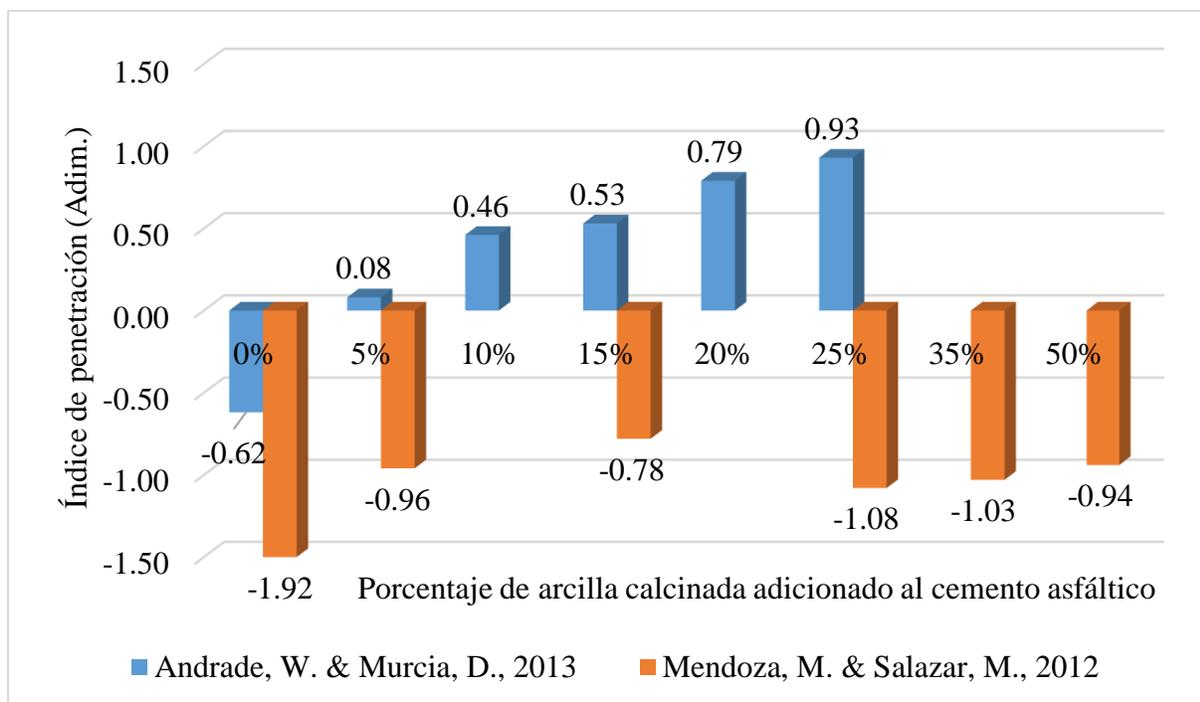


Figura 18. Gráfico de los datos del índice de penetración con arcilla calcinada. Autores, 2021.

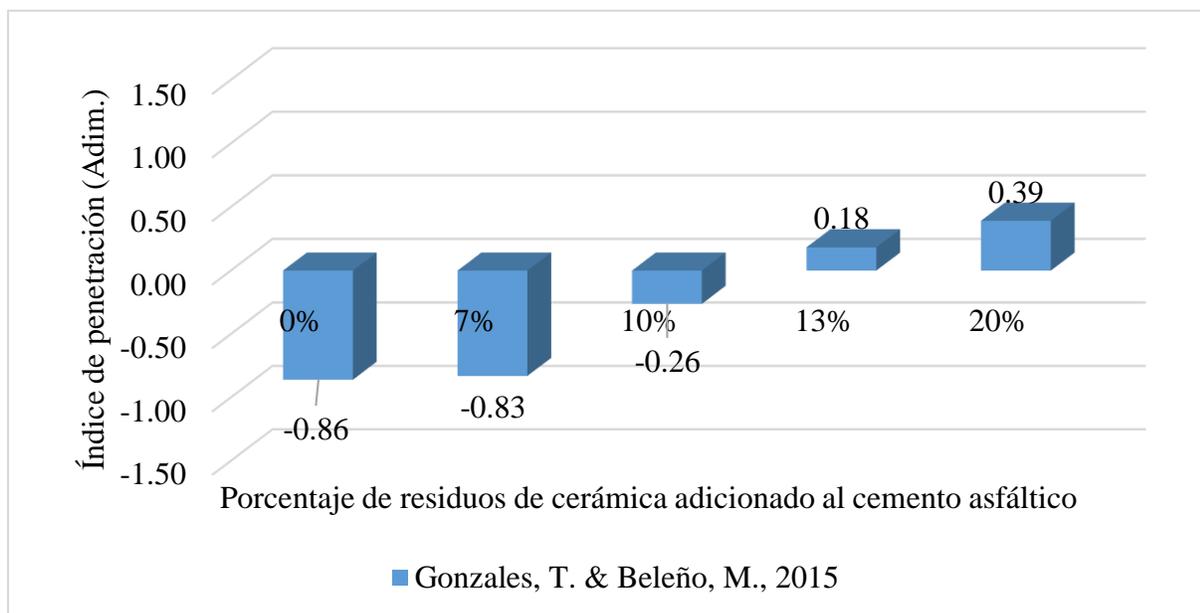


Figura 19. Gráfico de los datos del índice de penetración con residuos de cerámica. Autores, 2021.

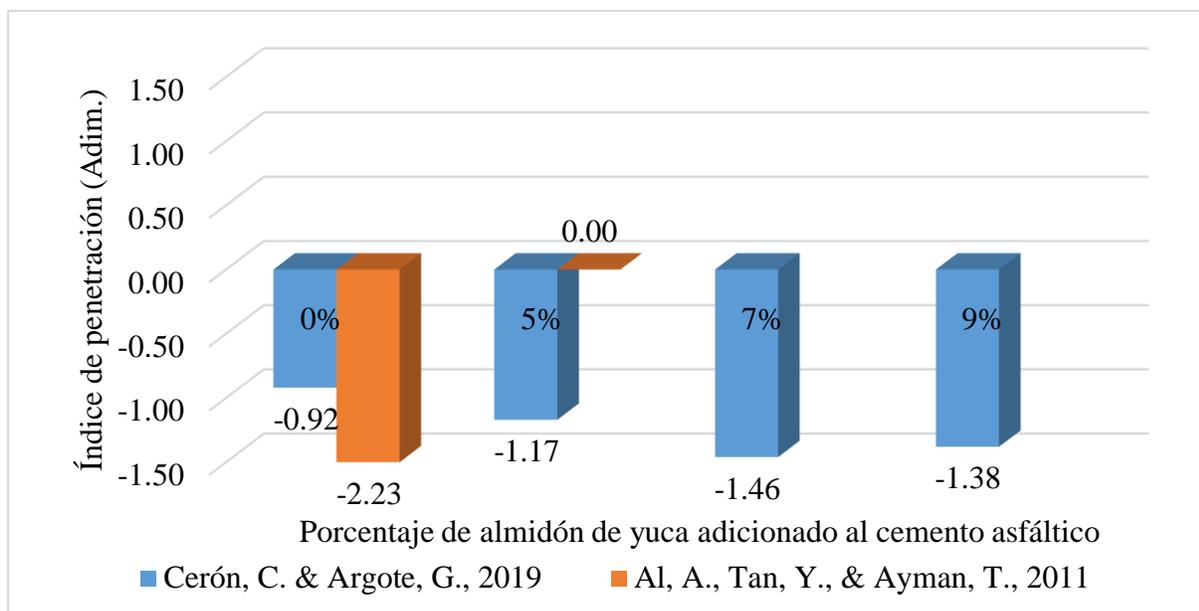


Figura 20. Gráfico de los datos del índice de penetración con almidón de yuca. Autores, 2021.

### 2.3 Ductilidad

La ductilidad es la propiedad con la que se indica la capacidad de deformación del cemento asfáltico al ser sometido a una elongación determinada. El ensayo se realiza con la I.N.V. E-702 *Ductilidad de los materiales asfálticos*, o su norma referente, la ASTM D 113. El ensayo se realiza a una temperatura estándar de 25°C. El procedimiento consiste en estirar una muestra de cemento asfáltico a la temperatura del ensayo y a una velocidad constante hasta que el hilo que une los extremos de la muestra se rompa. La muestra durante el ensayo se encuentra sumergida en el agua. En la figura 21 se observa el ensayo sobre 2 muestras de cemento asfáltico (Mendoza & Salazar, 2012; I.N.V. E-702, 2012).

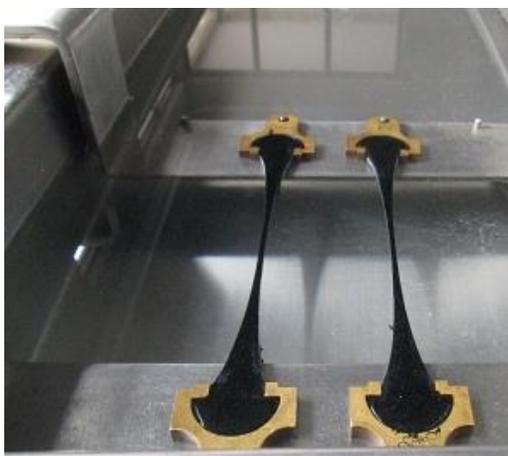


Figura 21. Ensayo de ductilidad en el cemento asfáltico. Obtenido en: [https://www.aconstructoras.com/product\\_info.php?products\\_id=5267](https://www.aconstructoras.com/product_info.php?products_id=5267)

En las tablas 21 a 23 se muestran los resultados recopilados referentes a esta propiedad con los materiales con los cuales se encontró información disponible. Los resultados de cada material se muestran en tablas por separado para facilitar su organización, debido principalmente a que los estudios emplean porcentajes diferentes de adición en el cemento asfáltico.

Tabla 21

*Datos de la ductilidad con adición de polímeros recopilados*

| Autor  | Año  | Unidad | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |       |      |      |      |      |      |
|--|------|--------|--|-------|------|------|------|------|------|
|  |      |        | 0%   | 1%    | 2%   | 3%   | 4%   | 5%   | 6%   |
| Luque, H. & Rincón, A.                         | 2011 |        | 130,0  | 125,0 | 90,0 | 85,0 | 70,0 | 38,0 | 37,0 |
| Castro, Rondón, & Barrero, J.                  | 2015 |        | 105,0  | -     | -    | -    | -    | 55,0 | -    |
| Delgado, et al.                                | 2018 | cm     | 150,0  | -     | -    | -    |      | 35,0 | -    |
| Kishchynskyi, S., Nagaychuk, V. & Bezuglyi, A. | 2016 |        | 100,0  | -     | 53,0 | 43,0 | 38,0 | -    | -    |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 22

*Datos de la ductilidad con adición de caucho reciclado recopilados*

| Autor                          | Año  | Unidad | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |     |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|------|--------|--|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                |      |        | 0%   | 10% | 12%   | 14%   | 16%   | 18%   | 20%   |
| Figueroa, A.<br>& Fonseca, E.  | 2008 | cm     | 150,00   | -   | 35,50 | 41,73 | 29,37 | 28,12 | 29,75 |
| Wulandari, P.<br>& Tjandra, D. | 2017 |        | 100  | 98  | -     | -     | -     | -     | 41,5  |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 23

*Datos de la ductilidad con adición de almidón de yuca recopilados*

| Autor                           | Año  | Unidad | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |       |      |      |
|---------------------------------|------|--------|--|-------|------|------|
|                                 |      |        | 0%   | 5%    | 7%   | 9%   |
| Al, A., Tan, Y., &<br>Ayman, T. | 2011 | cm     | 105,00   | 55,00 | -    | -    |
| Al, A. & Tan, Y.                | 2019 |        | 100  | 82,3  | 73,2 | 68,2 |

*Nota:* Autores, 2021.

Los datos de las tablas anteriores muestran que la adición de polímeros, caucho reciclado y almidón de yuca produce una reducción en la ductilidad del cemento asfáltico. Los polímeros representan una disminución de entre un 3 a 77%; el caucho reciclado de entre 71 a 82%, y el almidón de yuca un 47. El caucho reciclado es el material que mayor disminución produce en la ductilidad. En los gráficos de las figuras 22 a la 24 se muestran los datos de las tablas anteriores:

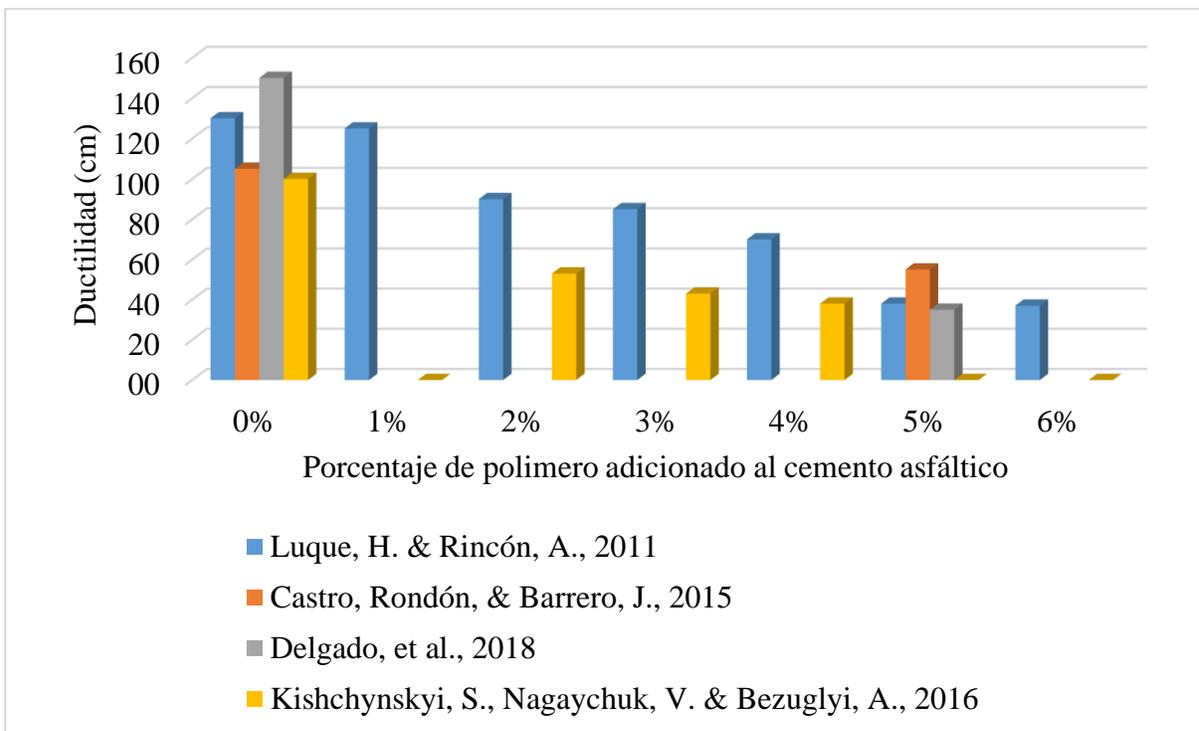


Figura 22. Gráfico de los datos de la ductilidad con polímeros. Autores, 2021.

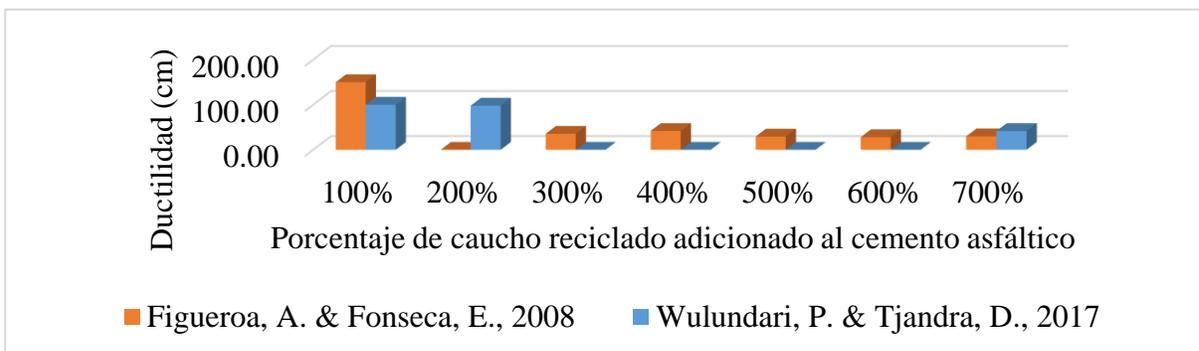


Figura 23. Gráfico de los datos de la ductilidad con caucho reciclado. Autores, 2021.

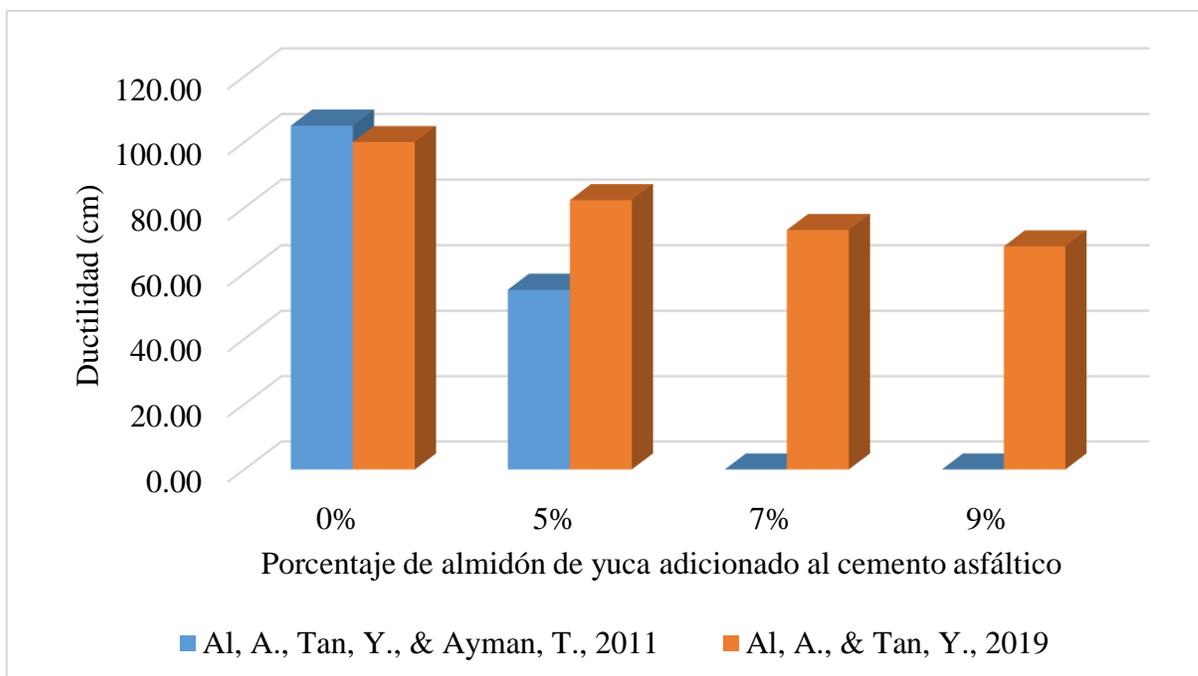


Figura 24. Gráfico de los datos de la ductilidad con almidón de yuca. Autores, 2021.

## 2.4 Punto de ablandamiento

El punto de ablandamiento del cemento asfáltico, es la temperatura en la cual alcanza un estado de fluidez, es decir, cuando empieza a comportarse como un líquido. Este valor puede ser calculado de acuerdo a lo indicado en la I.N.V. E-712 *Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola)*, o con su norma referente, la ASTM D36/D36M. El ensayo consiste en calentar el cemento asfáltico hasta que esté totalmente fluido, se registra la temperatura, después se llenan unos anillos metálicos con este material, se ubica una bola en el centro del anillo y se deja enfriar. Posteriormente se sumerge el anillo con la bola y el asfalto en un baño de agua, calentando el recipiente, hasta que la bola atraviesa la muestra de asfalto y cae

al fondo, se registra esta temperatura como el punto de ablandamiento. En la figura 25 se muestra un ejemplo del dispositivo empleado para realizar este ensayo (I.N.V. E-712, 2012).



*Figura 25.* Equipo para el ensayo de punto de ablandamiento. Obtenido en: <https://www.directindustry.es/prod/tinius-olsen/product-29300-2005290.html>

En las tablas 24 a 28 se muestran los resultados recopilados referentes a esta propiedad para cada uno de los materiales estudiados en este trabajo. Los resultados de cada material se muestran en tablas por separado para facilitar su organización, debido principalmente a que los estudios emplean porcentajes diferentes de adición en el cemento asfáltico.

Tabla 24

*Datos del punto de ablandamiento con adición de polímeros recopilados*

| Autor                         | Año  | Unidad | Material | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------------|------|--------|----------|--|------|------|------|------|------|------|
|                               |      |        |          | 0%   | 1%   | 2%   | 3%   | 4%   | 5%   | 6%   |
| Luque, H. & Rincón, A.        | 2011 |        |          | 50,0   | 54,0 | 55,0 | 58,0 | 60,0 | 64,0 | 65,0 |
| Burak, S. & Giray, I.         | 2007 |        |          | 49,0   | -    | 50,0 | 54,0 | 57,0 | 67,0 | 69,0 |
| Alves, et al.                 | 2016 | °C     | Polímero | 64,0   | -    | 76,0 | 76,0 | -    | -    | 76,0 |
| Delgado, et al.               | 2018 |        |          | 54,0   | -    | -    | -    | -    | 69,0 | -    |
| Castro, Rondón, & Barrero, J. | 2015 |        |          | 50,0   | -    | -    | -    | -    | 61,0 | -    |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 25

*Datos del punto de ablandamiento con adición de caucho reciclado recopilados*

| Autor                      | Año  | Unidad | Material         | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------|------|--------|------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|
|                            |      |        |                  | 0%   | 10%  | 12%  | 14%  | 15%  | 16%  | 18%  | 20%  |
| Figueroa, A. & Fonseca, E. | 2008 | °C     | Caucho Reciclado | 48,0   | -    | 52,0 | 54,7 | -    | 56,9 | 58,7 | 61,0 |
| Goicochea, F.              | 2019 |        |                  | 48,6   | 52,2 | -    | -    | 56,6 | -    | -    | 62,4 |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 26

*Datos del punto de ablandamiento con adición de arcilla calcinada recopilados*

| Autor  | Año  | Unidad | Material          | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |      |      |      |      |      |      |      |
|--|------|--------|-------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|
|  |      |        |                   | 0%   | 5%   | 10%  | 15%  | 20%  | 25%  | 35%  | 50%  |
| Andrade, W. & Murcia, D. Mendoza, M. & Salazar, M. | 2013 | °C     | Arcilla Calcinada | 47,2   | 54,5 | 56,5 | 57,5 | 58,7 | 59,4 | -    | -    |
|  | 2012 |        |                   | 45,0   | 48,6 | -    | 49,9 | -    | 51,0 | 51,7 | 56,1 |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 27

*Datos del punto de ablandamiento con adición de residuos de cerámica recopilados*

| Autor                     | Año  | Unidad | Material | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |      |      |      |      |
|---------------------------|------|--------|----------|--|------|------|------|------|
|                           |      |        |          | 0%   | 7%   | 10%  | 13%  | 20%  |
| Gonzales, T. & Beleño, M. | 2015 | °C     | Cerámica | 48,9   | 50,4 | 52,8 | 54,9 | 56,9 |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 28

*Datos del punto de ablandamiento con adición de almidón de yuca recopilados*

| Autor                        | Año  | Unidad | Material        | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |      |      |      |
|------------------------------|------|--------|-----------------|--|------|------|------|
|                              |      |        |                 | Sin modificar<br>0%                                    | 5%   | 7%   | 9%   |
| Cerón, C. & Argote, G.       | 2019 | °C     | Almidón de yuca | 48,3   | 48,4 | 48,6 | 48,9 |
| Al, A., Tan, Y., & Ayman, T. | 2011 |        |                 | 42,0   | 56,0 | -    | -    |

*Nota:* Autores, 2021.

Se observa en el conjunto de datos anteriores que la adición de cualquier material considerado en este trabajo produce un aumento en el punto de ablandamiento del cemento asfáltico. Los polímeros representan un aumento de entre el 2 y el 40%, el caucho reciclado de entre 7 y 30%, la arcilla calcinada entre 8 y 26%, la cerámica entre un 3 y 16%, y el almidón de yuca entre un 1 a 34%. El material que mayor aumento produce es el polímero. El almidón de yuca y los residuos de cerámica son los que menos alteran esta propiedad. En los gráficos de las figuras 26 a la 30 se muestran los datos de las tablas anteriores:

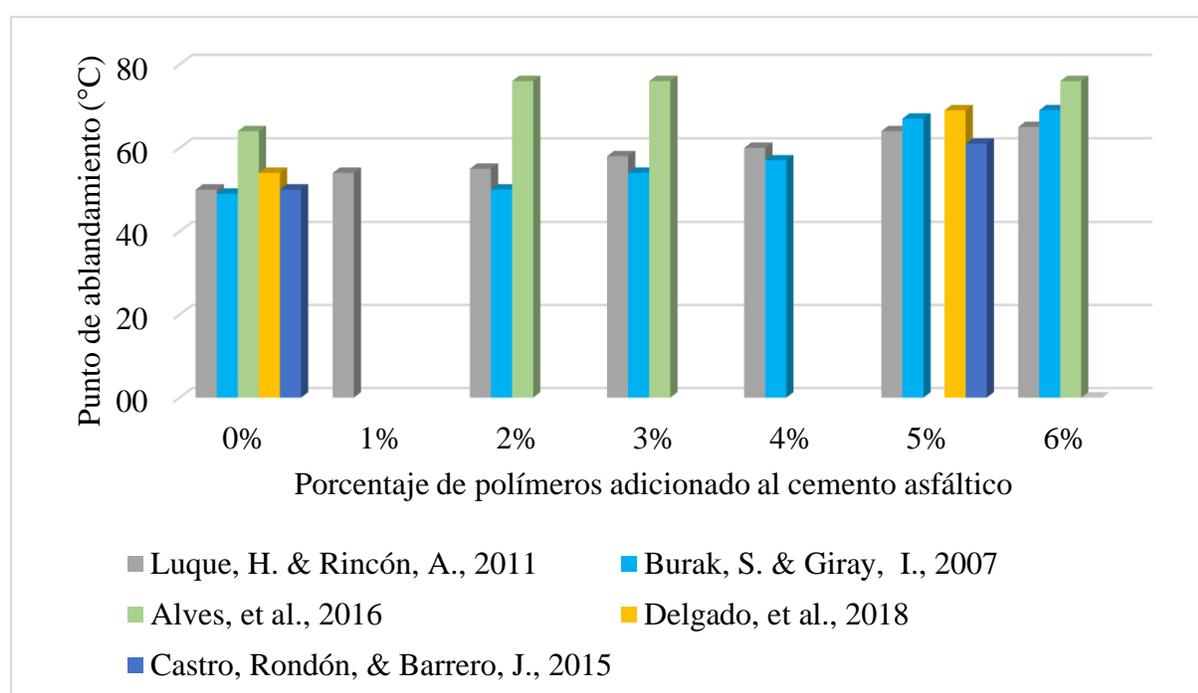


Figura 26. Gráfico de los datos del punto de ablandamiento con polímeros. Autores, 2021.

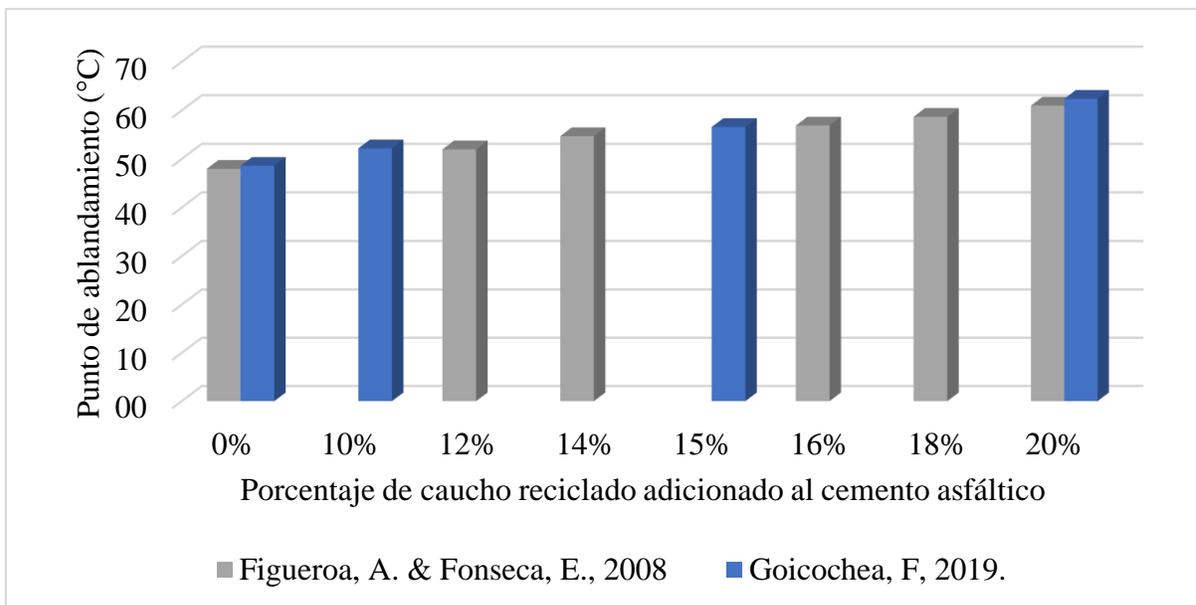


Figura 27. Gráfico de los datos del punto de ablandamiento con caucho reciclado. Autores, 2021.

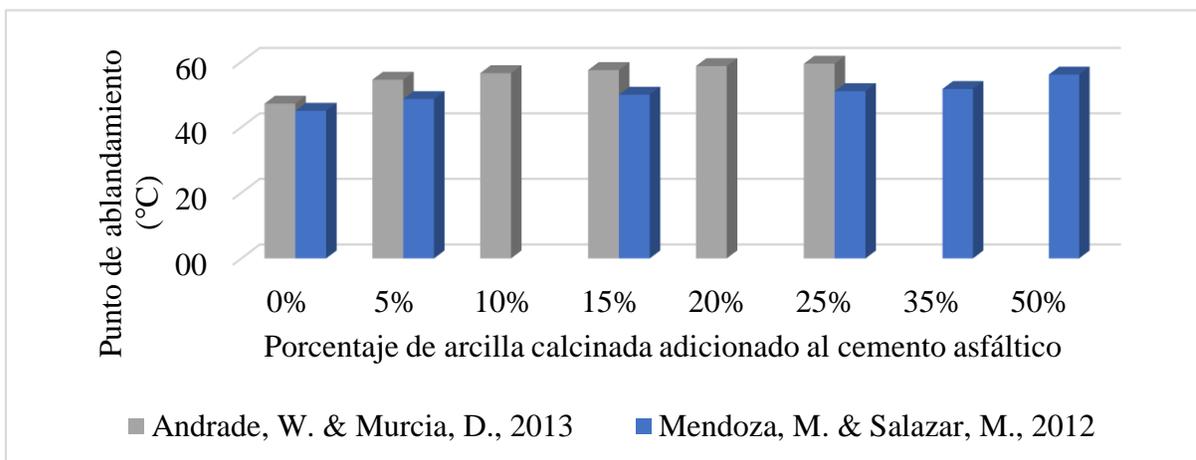


Figura 28. Gráfico de los datos del punto de ablandamiento con arcilla calcinada. Autores, 2021.

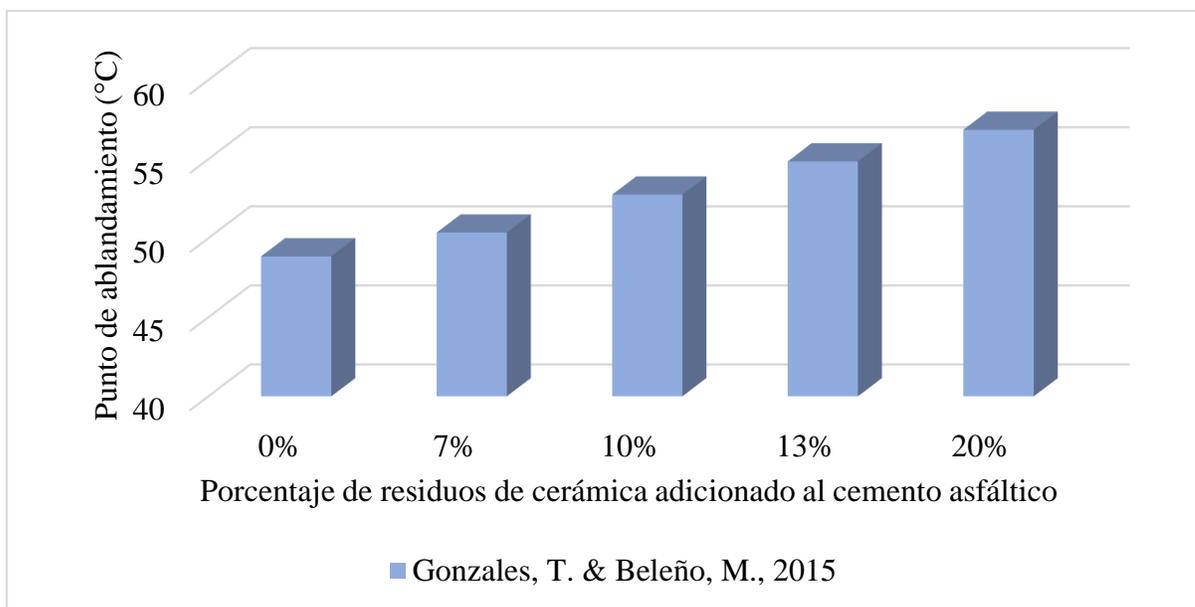


Figura 29. Gráfico de los datos del punto de ablandamiento con residuos de cerámica. Autores, 2021.

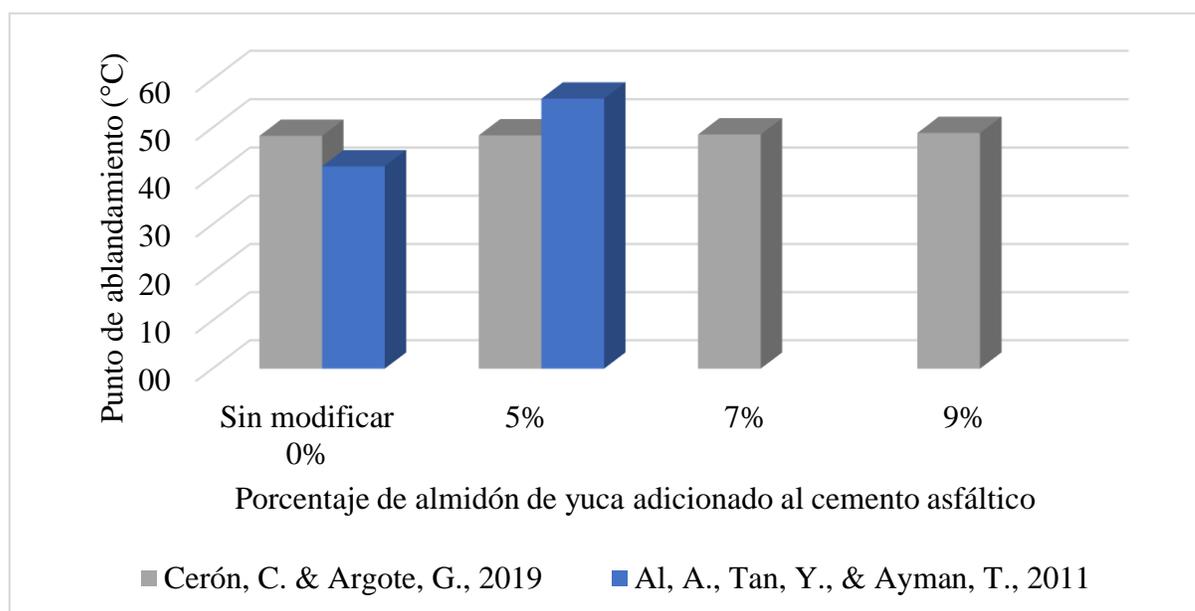


Figura 30. Gráfico de los datos del punto de ablandamiento con almidón de yuca. Autores, 2021.

## 2.5 Viscosidad

La viscosidad indica la resistencia a la deformación del fluido, en este caso el cemento asfáltico. Entre mayor sea el valor de esta, mayor será la resistencia a fluir en comparación con un fluido que fluye con mayor facilidad. Esta propiedad se caracteriza por ser inversamente proporcional a la temperatura, entre mayor temperatura, menor valor. Es una propiedad donde se relaciona el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación (Mendoza & Salazar, 2012; Andrade & Murcia, 2013).

El valor de la viscosidad en el cemento asfáltico comúnmente es calculada a partir de la norma I.N.V. E-717 *Determinación de la viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional*, o de su norma referente, la AASHTO T 316. El método de ensayo consiste en colocar una pequeña cantidad del cemento asfáltico en un recipiente (viscosímetro rotacional, ver figura 31) a temperatura constante. El recipiente es programado para realizar movimientos de rotación a una velocidad máxima de 50 Rpm y a un torque de 1% hasta obtener una velocidad igual a cero. El procedimiento se realiza para cada cambio de temperatura a considerar (el rango oscila entre 60°C hasta más de 200°C) (I.N.V. E-717, 2012).



Figura 31. Viscosímetro rotacional. Obtenido en: <https://www.amazon.com/NDJ-1F-Rotational-Brookfield-Viscometer-mPa%C2%B7s%EF%BD%9E1%C3%97107/dp/B00LSO3D06>

En las tablas 29 a 33 se muestran los resultados recopilados referentes a esta propiedad para cada uno de los materiales estudiados en este trabajo. Los resultados de cada material se muestran en tablas por separado para facilitar su organización, debido principalmente a que los estudios emplean porcentajes diferentes de adición en el cemento asfáltico. El valor de la viscosidad se recopiló para una temperatura de 100 °C.

Tabla 29

*Datos de la viscosidad con adición de polímeros recopilados*

| Autor                           | Año  | Unidad | Material | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |        |        |        |        |        |        |
|---------------------------------|------|--------|----------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                 |      |        |          | 0%   | 1%     | 2%     | 3%     | 4%     | 5%     | 6%     |
| Luque,<br>H. &<br>Rincón,<br>A. | 2011 | cP     | Polímero | 1320,0   | 1342,0 | 1356,0 | 1362,0 | 1368,0 | 1372,0 | 1384,0 |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 30

*Datos de la viscosidad con adición de caucho reciclado recopilados*

| Autor                      | Año  | Unidad | Material         | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |       |        |        |        |        |
|----------------------------|------|--------|------------------|--|-------|--------|--------|--------|--------|
|                            |      |        |                  | 0%   | 12%   | 14%    | 16%    | 18%    | 20%    |
| Figueroa, A. & Fonseca, E. | 2008 | cP     | Caucho Reciclado | 610,0  | 847,0 | 1120,0 | 1440,0 | 2346,0 | 2966,0 |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 31

*Datos de la viscosidad con adición de arcilla calcinada recopilados*

| Autor                     | Año  | Unidad | Material          | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |        |       |        |        |        |        |        |
|---------------------------|------|--------|-------------------|--|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                           |      |        |                   | 0%   | 5%     | 10%   | 15%    | 20%    | 25%    | 35%    | 50%    |
| Andrade, W. & Murcia, D.  | 2013 | cP     | Arcilla Calcinada | 494,0  | 596,4  | 647,8 | 1040,0 | 1600,0 | 1832,5 | -      | -      |
| Mendoza, M. & Salazar, M. | 2012 |        |                   | 2714,3   | 3166,3 | -     | 3362,0 | 3982,3 | -      | 4269,7 | 5714,0 |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 32

*Datos de la viscosidad con adición de residuos de cerámica recopilados*

| Autor                     | Año  | Unidad | Material | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |        |        |        |        |
|---------------------------|------|--------|----------|--|--------|--------|--------|--------|
|                           |      |        |          | 0%   | 7%     | 10%    | 13%    | 20%    |
| Gonzales, T. & Beleño, M. | 2015 | cP     | Cerámica | 1500,0   | 1550,0 | 1750,0 | 1820,0 | 2000,0 |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 33

*Datos de la viscosidad con adición de almidón de yuca recopilados*

| Autor                  | Año  | Unidad | Material        | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |        |        |        |
|------------------------|------|--------|-----------------|--|--------|--------|--------|
|                        |      |        |                 | Sin modificar<br>0%                                    | 5%     | 7%     | 9%     |
| Cerón, C. & Argote, G. | 2019 | cP     | Almidón de yuca | 1980,0   | 2290,0 | 2920,0 | 2990,0 |

*Nota:* Autores, 2021.

Los datos recopilados sobre la viscosidad indican que todos los materiales estudiados (polímero, caucho reciclado, arcilla calcinada, residuos de cerámica y almidón de yuca) tienden a aumentar esta propiedad en el cemento asfáltico. Los polímeros aumenta la viscosidad hasta un 4%, el caucho reciclado entre un 38 a 388%, la arcilla calcinada entre un 16 a 270%, la cerámica entre un 3 a 35%, y el almidón de yuca entre un 15 a 51%. El material con mayor efecto sobre la viscosidad es el caucho reciclado, y el que menor produce son los polímeros. En los gráficos de las figuras 32 a 36 se muestran los datos de las tablas anteriores:

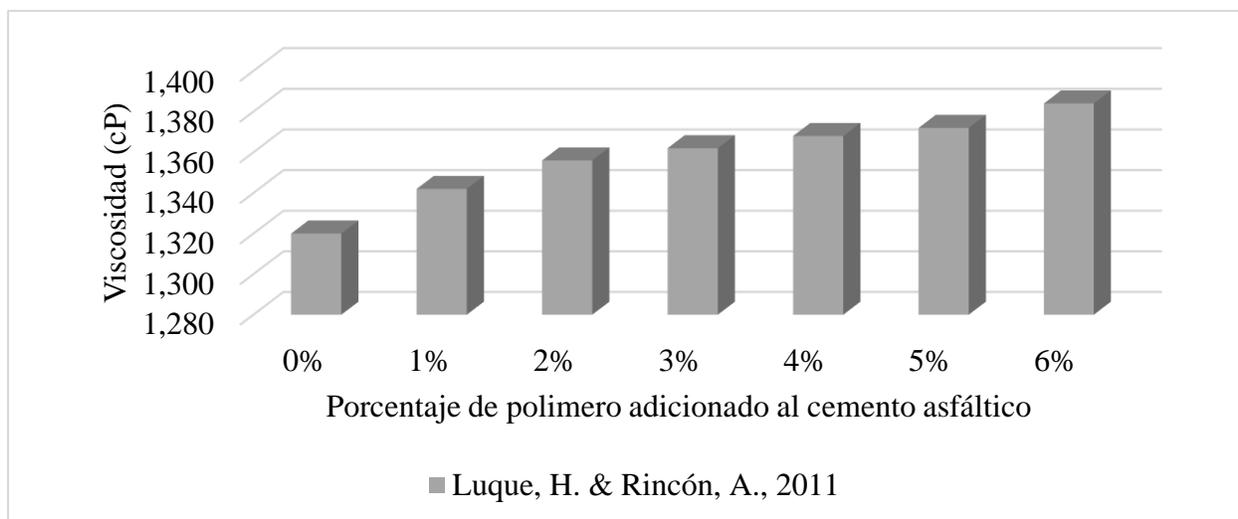


Figura 32. Gráfico de los datos de la viscosidad con polímeros. Autores, 2021.

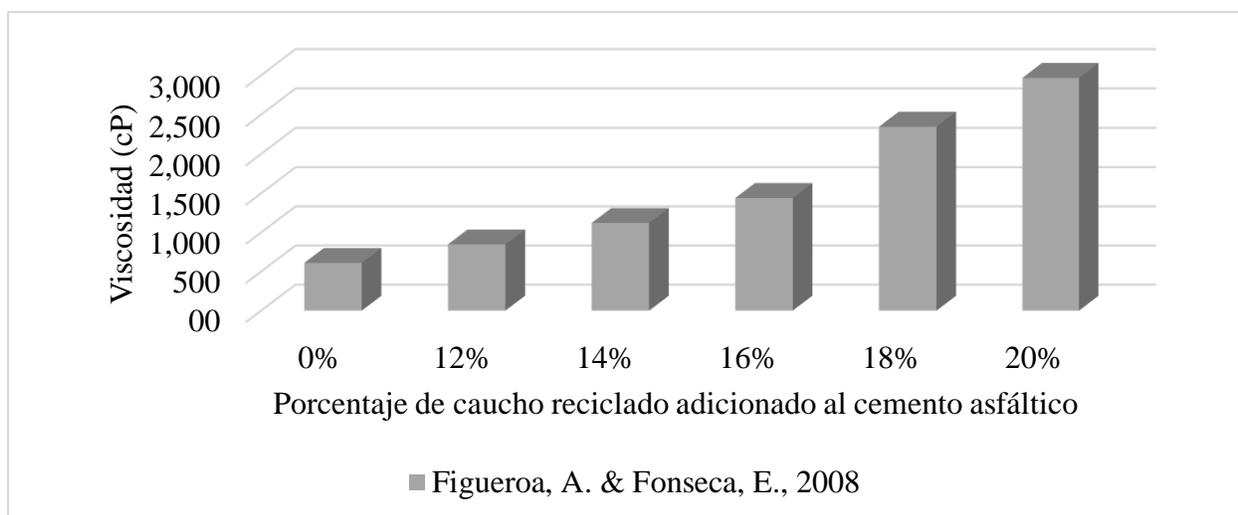


Figura 33. Gráfico de los datos de la viscosidad con caucho reciclado. Autores, 2021.

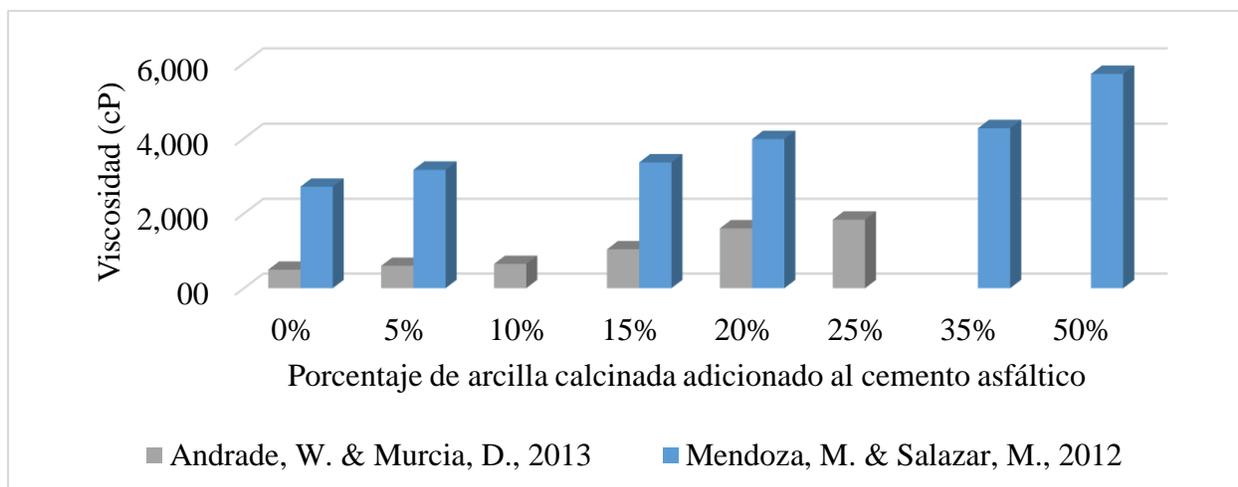


Figura 34. Gráfico de los datos de la viscosidad con arcilla calcinada. Autores, 2021.

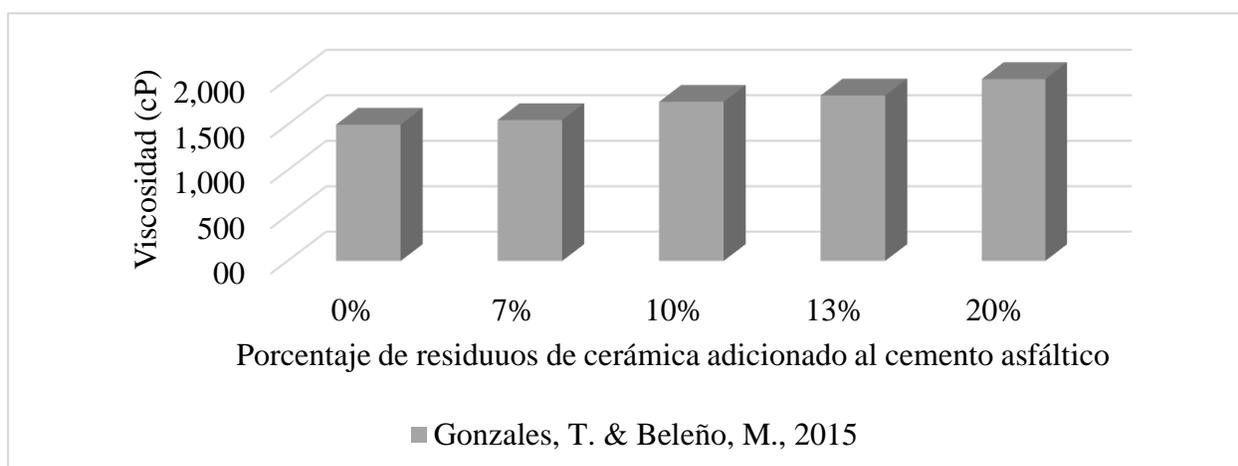


Figura 35. Gráfico de los datos de la viscosidad con residuos de cerámica. Autores, 2021.

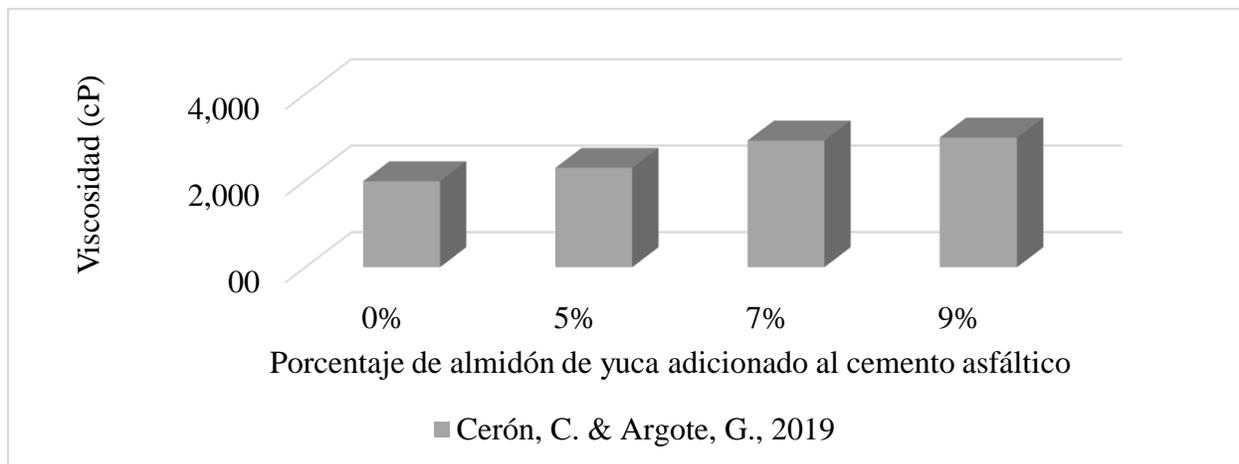


Figura 36. Gráfico de los datos de la viscosidad con almidón de yuca. Autores, 2021.

## **Capítulo 3. Propiedades mecánicas del cemento asfáltico**

Los dos capítulos anteriores se centraron en mostrar las propiedades físico-químicas y reológicas del cemento asfáltico con la adición de los materiales considerados en este trabajo. En el presente capítulo se muestran las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en las cuales se adicionó el cemento asfáltico modificado, indicando el porcentaje de adición de cada material.

### **3.1 Estabilidad y flujo**

La estabilidad del cemento asfáltico indica su capacidad para resistir desplazamientos y deformaciones bajo las cargas del tránsito; mientras que el flujo hace referencia directa a la máxima deformación que se presenta en una muestra de cemento asfáltico al punto de su máxima carga. Ambas propiedades se calculan mediante los procedimientos descritos en la I.N.V. E-748: Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo marshall (INVIAS, 2012).

#### **3.1.1 Estabilidad.**

En las tablas 34 a 38 se muestran los resultados recopilados referentes a la estabilidad para los materiales sobre los cuales se encontró información disponible.

Tabla 34

*Datos de la estabilidad con adición de polímeros recopilados*

| Autor                 | Año  | Unidad | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |       |       |      |
|-----------------------|------|--------|--|-------|-------|------|
|                       |      |        | 0%   | 1%    | 3%    | 6%   |
| Jebur, Y. & Imran, M. | 2017 | kN     | 10,5   | 11,98 | 11,64 | 10,8 |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 35

*Datos de la estabilidad con adición de caucho reciclado recopilados*

| Autor                      | Año  | Unidad | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |       |       |       |       |       |
|----------------------------|------|--------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
|                            |      |        | 0%   | 3%    | 5%    | 10%   | 15%   | 20%   |
| Campana, Galeas & Guerrero | 2015 |        | 30,63  | -     | -     | 62,35 | 49,62 | 41,50 |
| Carrizales, J.             | 2015 | kN     | 9,27   | 17,93 | -     | -     | -     | -     |
| Issa, Y.                   | 2016 |        | 10,33  | -     | -     | 14,48 | 14,18 | -     |
| Majeed, M.                 | 2017 |        | 13,03  | -     | 17,28 | 18,27 | 19,20 | -     |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 36

*Datos de la estabilidad con adición de arcilla calcinada recopilados*

| Autor      | Año  | Unidad | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |      |      |      |      |
|------------|------|--------|--|------|------|------|------|
|            |      |        | 0%   | 5%   | 10%  | 15%  | 20%  |
| Majeed, M. | 2017 | kN     | 6,82   | 7,38 | 8,27 | 9,12 | 9,89 |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 37

Datos de la estabilidad con adición de cerámica recopilados

| Autor                   | Año  | Unidad | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |       |       |       |       |
|-------------------------|------|--------|--|-------|-------|-------|-------|
|                         |      |        | 0%   | 10%   | 20%   | 30%   | 50%   |
| Kara, C. & Karacasu, M. | 2015 | kN     | 19,24  | 16,24 | 14,84 | -     | -     |
| Silvestre, R., et al.   | 2013 |        | 18,00  | -     | -     | 16,02 | 11,06 |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 38

Datos de la estabilidad con adición de almidón de yuca recopilados

| Autor                        | Año  | Unidad | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |      |     |     |
|------------------------------|------|--------|--|------|-----|-----|
|                              |      |        | 0%   | 5%   | 6%  | 7%  |
| Al, A., Tan, Y., & Ayman, T. | 2011 | kN     | 6,81   | 7,57 |     |     |
| Al, A. & Tan, Y.             | 2019 |        | 7,2  | 7,9  | 8,2 | 8,5 |

*Nota:* Autores, 2021.

Se observa en el conjunto de datos anteriores lo siguiente: la adición de polímeros, caucho reciclado, arcilla calcinada y almidón de yuca, produce un aumento de la estabilidad entre un 14%, 48%, 45%, y 18%, respectivamente, siendo el caucho reciclado el que mayor aumento de la estabilidad produce. Mientras que la adición de cerámica, de forma contraria a los demás materiales, genera una disminución de la estabilidad hasta en un 38%. En los gráficos de las figuras 37 a 41 se muestran los datos de las tablas anteriores:

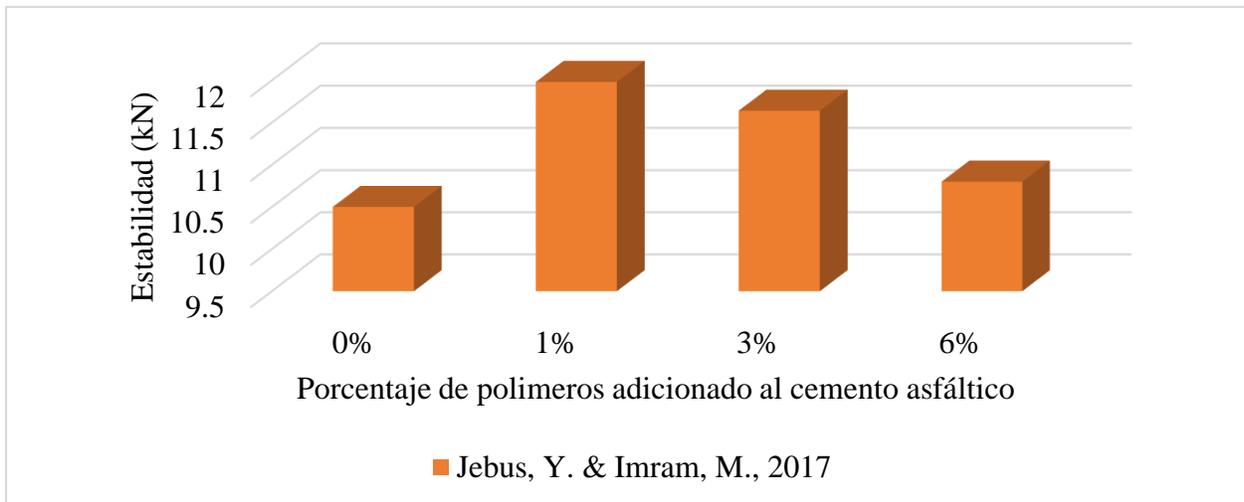


Figura 37. Gráfico de los datos de la estabilidad con polímeros. Autores, 2021.

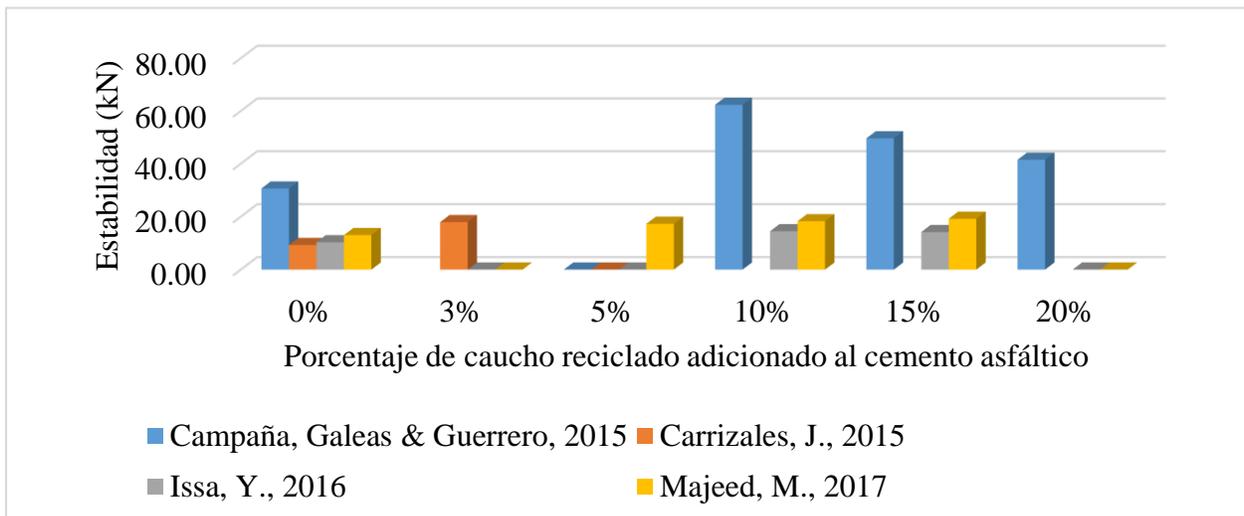


Figura 38. Gráfico de los datos de la estabilidad con caucho reciclado. Autores, 2021.

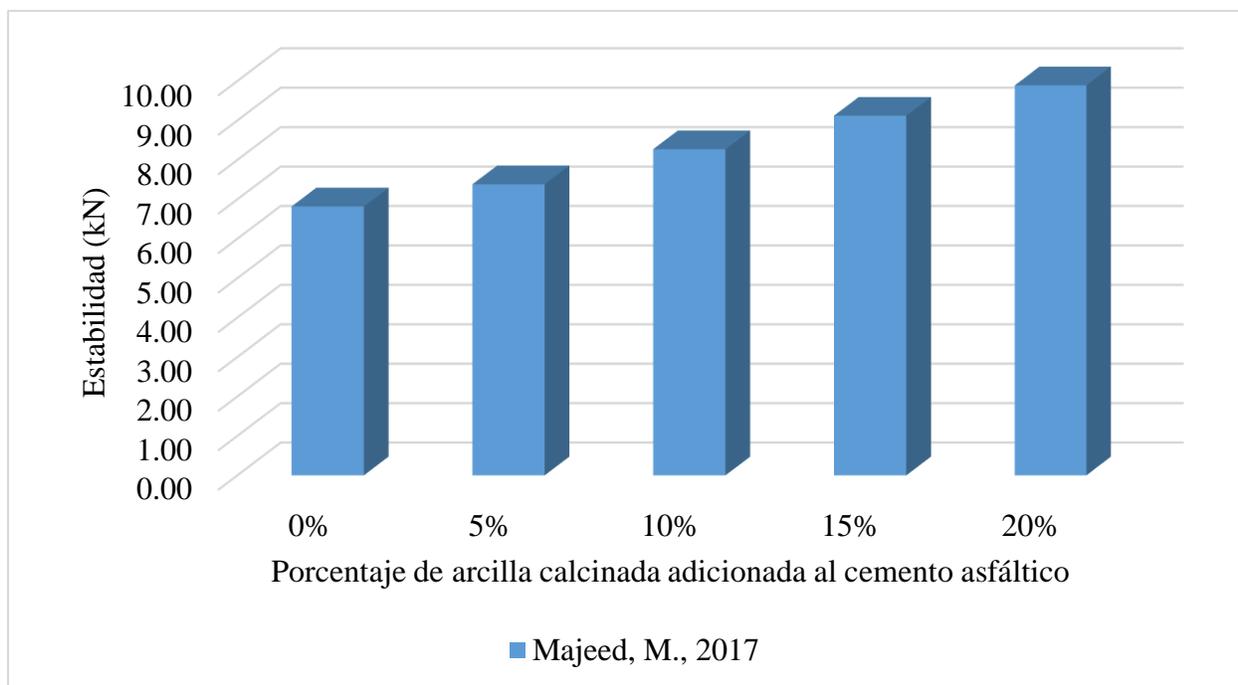


Figura 39. Gráfico de los datos de la estabilidad con arcilla calcinada. Autores, 2021.

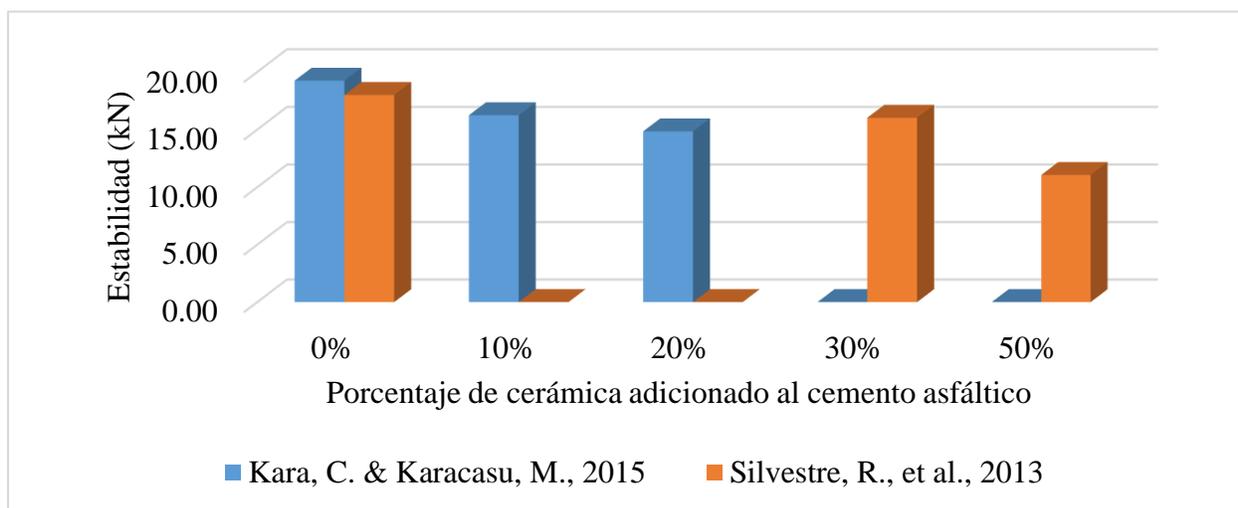


Figura 40. Gráfico de los datos de la estabilidad con cerámica. Autores, 2021.

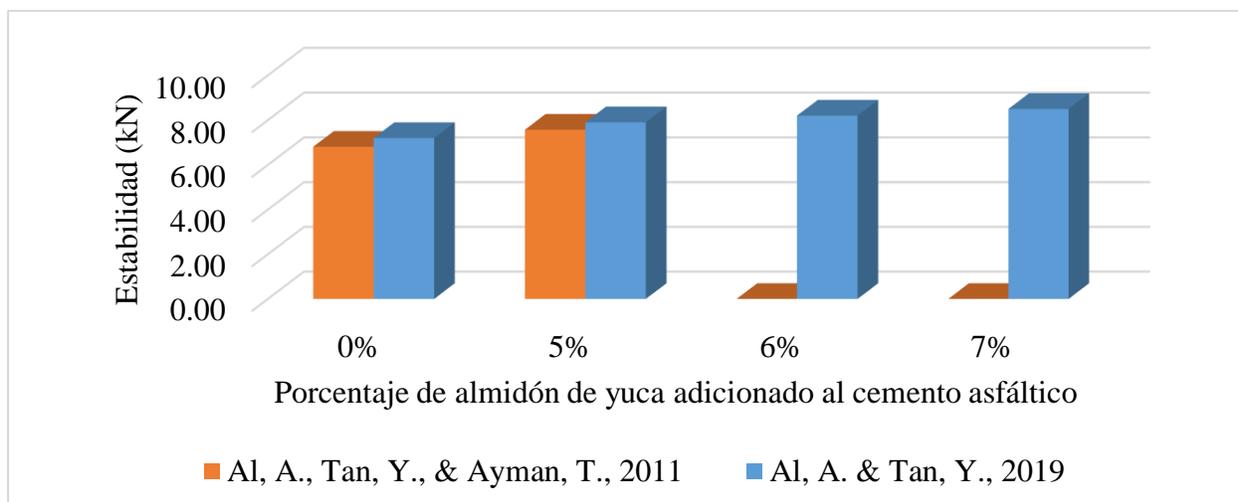


Figura 41. Gráfico de los datos de la estabilidad con almidón de yuca. Autores, 2021.

### 3.1.2 Flujo.

En las tablas 39 a 43 se muestran los resultados recopilados referentes al flujo para los materiales sobre los cuales se encontró información disponible.

Tabla 39

*Datos del flujo con adición de polímero recopilados*

| Autor                 | Año  | Unidad | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |      |      |      |
|-----------------------|------|--------|--|------|------|------|
|                       |      |        | 0%   | 1%   | 3%   | 6%   |
| Jebur, Y. & Imran, M. | 2017 | mm     | 3,81   | 3,89 | 3,94 | 4,03 |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 40

*Datos del flujo con adición de caucho reciclado recopilados*

| Autor                       | Año  | Unidad | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |      |      |       |       |       |
|-----------------------------|------|--------|--|------|------|-------|-------|-------|
|                             |      |        | 0%   | 3%   | 5%   | 10%   | 15%   | 20%   |
| Campaña, Galeas & Guerrero  | 2015 | mm     | 12,00  | -    | -    | 17,50 | 16,00 | 12,40 |
| Carrizales, J.              | 2015 |        | 4,81   | 7,03 | -    | -     | -     | -     |
| Wulandari, P. & Tjandra, D. | 2017 |        | 3,56   | -    | -    | 3,56  | -     | 3,90  |
| Issa, Y.                    | 2016 |        | 3,98   | .    | 4,06 | 4,31  | -     | 4,96  |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 41

*Datos del flujo con adición de arcilla calcinada recopilados*

| Autor      | Año  | Unidad | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |      |       |       |       |
|------------|------|--------|--|------|-------|-------|-------|
|            |      |        | 0%   | 5,0% | 10,0% | 15,0% | 20,0% |
| Majeed, M. | 2017 | mm     | 3,22   | 3,37 | 4,00  | 4,03  | 4,12  |

*Nota:* Autores, 2021.

Tabla 42

*Datos del flujo con adición de cerámica recopilados*

| Autor                   | Año  | Unidad | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |       |       |       |       |       |
|-------------------------|------|--------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         |      |        | 0%   | 10,0% | 20,0% | 30,0% | 40,0% | 50,0% |
| Kara, C. & Karacasu, M. | 2015 | mm     | 2,56   | 2,42  | 2,96  | 2,98  | 4,32  | -     |
| Silvestre, R., et al.   | 2013 |        | 2,40   | -     | -     | 2,36  | -     | 2,48  |

*Nota:* Autores, 2021.

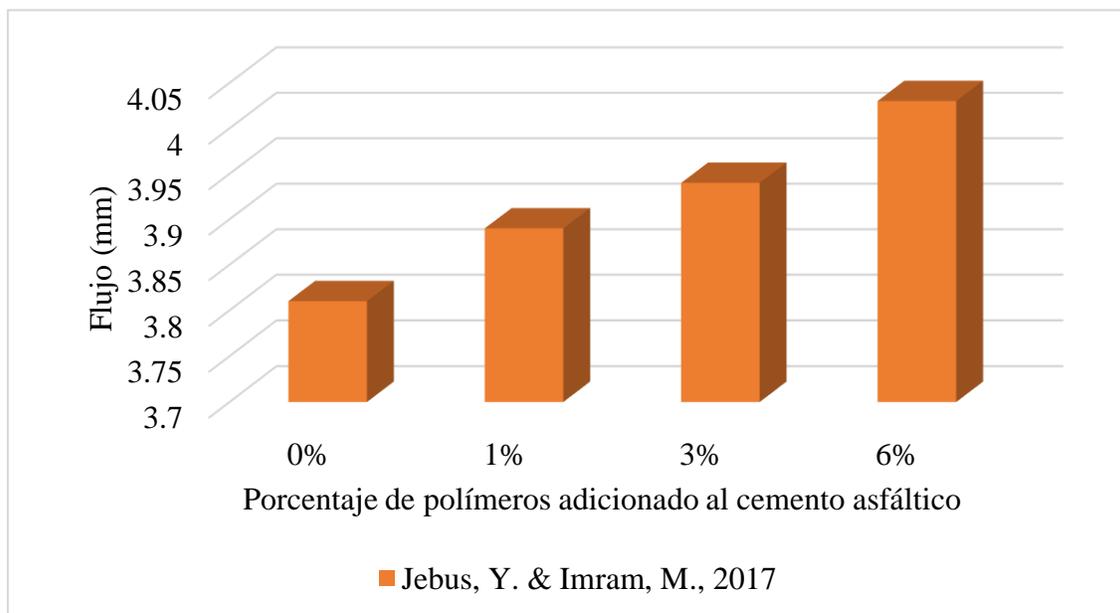
Tabla 43

*Datos del flujo con adición de almidón de yuca recopilados*

| Autor                        | Año  | Unidad | Porcentaje de material adicionado al cemento asfáltico |      |     |     |
|------------------------------|------|--------|--|------|-----|-----|
|                              |      |        | 0%   | 5%   | 6%  | 7%  |
| Al, A., Tan, Y., & Ayman, T. | 2011 | mm     | 3,12   | 4,14 | -   | -   |
| Al, A. & Tan, Y.             | 2019 |        | 3,2  | 3,5  | 3,6 | 3,9 |

*Nota:* Autores, 2021.

Se observa en el conjunto de datos recopilados, que la adición de los materiales produce un aumento en el flujo del cementos asfáltico, siendo el almidón de yuca el que mayor efecto produce con un aumento de hasta un 32%, seguido de la arcilla calcinada con 27%, el caucho reciclado con 25%, los polímeros con 6%, y por último la cerámica con un porcentaje de aumento menor al 2%. En los gráficos de las figuras 42 a 46 se muestran los datos de las tablas anteriores:



*Figura 42.* Gráfico de los datos del flujo con polímeros. Autores, 2021.

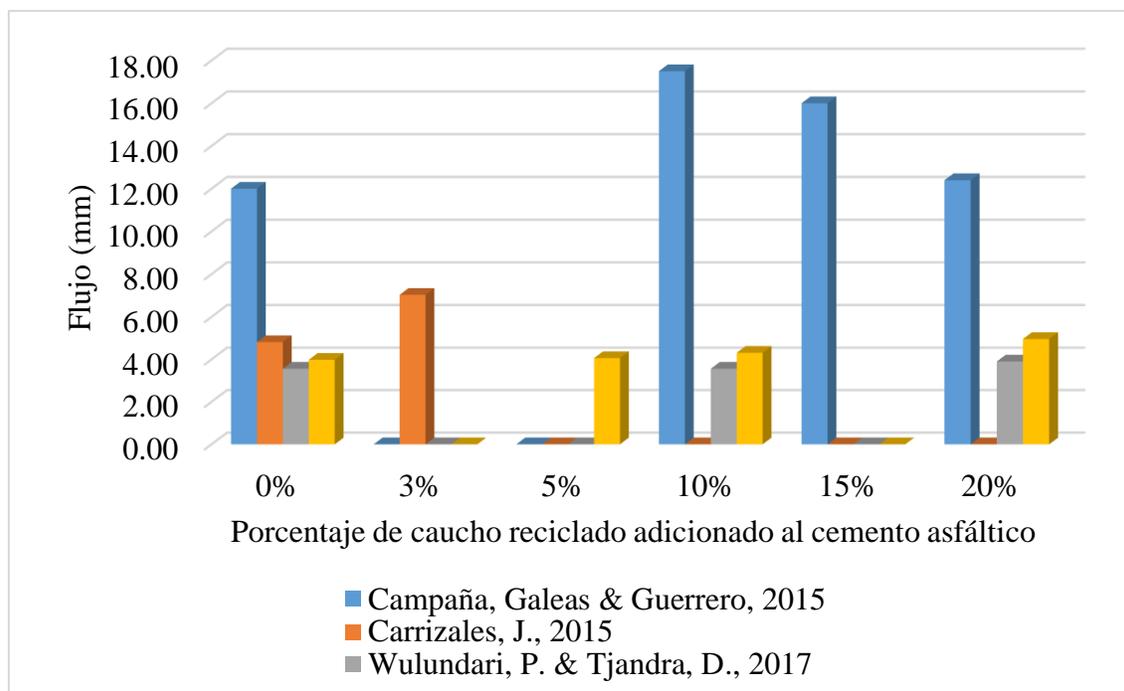


Figura 43. Gráfico de los datos del flujo con caucho reciclado. Autores, 2021.

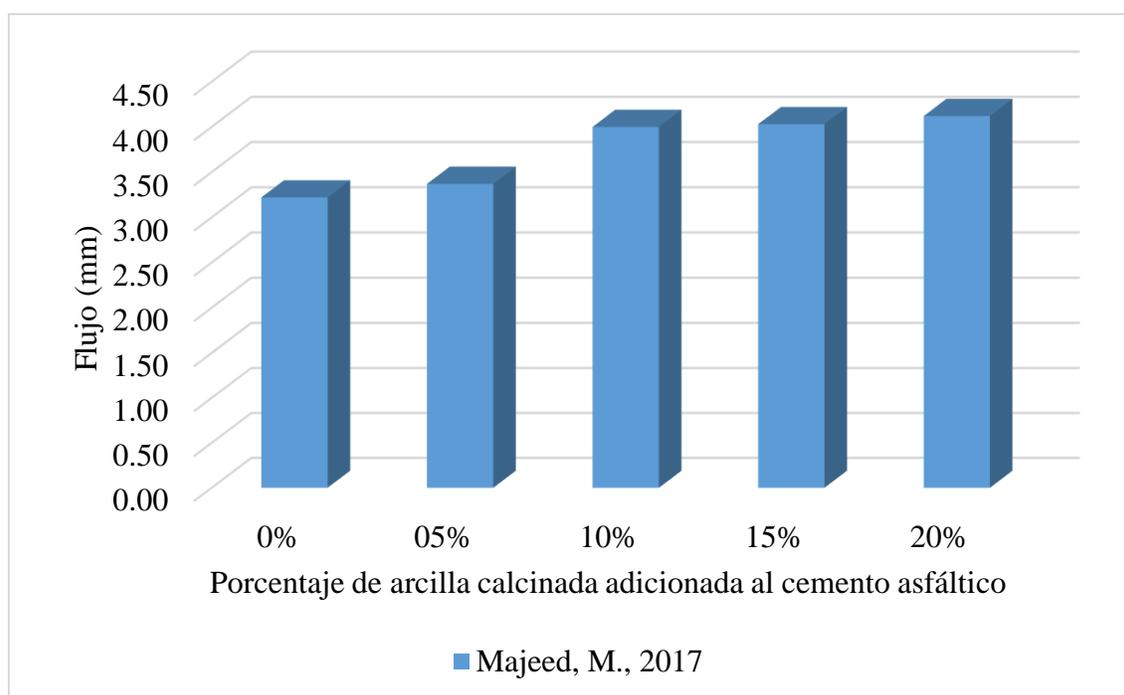


Figura 44. Gráfico de los datos del flujo con arcilla calcinada. Autores, 2021.

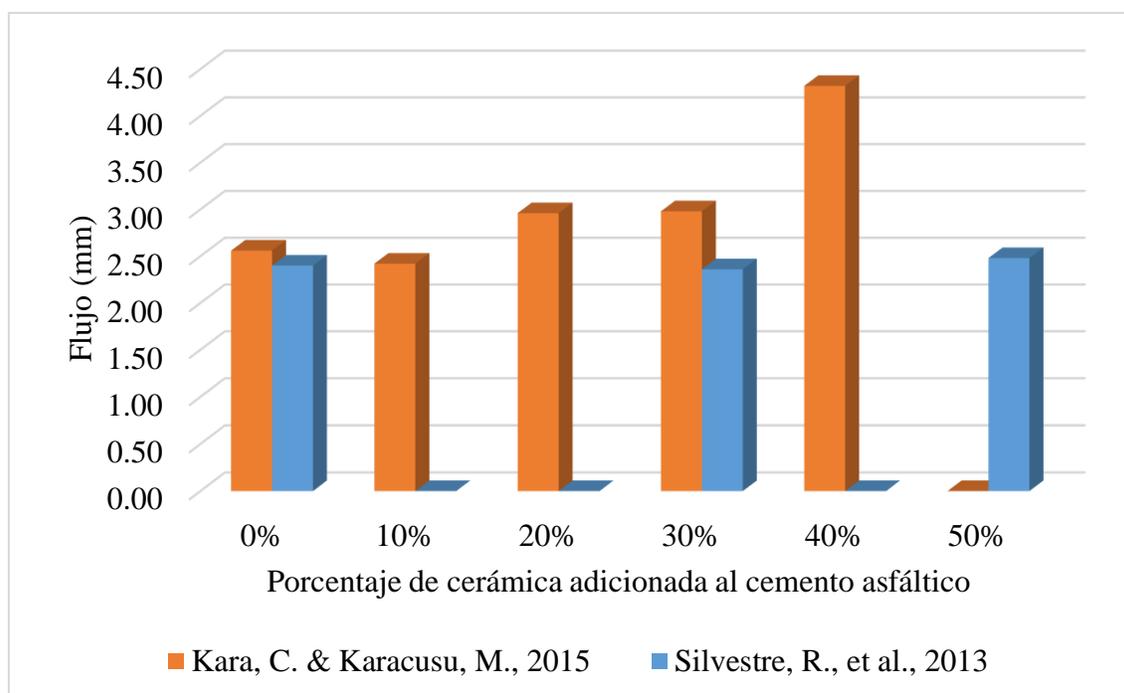


Figura 45. Gráfico de los datos del flujo con cerámica. Autores, 2021.

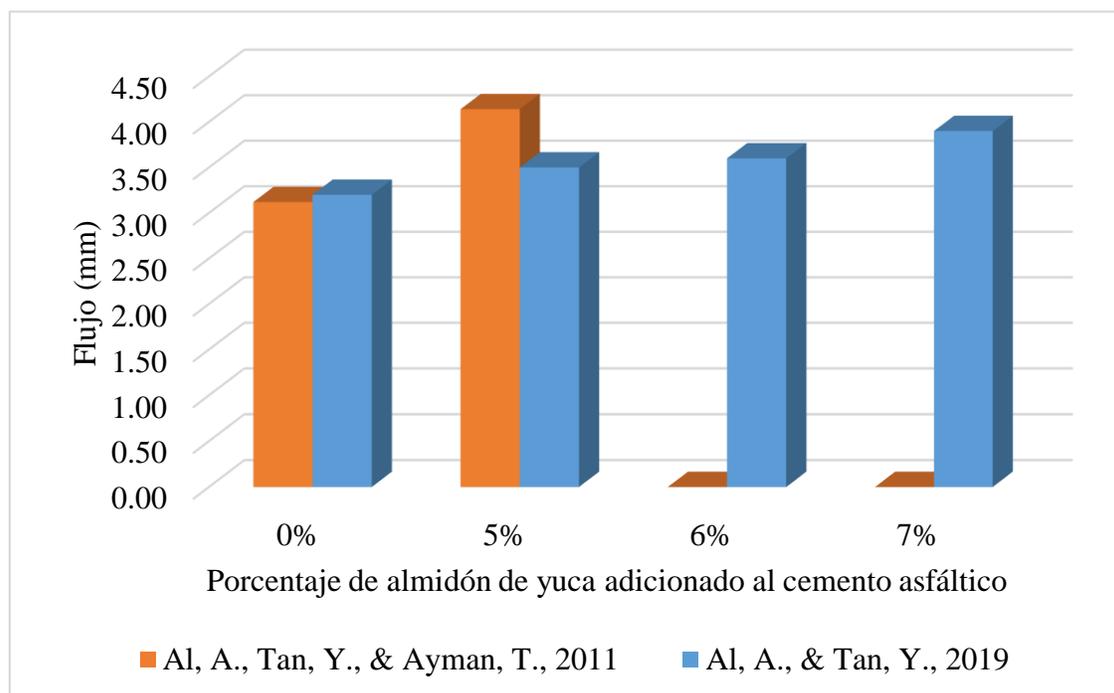


Figura 46. Gráfico de los datos del flujo con almidón de yuca. Autores, 2021.

### 3.2 Resumen de las propiedades recopiladas

En el desarrollo de este trabajo se recopilaron 3 conjuntos de propiedades referentes al cemento asfáltico con adición de polímeros, caucho reciclado, arcilla calcinada, cerámica y almidón de yuca. El primero conjunto fueron las propiedades físicas: gravedad específica máxima y punto de ignición. El segundo conjunto fueron las propiedades reológicas: penetración, índice de penetración, ductilidad, punto de ablandamiento y viscosidad. Y por último, el tercer conjunto fueron las propiedades mecánicas: Estabilidad y Flujo. Un total de 9 propiedades. En la siguiente tabla se describen los aspectos más importantes de las propiedades, así como los porcentajes de adición considerados como óptimos en cada investigación. En tabla 44 se muestra el resumen de las propiedades del cemento asfáltico recopiladas y el efecto producido por la adición de los materiales estudiados.

Tabla 44

Resumen del efecto de los materiales adicionadas al cemento asfáltico en sus propiedades

| Característica  | Efecto porcentual por la adición de cada material |                      |                      |                      |                        |
|---|---|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
|   | Polímero  | Caucho Reciclado     | Arcilla Calcinada    | Residuos de Cerámica | Almidón de yuca        |
| Cantidad de material recomendado para adicionar en el cemento asfáltico | 3% - 6%   | 15% - 20%            | 20% - 50%            | 20% - 30%            | 5% - 6%                |
| Gravedad específica máxima, disminución                                 | -   | 1 - 2,28%            | 2,58-4%              | -                    | -                      |
| Punto de Ignición, reducción  | 2,4-3,5%  | 1-6%                 | -                    | -                    | -                      |
| Penetración, disminución  | 3% - 58%  | Hasta un 38%         | 3 - 35%              | 13 - 23%             | 6 - 17%                |
| Índice de penetración   | Aumenta   | Aumenta              | Aumenta              | Aumenta              | Disminuye              |
| Ductilidad, reducción   | 3 - 77%   | 71 - 82%             | -                    | -                    | Hasta un 47%           |
| Punto de Ablandamiento, aumento   | 2 - 40%   | 7 -30%               | 8 - 26%              | 3-16%                | 1 - 34%                |
| Viscosidad, aumento   | 1 - 4%  | 38 - 388%            | 16 - 270%            | 3 - 35%              | 15 - 51%               |
| Estabilidad   | Aumenta hasta un 14%                              | Aumenta hasta un 48% | Aumenta hasta un 45% | Aumenta hasta un 18% | Disminuye hasta un 38% |
| Flujo, aumenta  | Hasta un 6%                                       | Hasta un 25%         | Hasta un 27%         | Hasta un 2%          | Hasta un 32%           |

*Nota:* Autores, 2021.

## Capítulo 4. Análisis ambiental y socioeconómico de las alternativas estudiadas

De acuerdo a los datos publicados en el Foro Económico Mundial, así como aquellos dados por el Banco Mundial, Colombia es uno de los países con uno de los puntajes más bajos en cuanto a desarrollo de infraestructura vial en Latinoamérica, presentando un atraso considerable con respecto a otros países de la región, y muy lejos de los altos niveles de calidad vial de los países desarrollados (BBC Mundo, 2015).

Se estima que la red vial de Colombia, denominada como la Red Nacional de Carreteras, posee una longitud aproximada de 206727 km, incluyendo las vías de categoría primaria, secundaria y terciaria. Del total de esta red vial, se estima que aproximadamente 9400 km se encuentran pavimentados. Estas cifras indican que en Colombia más del 90% de la malla vial del país se encuentra sin pavimentar, por lo cual se adelantan grandes proyectos como las denominadas vías 4G (INVIAS., 2020).

Las cifras anteriores muestran claramente que Colombia enfrenta grandes retos para lograr mejorar sus condiciones de movilidad vial, requiriendo grandes inversiones económicas en este sector. De esta manera, resulta viable la búsqueda de nuevas alternativas que permitan, por un lado, aumentar la red vial pavimentada del país, y por otra parte, incentivar el uso de nuevos materiales que mitiguen los impactos sobre el medio ambiente.

A continuación se presenta un breve análisis ambiental y socioeconómico del uso del cemento asfáltico con adición de los materiales recopilados en este trabajo:

#### **4.1 Polímeros**

Según cifras publicadas por la Superintendencia de Servicios Públicos, en Colombia se generan anualmente más de 10 millones de toneladas de residuos sólidas, de los cuales, más del 50% corresponden a residuos plásticos (polímeros), donde se incluyen los de un solo uso (bolsas). La gravedad de esta situación radica, en que del total de desechos producidos en el país, solamente un 17% son reciclados (GREENPEACE, 2019).

Los polímeros en conjunto, representa la mayor fuente contaminante en todo el mundo, encontrándose este tipo de materiales, aun en lugares alejados de las áreas urbanas, esto debido principalmente a que los desechos suelen ser depositados en cursos de agua facilitando su transporte. En la figura 70 se puede ver los desechos plásticos acumulados en un manglar (GREENPEACE, 2019).

El uso de polímeros en el cemento asfáltico representa una alternativa para el aprovechamiento de este tipo de residuos, lo cual incentivaría enormemente el reciclaje de este material. En cuanto al costo que el uso de polímeros representa, según algunos estudios, como los publicados por Acosta & Herrera, 2016, indican que las mezclas con cemento asfáltico

modificado con polímeros son un 25% más costosas que las mezclas asfálticas convencionales, sin embargo, las ventajas y beneficios medioambientales que ofrece el uso de polímero compensan este aumento (Acosta & Herrera, 2016).



*Figura 47. Contaminación por polímeros en los manglares. Obtenido en: GREENPACE, 2019.*

## **4.2 Caucho reciclado**

Como se mencionó en el capítulo 2, en la actualidad solo en el caso de Colombia, según datos de la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, se desechan más de 61 mil toneladas de neumáticos y alrededor de 5 millones de llantas cada año, de los cuales un gran porcentaje terminan arrojados en vías, lugares deshabitados y ríos. Esta situación ha conllevado a que se busquen alternativas para aprovechar la gran cantidad de llantas y neumáticos disponible, entre las opciones más viables esta su empleo como modificador del cemento asfáltico (Andrade & Murcia, 2013; Revista AutoCrash, 2018).

En la investigación realizada por Goicochea, 2019, en la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, indica que el uso de caucho reciclado en el cemento

asfáltico representa una reducción de hasta 25% del precio de la mezcla asfáltica final. Esta reducción en el precio radica principalmente en que a diferencia del polímero, que se aconseja en porcentajes de entre el 5-6% en el cemento asfáltico, el caucho reciclado se aconseja en porcentajes superiores al 15%, lo que representa un ahorro significativo de cemento asfáltico necesario en la mezcla asfáltica final, además de que logran mejorar las propiedades tanto físico-químicas como las reológicas (Goichochea, 2019).

### **4.3 Arcilla calcinada**

La arcilla calcinada generalmente es el desecho resultante de los procesos de fabricación de bloques y ladrillos de arcilla. Este residuo generalmente es depositado en basureros y botaderos dados las pocas opciones que existen para su aprovechamiento. En el estudio llevado a cabo por Mendoza, M., & Salazar, M., 2012, demuestran las ventajas de emplear la arcilla calcinada en el cemento asfáltico, además indican que si se emplea el contenido de arcilla calcinada recomendado en su estudio (cerca del 50%) en el cemento asfáltico, se logra una reducción de hasta el 26% del precio de la mezcla asfáltica final (Mendoza & Salazar, 2012).

### **4.4 Residuos de cerámica**

Según estimaciones de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, en el mundo se producen más de 2000 millones de m<sup>2</sup> de baldosas. Aunque no se tiene certeza del porcentaje exacto de desechos, algunos estudios muestran un porcentaje mayor al 10%. Aunque los estudios

llevados a cabo hasta la fecha no han considerado los aspectos económicos derivados del uso de la arcilla calcinada en la mezcla asfáltica final, se existe un acuerdo en que su uso representa una ayuda para mitigar la problemática ambiental que generan estos residuos (González & Beleño, 2015).

#### **4.5 Almidón de yuca**

El almidón de yuca representa una de las alternativas de mayor proyección en el cemento asfáltico, pues su uso demuestra ventajas en la mejora de las propiedades físico-químicas, reológicas y mecánicas del cemento asfáltico, pero al mismo tiempo incentiva la producción agrícola de este material, con lo cual se generaría una nueva fuente de ingresos para este sector. Se estima que anualmente se producen cerca de 3 millones de toneladas de yuca en Colombia, mientras que la producción mundial alcanza los 206,5 millones de toneladas. Los estudios de Cerón, C. & Argote, G., 2019, y Al, A., Tan, Y., & Ayman, T., 2011, muestran que es coherente el uso de almidón de yuca en el cemento asfáltico, e incentivan de esta forma su uso de tal manera que se promueva el desarrollo del sector agrícola, de forma organizada, beneficiando el uso de productos renovables, al mismo tiempo que se satisfacen las necesidades de infraestructura vial en todos los países (Cerón & Argote, 2019; Al, Tan, & Ayman, 2011).

## Conclusiones

Actualmente existen investigaciones llevadas a cabo en diversas instituciones de diferentes países del mundo en el cual se ha estudiado el comportamiento del cemento asfáltico al adicionar los siguientes materiales: polímeros, caucho reciclado, arcilla calcinada, residuos de cerámica, y almidón de yuca. Con estas investigaciones se han determinado contenidos óptimos de adición en el cemento asfáltico. En el caso del polímero se recomienda un contenido de adición promedio de entre 3 a 6%. En el caucho reciclado los porcentajes de adición oscilan entre el 15 a 20%. Para la arcilla calcinada las recomendaciones de adición oscilan entre un 20 a 50%, los residuos de cerámica en un 20 a 30%, y el almidón de yuca entre un 5 a 6%. De esta manera, la arcilla calcinada es la que mayor porcentaje de adición se recomienda en el cemento asfáltico, mientras que los polímeros son la de menor adición.

Las propiedades físicas y químicas del cemento asfáltico (gravedad específica máxima, y punto de ignición), se ven afectadas por el uso de los materiales, sin embargo, no existen estudios de estas propiedades para la totalidad de materiales estudiados, de forma general se puede expresar que el uso caucho reciclado, polímeros y arcilla calcina, afectan levemente, de forma positiva, estas propiedades en porcentajes menores al 4%, comparadas con el cemento asfáltico convencional.

Las propiedades reológicas comprenden el mayor conjunto estudiado en el cemento asfáltico con adición de materiales alternativos. Se puede concluir en este trabajo que todos los

materiales modifican las propiedades reológicas del cemento asfáltico, aunque varía el porcentaje en que cada propiedad se ve afectada. De los 5 materiales adicionados, el que mayor efecto produce en las propiedades reológicas es el caucho reciclado, y el de menor efecto la arcilla calcinada, a pesar de ser adicionada en mayores porcentajes.

En cuanto a las propiedades mecánicas (estabilidad y flujo) todas presentan un aumento con la adición de los materiales estudiados, excepto por el almidón de yuca que produce una reducción de la estabilidad. De todos los materiales, el caucho reciclado es el que mayor efecto produce en las propiedades mecánicas, representando el mayor aumento en la estabilidad y el flujo (48%).

El análisis ambiental muestra que el uso de cualquiera de los materiales estudiados representa beneficios, sin embargo, por el alto grado de contaminación que producen, el uso de caucho reciclado y polímeros se proyectan como las alternativas de mayor impacto. En cuanto al aspecto socioeconómico, el uso del caucho reciclado, y arcilla calcinada, representan la mayor disminución del precio final de la mezcla asfáltica con un 25 y 26%, respectivamente, mientras que el uso de polímeros aumenta hasta un 25% el precio de la mezcla.

De todos los 5 materiales estudiados, se puede indicar que el que mayor beneficio ofrece es el caucho reciclado, pues permite mejorar todas las propiedades del cemento asfáltico, además que representa una disminución de hasta un 25% del precio final de la mezcla asfáltica.

De forma general, se concluye con esta monografía que el uso de materiales alternativos mejora positivamente las propiedades físico-químicas, reológicas y mecánicas del cemento asfáltico, siendo el caucho reciclado el material más estudiado, lo que permite aumentar el grado de confianza de su empleo. Así mismo el uso de polímeros y almidón de yuca representa ventajas demostradas en los estudios existentes. En el caso de la arcilla calcinada, y los residuos de cerámica, se requieren mayores investigaciones que permitan analizar mejor su comportamiento.

## Referencias

- Abb-Allah, A., et al. (2014). Effect of using polymers on bituminous mixtures characteristics in Egypt. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 11(4), 54-63.
- Acosta, M., & Herrera, J. (2016). *Uso de polímeros tipo III para mejorar la durabilidad y el comportamiento de las mezclas asfálticas (MDC-19) empleadas en zonas cálidas*. Tesis de especialización, Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia.
- Al, A., Tan, Y., & Ayman, T. (2011). Starch as a modifier for asphalt paving materials. *Construction and Building Materials*(25), 14-20.
- Al., A., & Tan, Y. (2019). Performance evaluation of prepared gelled hot sealant in cold climates. *School of Transportation Science and Engineering*, 8, 1-12.
- Alves, et al. (2016). Rheological studies of asphalt modified with elastomeric polymer. *Construction and Building Materials*, 106, 290-295.
- Andrade, W., & Murcia, D. (2013). *Efecto de la arcilla calcinada en un asfalto 80/100 modificado con grano de caucho reciclado*. Tesis de pregrado, Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Arenas, H. (s.f.). *Propuesta técnica para garantizar la homogeneidad de los asfaltos producidos en las refinerías colombianas*. Cámara Colombiana de la Infraestructura.
- Awwad, M., & Shebeeb, L. (2007). The use of polyethylene in hot asphalt mixtures. *American Journal of Applied Sciences*, 4(6), 390-396.
- BBC Mundo. (10 de Junio de 2015). *Los países con las mejores y las peores carreteras en A. Latina*. Obtenido de [bbc.com](https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/06/150609_economia_mejores_peores_carreteras_lf):  
[https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/06/150609\\_economia\\_mejores\\_peores\\_carreteras\\_lf](https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/06/150609_economia_mejores_peores_carreteras_lf)
- Botella, J., & Zamora, A. (2017). *El meta-análisis: Una metodología para la investigación en educación*. Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, España.
- Brasileiro, L., et al. (2019). Reclaimed polymers as asphalt binder modifiers for more sustainable roads: A review. *Sustainability*, 646(11), 1-20.
- Burak, S., & Giray, I. (2007). Analysis of styrene-butadiene-styrene polymer modified bitumen using fluorescent microscopy and conventional test methods. *Journal of Hazardous Materials*, 150, 424-432.

- Campaña, O., Galeas, S., & Guerrero, V. (2015). Obtención de asfalto modificado con polvo de caucho proveniente del reciclaje de neumáticos de automotores. *Revista Politécnica*, 36(3), 1-6.
- Carrizales, J. (2015). *Asfalto modificado con material reciclado de llantas para su aplicación en pavimentos flexibles*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Castro, W., Rondón, H., & Barrero, J. (2015). Evaluación de las propiedades reológicas y térmica de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD. *INGENIERÍA*, 21(1), 7-18.
- Cerón, C., & Argote, G. (2019). *Análisis comparativo del comportamiento reológico de un asfalto convencional y un asfalto modificado con almidón de yuca*. Tesis de pregrado, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.
- Chavarro, W., & Molina, C. (2015). *Evaluación de alternativas de pavimentación para vías de bajos volúmenes de tránsito*. Trabajo de especialización, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.
- Cremades, I. (2000). *Asfaltos modificados*.
- Daryaei, et al. (2020). Combined effect of waste polymer and rejuvenator on performance properties of reclaimed asphalt binder. *Combined effect of waste polymer and rejuvenator on performance properties of reclaimed asphalt binder*, 1-20.
- Delgado, et al. (2018). Influence of four non-conventional additives on the physical, rheological and thermal properties of an asphalt. *Ingeniería e Investigación*, 38, 18-26.
- Eliozondo, F., Salazar, J., & Villegas, E. (s.f.). *Análisis reológico de asfaltos modificados*. Universidad de Costa Rica.
- Figueroa, A., & Fonseca, E. (2008). Contrastación entre el asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada empleando dos métodos de mezclado. *Épsilon. Revista de las facultades de ingeniería*(010), 67-79.
- Figueroa, A., Sánchez, A., & Reyes, F. (2007). Caracterización física de un asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada. *Épsilon. Revista de las facultades de ingeniería*, 41-55.
- Figueroa, A., Sánchez, A., & Reyes, F. (2009). Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado. *Ing. Univ. Bogotá*, 45-70.
- Goichochea, F. (2019). *Estudio de un asfalto con adición de caucho de neumático reciclado como polímero base, Chachapoyas-Amazonas-2017*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Chachapoyas, Perú.
- González, T., & Beleño, M. (2015). *Reología de asfaltos 60/70 modificados con residuo de cerámica*. Tesis de pregrado, Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, Colombia.

- GREENPEACE. (2019). *Situación actual de los plásticos en Colombia y su impacto en el medio ambiente*. GREENPEACE; Universidad de los Andes .
- I.N.V. E-702. (2012). *Ductilidad de los materiales asfálticos*. Norma, Instituto Nacional de Vías.
- I.N.V. E-706. (2012). *Penetración de los materiales bituminosos*. Norma, Instituto Nacional de Vías.
- I.N.V. E-712. (2012). *Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola)*. Norma, Instituto Nacional de Vías.
- I.N.V. E-717. (2012). *Determinación de la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional*. Norma, Instituto Nacional de Vías.
- I.N.V. E-724. (2012). *Índice de penetración de los cementos asfálticos*. Norma, Instituto Nacional de Vías.
- I.N.V. E-737. (2007). *Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua (stripping)*. Normas, Instituto Nacional de Vías.
- I.N.V. E-740. (2012). *Ensayo de adherencia en bandeja*. Norma, Instituto Nacional de Vías.
- INVIAS. (2012). *Capítulo 4. Pavimentos asfálticos*. Instituto Nacional de Vías, Bogotá, Colombia.
- INVIAS. (2020). *Estado de la Red Vial*. Obtenido de INVIAS.GOV.CO:  
<https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/2-principal/57-estado-de-la-red-vial>
- Issa, Y. (2016). Effect of adding waste tires rubber to asphalt mix. *International Journal of Scientific Reseach and Innovative Technology*, 3(5), 61-68.
- Jan, H., Aman, M., Tawab, M., & Ali, K. (2018). Performance evaluation of hot mix asphalt concrete by using polymeric waste polyethylene.
- Jebur, Y., & Imran, M. (2017). Evaluation the effect of using polymers on the performance of wearing asphalt mixture. *Journal of Babylon University*, 25(1), 329-337.
- Jiménez, G. (2012). *Mejoramiento del asfalto 60/70 y la mezcla asfáltica mdc-2 con nanotubos de carbono obtenidos a partir de metano vía catalítica*. Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Kara, C., & Karacasu, M. (2015). Use of ceramic wastes in road pavement design. *Proceedings of the World Congress on New Technologies*, 1-6.
- Kishchynskiy, S., Nagaychuk, V., & Bezuglyi, A. (2016). Improving quality and durability of bitumen and asphalt concrete by modification using recycled polyethylene based polymer composition. *Procedia Engineering*, 143, 119-127.

- Ladino, Y., & Rubiano, Á. (2017). *Adoquines en asfalto reciclado*. Tesis de pregrado, Universidad La Gran Colombia, Bogotá D.C., Colombia.
- Liang, et al. (2017). Rheological property and stability of polymer modified asphalt: Effect of various vinyl-acetate structures in EVA copolymers. *Construction and Building Materials*, 137, 367-380.
- Lin, et al. (2019). Rheological, chemical and aging characteristics of high content polymer modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 207, 616-629.
- Lizcano, et al. (2013). Comportamiento de un cemento asfáltico modificado con un desecho de PVC. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 12, 75-84.
- Loaiza, Y. (2017). *Efecto de las adiciones de polvos de acería (EAFD) en las propiedades de concretos asfálticos*. Tesis de pregrado, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Loria, G. (2004). *Análisis de asfaltos modificados*.
- Loria, L. (2008). *Reología de asfaltos modificados*. Universidad de Costa Rica, San Jose, Costa Rica.
- Luque, H., & Rincón, A. (2011). *Evaluación de las propiedades físicas de un cemento asfáltico 60/70 modificado con residuos de la fabricación de productos con polietileno de baja densidad*. Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Mahmood, B., et al. (2020). Reducing the environmental impact of cork waste by improving natural asphalt as water proofing material. *Indian Journal of Forensic Medicine & Toxicology*, 15(4), 1246-1253.
- Majeed, M. (2017). Effect of adding clay with Natural and Recycled coarse aggregates on asphalt mixture. *Journal of Engineering and Development*, 5(1), 1-14.
- Mendoza, M., & Salazar, M. (2012). *Efecto de la arcilla calcinada en un asfalto B-60/70 en porcentajes de 5% al 50%*. Tesis de pregrado, Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Mohd, M., et al. (2017). Performance of kaolin clay on hot-mix asphalt properties. *International PostGraduate Conference on Applied Science & Physics*, 109, 1-9.
- Pasadin, A., Galán, J., & Pérez, I. (2020). *Adhesion analysis of waste cork dust as filler for bituminous mixtures*. Universidade da Coruña, La Coruna, Spain.
- Pereira, S., et al. (2011). *Mechanical performance of asphalt mixtures produced with cork or rubber granulates as aggregate partial substitutes*. Tesis de pregrado, University of Minho, Guimaraes, Portugal.

- Pérez, R. (2014). *Realidades y percepciones del uso de los asfaltos modificados en Colombia*. Tesis de especialización, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- Ren, et al. (2020). Evaluation of rheological behaviors and anti-aging properties of recycled asphalts using low-viscosity asphalt and polymers. *Journal of Cleaner Production*, 253, 1-18.
- Revista AutoCrash. (7 de Julio de 2018). *Final al frustrado proceso en la disposición de llantas usadas*. Obtenido de Revista AutoCrash: <https://www.revistaautocrash.com/final-al-frustrado-proceso-la-disposicion-llantas-usadas/#:~:text=Anualmente%20en%20Colombia%20de%20desechan,v%C3%ADas%20lugares%20deshabitados%20y%20r%C3%ADos>.
- Shirzad, et al. (2019). Rheological properties of asphalt binder modified with recycled asphalt materials and light-activated self-healing polymers. *Construction and Building Materials*, 220, 187-195.
- Silvestre, R., et al. (2013). Using ceramic wastes from tile industry as a partial substitute of natural aggregates in hot mix asphalt binder courses. *Construction and Building Materials*, 45, 115-122.
- Subiaga, A. (2012). *Partes fundamentales y reología de asfaltos para uso vial*. Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina.
- Tang, et al. (2018). Investigation of rheological properties of light colored synthetic asphalt binders containing different polymer. *Construction and Building Materials*, 161, 175-185.
- Vergel, E., & Vásquez, J. (2016). *Comparación y análisis de asfalto modificado con llenante mineral con propiedades plásticas y no plásticas*. Tesis de pregrado, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Ocaña, Colombia.
- Villacis, F. (2017). *Asfalto modificado con materiales de desecho*. Tesis de pregrado, Universidad de Costa Rica, San Jose, Costa Rica.
- Wang, et al. (2018). Chemical, thermal and rheological characteristics of composite polymerized asphalts. *Fuel*, 227, 289-299.
- Whag, C., & Wang, Y. (2019). Physico-chemo-rheological characterization of neat and polymer-modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 199, 471-482.
- Wulandari, P., & Tjandra, D. (2017). Use of crumb rubber as an additive in asphalt concrete mixture. *Procedia Engineering*, 171, 1384-1389.

