

**EFFECTO DE LA ARCILLA CALCINADA EN UN ASFALTO B-60/70  
EN PORCENTAJES DE 5% AL 50%**

**Presentado por:**

**MARIA ALEJANDRA MENDOZA QUINTERO**

**MARIA PAULA SALAZAR SUSUNAGA**

**Estudiantes de pregrado de ingeniería civil**

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL  
BOGOTA  
2012**

**EFFECTO DE LA ARCILLA CALCINADA EN UN ASFALTO B-60/70  
EN PORCENTAJES DE 5% AL 50%**

**Presentado por:**

**MARIA ALEJANDRA MENDOZA QUINTERO**

**MARIA PAULA SALAZAR SUSUNAGA**

**Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniera Civil.**

**Asesor:**

**INGENIERO CIVIL GILBERTO MARTINEZ ARGUELLES**

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL  
BOGOTA  
2012**

Nota de aceptación:

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo agradecerle a Dios por haberme brindado la oportunidad de hoy poder hacer mi ultimo esfuerzo para obtener el titulo de ingeniera y por haberme brindado una familia tan unida que a pesar de muchos inconvenientes en el camino nunca me dejaron desfallecer y ellos tampoco desfallecieron; en especial a quiero agradecerle a mi padre Libardo Susunaga, a mis madres Edith susunaga, Gloria Susunaga y Pastora Susunaga que siempre me acompañaron, me apoyaron y me guiaron en este camino; también quisiera agradecer a Juan David Del Río, a Katherin Torres, al profesor Fredy Santos y a todas las personas que me aportaron y me colaboraron para poder finalizar mi carrera.

María Paula Salazar Susunaga

Hoy quiero dar mis más sinceros agradecimientos a Dios por encontrarme en este momento con ustedes, por haberme puesto en el camino a personas que me ayudaron a crecer en mis conocimientos en mi sabiduría y que me han enseñado a compartir con las personas; a la universidad y a todo su equipo de profesores de la facultad de ingeniería civil por haberme realizado como una profesional en dicha ingeniería; a mis padres que me dieron la vida; a mis compañeros y compañeras con los que pase muchos momentos de trabajos de investigación, salidas de campo enfocadas en el aprendizaje, y especialmente en los momentos felices y tristes compartidos en nuestras vidas.

Un agradecimiento muy especial al Ing. Fredy y a la constructora CASA, que me dio la oportunidad de hacer la práctica y obtener mi primer trabajo en sus obras, y en la cual me encuentro laborando, para aplicar y medir mis conocimientos adquiridos en esta emérita universidad, que ha sido mi segundo hogar en estos últimos cinco años.

Muchas gracias a los que me apoyaron y me ayudaron a realizarme como ingeniera y a ustedes que están aquí presentes.

María Alejandra Mendoza

## RESUMEN

Buscando tener nuevas alternativas para mejorar la calidad de los asfaltos y la durabilidad de las vías, se ha adicionado a los ligantes convencionales sustancias llamadas filler, que aportan un valor en sus características físicas pero no modifican en nada las químicas, puesto que estas sustancias no son miscibles en el asfalto, generalmente pasan el tamiz #200; las más utilizadas en la actualidad son la arena, la cal y el cemento.

Se ha visto en los últimos años la utilización de desechos en las vías como el hule de neumáticos que no tienen ninguna reutilización y causan un gran impacto en el medio ambiente, por eso buscamos un material que pueda ser utilizado como filler, proporcionando mejoras en las propiedades físicas, y colaboración con el medio ambiente; la arcilla calcinada es el desecho de las ladrilleras, puede ser utilizado como filler ayudando así al medio ambiente.

Este trabajo de grado muestra los cambios positivos o negativos que puede tener un asfalto 60/70 de Barrancabermeja al adicionarle arcilla calcinada en los porcentajes 5%, 15%, 25%, 35% y 50%, comparándolos con los resultados que se obtienen con el cemento en las mismas adiciones, para poder así concluir si la arcilla puede ser usada como un filler comercial.

Se realizaron ensayos de adherencia, de penetración estándar, de anillo y bola y viscosidad rotacional, los cuales mostraron mejoras significativas en la calidad del material en todos los ensayos; la mayor mejora se dio con el mayor porcentaje que era el 50% y al compararlo con el cemento los resultados fueron muy parecidos lo que realmente resalta las características de este material como filler.

## ABSTRACT

Looking to have new alternatives to improve the quality of asphalts and durability of tracks are added to conventional binders a substances called FILLER that contribute value in their physical characteristics but do not change nothing chemicals, because these substances are immiscible in the asphalt, usually pass the sieve # 200 , the most currently used are the sand, lime and cement.

We have seen in recent years the use of waste on the tracks as the rubber tires that have no reusability and cause a great impact on the environment, so we looked for a material that can be used as filler, providing improvements in physical properties, and collaborating with the environment, the calcined clay is the disposal of the brick, can be used as filler helping the environment.

This degree work shows the positive or negative changes that can have an asphalt 60/70 from Barrancabermeja by adding calcined clay in the proportions 5%, 15%, 25%, 35% and 50%, comparing with evaluation results obtained with the cement in the same additions in order to conclude whether the clay can be used as a commercial filler.

Were performed Adhesion assays , standard penetration, ring and ball and rotational viscosity, which showed significant improvements in the quality of material in all trials, the greatest improvement occurred with the highest percentage was 50% when compared with cement the results were very similar it really highlights the characteristics of this material as filler.

## TABLA DE CONTENIDO

|          | <b>Pag</b>                        |    |
|----------|-----------------------------------|----|
| <b>1</b> | <b>INTRODUCCION</b>               | 14 |
|          | <b>DELIMITACION DEL TEMA.</b>     | 16 |
|          | 1.1 Alcance                       | 16 |
|          | 1.2 Justificación                 | 17 |
|          | 1.3 Descripción del estudio.      | 17 |
| <b>2</b> | <b>OBJETIVOS</b>                  | 19 |
|          | 2.1 Objetivo general              | 19 |
|          | 2.2 Objetivos específicos         | 19 |
| <b>3</b> | <b>DESCRIPCION DEL ESTUDIO</b>    | 20 |
| <b>4</b> | <b>MARCO TEORICO</b>              | 22 |
|          | 4.1 Asfalto                       | 22 |
|          | 4.1.1 Definición.                 | 22 |
|          | 4.1.2 Composición química         | 23 |
|          | 4.1.3 Reologia de los asfaltos    | 25 |
|          | 4.1.4 Envejecimiento del asfalto. | 27 |
|          | 4.2 Filler                        | 28 |
|          | 4.2.1 Definición.                 | 28 |
|          | 4.2.2 Arcilla Calcinada           | 30 |
| <b>5</b> | <b>PROCEDIMIENTO</b>              | 32 |
|          | 5.1 Materiales a utilizar.        | 32 |
|          | 5.1.2 Asfalto                     | 32 |

|   |           |
|---|-----------|
| 5.1.3 Filler.   | 33        |
| 5.2 Adición de filler al asfalto  | 35        |
| 5.3 Penetración Estándar.   | 36        |
| 5.4 Punto de ablandamiento de los materiales bituminosos(Anillo y bola) | 38        |
| 5.5 Índice de penetración.  | 40        |
| 5.6 Viscosidad rotacional   | 40        |
| 5.7 Stripping   | 43        |
| 5.8 Adherencia en bandeja   | 45        |
| <b>6 ANALISIS Y RESULTADOS</b>  | <b>47</b> |
| 6.1 Penetración estándar.   | 47        |
| 6.2 anillo y Bola   | 52        |
| 6.3 Índice de penetración   | 59        |
| 6.4 Stripping   | 63        |
| 6.5 Adherencia en bandeja.  | 64        |
| 6.6 Viscosidad Rotacional.  | 66        |
| <b>7 CONCLUSIONES</b>   | <b>86</b> |
| <b>8 RECOMENDACIONES</b>  | <b>90</b> |
| <b>9 BIBLIOGRAFIA</b>   | <b>89</b> |
| <b>10 ANEXOS</b>  | <b>91</b> |

## TABLA DE FIGURAS.



|             | <b>Pag.</b>  |    |
|-------------|--|----|
| Figura N.1  | Plan experimental  | 21 |
| Figura N.2  | Estructura coloidal del asfalto.   | 24 |
| Figura N.3  | Efecto de la cal hidratada en los módulos resistentes antes y después acondicionado Lottman de Truckee y Grass Valley. California mezclas (después Epps et al. (1092). | 30 |
| Figura N.4  | Arcilla Calcinada Pasa tamiz # 200   | 31 |
| Figura N.5  | Filler utilizados.   | 33 |
| Figura N.6  | Baño de agua (ensayo de penetración estándar)  | 37 |
| Figura N.7  | Penetrometro   | 38 |
| Figura N.8  | Cilindros de aluminio marcados(Ensayo de Viscosidad Rotacional).   | 41 |
| Figura N.9  | Ensayo de viscosidad rotacional.   | 42 |
| Figura N.10 | Laboratorio de Stripping.  | 45 |
| Figura N.11 | Montaje del ensayo de adherencia en bandeja.   | 46 |
| Figura N.12 | Resultados del ensayo Penetración Estándar con diferentes porcentajes de adición de arcilla calcinada.   | 48 |
| Figura N.13 | Reducción de la penetración con diferentes porcentajes de adición de arcilla calcinada   | 49 |
| Figura N.14 | Resultados del ensayo de penetración estándar con diferentes porcentajes de adiciones de Cemento Portland.   | 50 |
| Figura N.15 | Cambio de penetración con diferentes porcentajes de adición de Cemento Portland  | 51 |
| Figura N.16 | Comparación de los resultados de penetración entre la arcilla calcinada y el Cemento Portland.   | 52 |
| Figura N.17 | Resultados del ensayo de anillo y bola con diferentes porcentajes de adición de arcilla calcinada.   | 54 |
| Figura N.18 | Cambio de la temperatura de ablandamiento del asfalto con diferentes porcentajes de adición de arcilla calcinada   | 55 |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Figura N.19 | Resultados de anillo y bola con diferentes porcentajes de adición de cemento portland.                           | 56 |
| Figura N.20 | Cambio de la temperatura de ablandamiento del asfalto con diferentes porcentajes de adición de cemento portland. | 57 |
| Figura N.21 | Comparación del cambio de temperatura en diferentes porcentajes de adición con cemento o arcilla calcinada.      | 58 |
| Figura N.22 | Comparación de la temperatura en diferentes porcentajes de adición con cemento o arcilla calcinada.              | 58 |
| Figura N.23 | Grafica de resultados del índice de penetración  | 60 |
| Figura N.24 | Resultados del ensayo de índice de penetración con diferentes adiciones de cemento portland.                     | 62 |
| Figura N.25 | Comparación de los resultados del índice De Penetración  | 63 |
| Figura N.26 | Comparación de la adherencia con diferentes porcentajes de adición de arcilla calcinada y cemento                | 66 |
| Figura N.27 | Diagrama Temperatura vs Viscosidad muestra sin adiciones   | 67 |
| Figura N.28 | Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de 5% de arcilla calcinada.                         | 68 |
| Figura N.29 | Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de 15% de arcilla calcinada.                        | 68 |
| Figura N.30 | Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de 25% de arcilla calcinada.                        | 69 |
| Figura N.31 | Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de 35% de arcilla calcinada.                        | 69 |
| Figura N.32 | Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de Arcilla Calcinada.                               | 70 |
| Figura N.33 | <i>Diagrama comparativo de los resultados con adiciones de arcilla calcinada, Temperatura Vs Viscosidad.</i>     | 71 |
| Figura N.34 | Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de 5% de Cemento.                                   | 72 |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Figura N.35 | Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de 15% de Cemento.  | 73 |
| Figura N.36 | Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de 25% de Cemento   | 73 |
| Figura N.37 | Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de 35% de Cemento.  | 74 |
| Figura N.38 | Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de 50% de Cemento.  | 74 |
| Figura N.39 | Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de Cemento  | 75 |
| Figura N.40 | Comparación entre el comportamiento de la arcilla calcinada y el cemento con adición del 5%, en los resultados de la viscosidad rotacional   | 76 |
| Figura N.41 | Comparación entre el comportamiento de la arcilla calcinada y el cemento con adición del 15%, en los resultados de la viscosidad rotacional. | 77 |
| Figura N.42 | Comparación entre el comportamiento de la arcilla calcinada y el cemento con adición del 25%, en los resultados de la viscosidad rotacional. | 78 |
| Figura N.43 | Comparación entre el comportamiento de la arcilla calcinada y el cemento con adición del 35%, en los resultados de la viscosidad rotacional. | 79 |
| Figura N.44 | Comparación entre el comportamiento de la arcilla calcinada y el cemento con adición del 50%, en los resultados de la viscosidad rotacional. | 80 |
| Figura N.45 | Diagrama de costos de producción vs peso   | 83 |
| Figura N.46 | Cambio del costo de producción con diferentes porcentajes de adición de cemento Portland   | 84 |
| Figura N.47 | Comparación de la reducción del costo de producción.   | 85 |

## **TABLA DE CUADROS**

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Cuadro N. 1  | Propiedades de un asfalto 60/70   | 32 |
| Cuadro N. 2  | Características del cemento utilizado   | 34 |
| Cuadro N. 3  | Cantidad de filler según el porcentaje de adición.  | 35 |
| Cuadro N. 4  | Dimensiones del recipiente circular necesario para el ensayo de penetración estándar.                                   | 36 |
| Cuadro N. 5  | Promedios y desviación estándar de los datos obtenidos con el ensayo de penetración estándar.                           | 47 |
| Cuadro N. 6  | Promedios y desviación estándar de los datos obtenidos con el ensayo de penetración estándar.                           | 49 |
| Cuadro N. 7  | . Promedios y desviación estándar de los datos obtenidos con el ensayo de Anillo y bola                                 | 53 |
| Cuadro N. 8  | Promedios y desviación estándar de los datos obtenidos con el ensayo de Anillo y bola.                                  | 56 |
| Cuadro N. 9  | Resultados del índice de penetración con diferentes porcentajes de arcilla calcinada.                                   | 59 |
| Cuadro N. 10 | Resultados del índice de penetración con diferentes porcentajes de arcilla calcinada.                                   | 61 |
| Cuadro N. 11 | Resultados de Stripping   | 63 |
| Cuadro N. 12 | Resultados del ensayo de adherencia en bandeja con adiciones de arcilla calcinada.                                      | 65 |
| Cuadro N. 13 | Resultados del ensayo de adherencia en bandeja con adiciones de cemento portland  | 65 |
| Cuadro N. 14 | Resultados de la tesis "EFECTO DE LA ARCILLA CALCINADA COMO LLENATE MINERAL EN EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DEL ASFALTO" | 81 |
| Cuadro N. 15 | Precios de los materiales utilizados en la investigación  | 82 |
| Cuadro N. 16 | Costo de producción de una muestra de 1000gr  | 82 |
| Cuadro N. 17 | Costo de producción de una muestra de 1000 gr.  | 84 |

## **TABLA DE ANEXOS**

|         |   |
|---------|---|
| ANEXO A | GRANULOMETRÍA DE LA ARCILLA CALCINADA.              |
| ANEXO B | RESULTADOS GENERALES DE LAS PROPIEDADES REOLOGICAS. |
| ANEXO C | PRECIOS DEL ASFALTO Y MATERIALES BITUMINOSOS.       |

## INTRODUCCIÓN

Los asfaltos tienen altas propiedades mecánicas, sin embargo se puede observar que en ocasiones las vías se deterioran con gran rapidez y su duración es menor a lo previsto en el diseño, debido a cambios frecuentes e inesperados de temperatura, altos volúmenes de tráfico y excesos de carga y agua.

Los llenantes minerales (filler) son sustancias compuestas por partículas finas que en su mayoría pasan por el tamiz N. 200 y aunque, químicamente son insolubles en el bitumen, al ser incorporadas al asfalto mejoran notoriamente sus propiedades mecánicas y su consistencia porque generan aumento en el punto de ablandamiento y disminuyen la rigidez y el índice de penetración. En la actualidad los llenantes más usados son la arena, el cemento y la cal. (1)

En los últimos años se han buscado diferentes alternativas que ayuden al cuidado y conservación del medio ambiente, reutilizando sustancias que ya han pasado por un proceso y se hayan convertido en un desecho para incluirlas en la elaboración de mezclas asfálticas, buscando carreteras duraderas, económicas, más resistentes y más ecológicas.

La arcilla es la materia prima de las ladrilleras se caracteriza por tener una alta plasticidad al mezclarse con el agua y ser fácil de moldear, después de pasar por el proceso de cocción a elevadas temperaturas se ve una significativa pérdida de sus propiedades sobre todo en su plasticidad y los desperdicios que están entre 10% y 20% se convierten en un desecho ya que sus características finales no son aptas para ser reutilizados. (2)

Con este trabajo se desea analizar el beneficio que puede tener la inclusión de la arcilla calcinada como llenante mineral en porcentajes medios empezando en un

5% y finalizando con un 50%, evaluando su comportamiento con pruebas como penetración estándar, punto de ablandamiento, stripping, adherencia en bandeja y viscosidad rotacional comparándolo al tiempo con una muestra de control con asfalto virgen y con muestras con porcentajes idénticos de cemento que es uno de los fillers mas usado en la actualidad. Así mismo, evaluar el aporte ecológico de utilizar este filler.

## 1. DELIMITACION DEL TEMA.

### 1.1 Alcance

El asfalto está siendo sometido a elevadas exigencias que han obligado a los Ingenieros a buscar distintas alternativas que mejoren sus propiedades y lo hagan competente a la demanda actual. (1)

Con este trabajo queremos estudiar el comportamiento reologico de un asfalto con adiciones de arcilla en porcentajes medios, 5%-15%-25%-35%-50%, teniendo como punto de partida el estudio “EFECTO DE LA ARCILLA CALCINADA COMO LLENATE MINERAL EN EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DEL ASFALTO” (3) para poder observar si al igual que con adiciones en porcentajes bajos las características del asfalto son directamente proporcionales a la cantidad de arcilla calcinada.

Se van a realizar ensayos de laboratorio para caracterizar los materiales a utilizar, al cemento y a la arcilla calcinada que son los filler a comparar, se les va a realizar ensayos de densidad y finura, al asfalto puro y a los mastic se les va a realizar:

- Índice de penetración I.N.V.E- 724-07
- Penetración I.N.V.E – 706 – 07
- Punto de ablandamiento I.N.V.E – 712 – 07
- Viscosidad rotacional I.N.V.E – 717 – 07
- Stripping I.N.V. E - 737
- Adherencia en bandeja I.N.V. E - 740



Y dependiendo de los resultados que obtengamos podemos concluir si este desecho puede ser incluido en los ligantes asfálticos como filler, como una propuesta alterna al cemento la arena y la cal.

## **1.2 Descripción general del problema.**

Buscando una sustancia que remplace los filler comunes, cemento, arena fina y cal, proponemos estudiar la arcilla calcinada, la cual es el desecho de las ladrilleras; esta alternativa no solo puede tener excelentes resultados por el aumento en las propiedades físicas de lo asfaltos, si no que ayuda a mitigar el impacto ambiental que se da a partir del mal manejo de este desecho y es mucho más económica.

## **1.3 Justificación.**

Los residuos sólidos de las ladrilleras están entre el 10% y el 20% de su producción, esto depende de que tan rudimentaria sea la metodología de fabricación, estos residuos son desechados de forma indiscriminada en ríos, quebradas y botaderos improvisados, muchas veces cercanos a poblaciones vulnerables, generando la degradación del suelo y la contaminación del área. Su reciclaje no es fácil porque después de calcinada la arcilla tiene poca plasticidad y las condiciones en las que termina no son aptas para reutilizarse en la fabricación de ladrillos o en alguna actividad que necesite alta plasticidad, sin embargo estas pueden ser las indicadas para ser usada como filler proporcionando una alternativa diferente, económica y ecológicamente muy generosa con el medio ambiente. (2)

Anteriormente se ha visto que en países como Brasil se ha implementado estudios para incluir la arcilla calcinada en las mezclas asfálticas (3), para mejorar las características de sus mezclas y reducir costos. A principios de este

año estudiantes de la Universidad Piloto de Colombia, hicieron un estudio de la utilización de arcilla calcinada en porcentajes bajos como llenante mineral en los asfaltos y una de sus conclusiones fue:

“Los resultados de los ensayos indican que el uso de la arcilla calcinada como llenante mineral en un asfalto puede ser beneficioso puesto que su comportamiento es muy similar al cemento que comúnmente se usa como un filler, de esta manera el uso de arcilla calcinada aparte de ser un mitigante ambiental debido al uso de un material que se consideraría en un principio como un desecho de las industrias ladrilleras y de cerámicas, genera cambios en las propiedades reológicas de un asfalto.”

Dando a entender que la idea de usar la arcilla calcinada como filler es viable y que en porcentajes bajos dio muy buenos resultados, lo que nosotros queremos es continuar con este estudio pero en porcentajes medios observando si las propiedades, y así poder afirmar que la arcilla calcinada tiene altas propiedades para merecer ser utilizada como filler.

## **2. OBJETIVOS.**

### **2.1 Objetivo general.**

Estudiar el efecto de la incorporación de arcilla calcinada en las propiedades físicas del asfalto colombiano B-60/70.

### **2.2 Objetivos específicos.**

- Evaluar el comportamiento de los ligantes asfálticos con cada uno de los porcentajes a utilizar 5%-15%-25%-35%-50% de arcilla calcinada, encontrando la tendencia de su comportamiento.
- Comparar el efecto de la adición de arcilla calcinada y cemento en un ligante asfáltico B60/70 en los mismos porcentajes.
- Establecer los beneficios ambientales que se pueden obtener con la arcilla calcinada al ser usada como filler.
- Analizar si la arcilla calcinada tiene suficientes características para llegar a ser un filler competitivo con los que actualmente se usan.
- Valorar la incorporación de arcilla calcinada en los ligantes asfálticos, como solución de uso para este desecho industrial.
- Comparar los resultados obtenidos con respecto a los requisitos exigidos en la normatividad vigente.

### 3. DESCRIPCION DEL ESTUDIO.

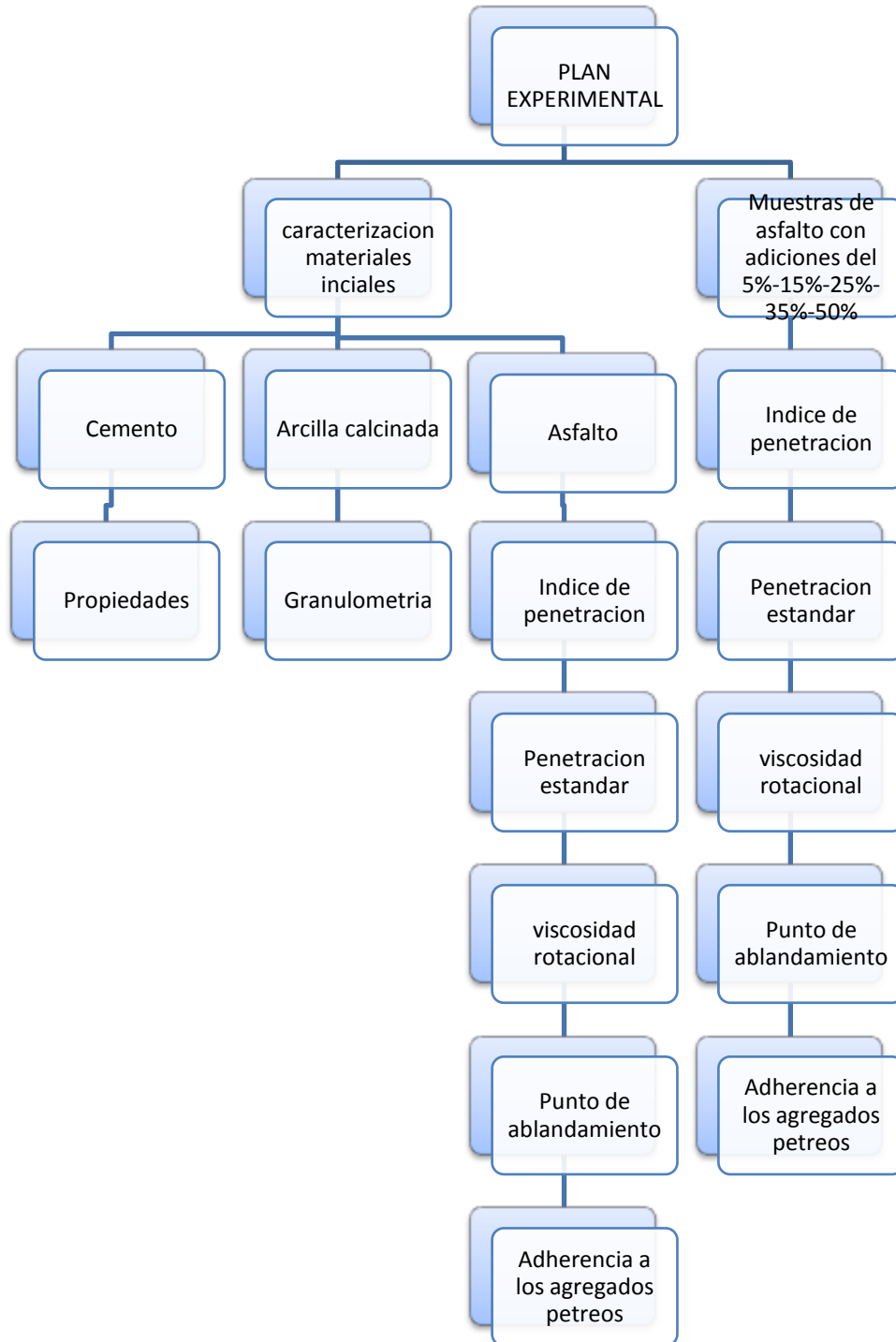
Se tomará como referencia el trabajo de grado realizado y sustentado a principios de este año “EFECTO DE LA ARCILLA CALCINADA COMO LLENATE MINERAL EN EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DEL ASFALTO”(3)En la que se comprobó que el uso de la arcilla calcinada en porcentajes bajos dentro de los asfaltos es una alternativa viable que da buenos resultados, basándonos en eso deseamos estudiar si al aumentar estos porcentajes las propiedades del asfalto siguen aumentando situación que se ve con los filler comunes. Para realizar este estudio vamos a:

1. Recopilar información existente de estudios anteriores sobre llenantes minerales.
2. Recolección y caracterización de los materiales: asfalto B60/70, arcilla calcinada y cemento.
3. Realización de ensayos de laboratorio:
  - Índice de penetración I.N.V.E- 724-07
  - Penetración I.N.V.E – 706 – 07
  - Punto de ablandamiento I.N.V.E – 712 – 07
  - Viscosidad rotacional I.N.V.E – 717 – 07
  - StrippingI.N.V. E - 737
  - Adherencia en bandejaI.N.V. E - 740

Para mayor claridad ver figura 1.

4. Análisis de los resultados.
5. Conclusiones

**Figura N. 1. Plan experimental.**



**Fuente:** Los autores.

## 4. MARCO TEORICO.

### 4.1 Asfaltos

#### 4.1.1 Definición

El asfalto es un material de origen pétreo, el cual se puede encontrar en yacimientos naturales producto de la destilación natural, o puede ser el resultado de la destilación industrial del petróleo crudo.

El asfalto natural se da cuando el crudo sube a la superficie a través de grietas, esta destilación se hace cuando el petróleo tiene contacto con el viento y el sol y estos accionan produciendo la separación de los gases y los aceites ligeros dejando solamente el material viscoso, pegajoso y de color negro que llamamos asfalto, este asfalto generalmente tiene grandes cantidades de arcilla y arena fina que son recogidas en el recorrido hasta la superficie. El asfalto producido por destilación industrial se hace por medio de vapor o el aire y son usados para pavimentación de vías(4)

Posee características como tener una impermeabilidad alta, ser adherente, cohesivo y resistir esfuerzos instantáneos, las cuales lo hacen ideal para trabajos de pavimentación, donde dos funciones principales:

1. Impermeabilizar la estructura del pavimento, evitando que el agua proveniente de las precipitaciones se infiltren y lo deterioren.
2. Da cohesión a los agregados, evitando que se disgreguen por la acción de las cargas vehiculares.

Su comportamiento depende de la temperatura a la que está siendo sometido y el tiempo de aplicación de la carga. A bajas temperaturas es más rígido y tiende a comportarse como un vidrio y a altas es más blando tendiendo a comportarse como un líquido. Es importante saber las características del tipo de asfalto y la

temperatura a la que va a estar sometido en su vida útil para así utilizar el más indicado.

#### **4.1.2 Composición química**

De la composición química del asfalto depende sus características y su comportamiento en la carretera por eso es tan importante conocerlo, el asfalto está compuesto por hidrocarburos, que son moléculas de carbonos unidos con enlaces iónicos, y covalentes cuyas valencias libres están saturadas por átomos de hidrógenos. Durante el proceso de refinación se eliminan los hidrocarburos más livianos y quedan los pesados que tienen una estructura molecular compleja.

(5)

El asfalto posee una estructura química similar a la de un coloide ya que al igual que este conserva dos fases una continua que agrupa los hidrocarburos más pesados formando micelas inmisibles y otra discontinua que es conformada por los máltenos.

- Asfáltenos (continua):

Son partículas sólidas, de una tonalidad oscura proporcionan la dureza del asfalto, son formados por los hidrocarburos de mayor peso molecular; los asfáltenos a mayor temperatura tienen mayor viscosidad y mejoran sus propiedades aglutinantes.

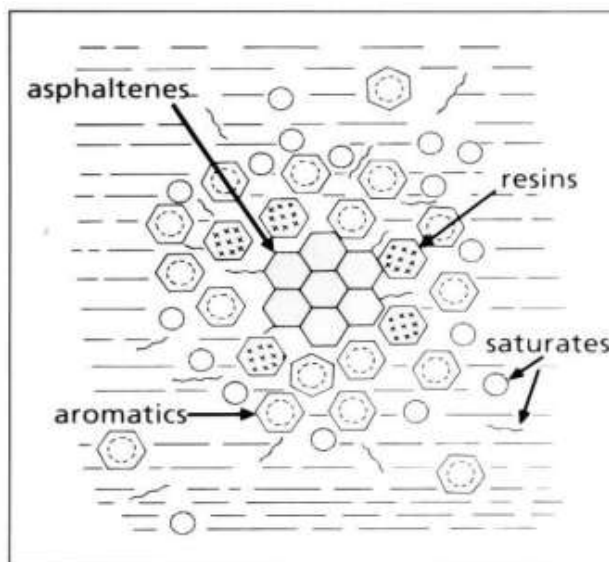
Entre mayor sea la cantidad del asfalto, es decir entre más pesado sea, se dice que el asfalto es de mejor calidad. (5)

- Máltenos (discontinua):

Los máltenos están compuestos por aceites y resinas cada uno de ellos aportan características diferentes, se pueden separar por métodos físicos, regularmente es mayor la cantidad de máltenos que asfalto no, Por ende estos rigen la mayoría de las características de los asfaltos como la adherencia de los agregados entre otras; Las resinas son las de mayor peso molecular y son las responsables de las

características aglutinantes y cementantes, tienen la capacidad de estabilizar los asfáltenos Y los aceites son los responsables de la consistencia, tienen una viscosidad baja y son muy lubricantes son los que permiten el movimiento de las micelas formadas a partir de los asfáltenos. Si la cantidad de aceites es alta el asfalto se comportara como un líquido viscoso ya que las micelas flotarán sin tocarse.

**Figura N. 2. Estructura coloidal del asfalto.**



Fuente: <http://www.frlp.utn.edu.ar/lemac/Publicaciones/Del%202005/007%20-%20cila%20reologia.pdf>. Marzo/2012

Detallando la estructura del coloide las resinas rodean los asfáltenos y los aceites rodean este compuesto, dependiendo de la calidad de los máltenos y asfáltenos el asfalto puede ser de dos tipos que son (6):

- Tipo sol: en ese tipo de asfalto las micelasson libres de moverse, poseen alta ductibilidad y son afectados por la temperatura fácilmente.
- Tipo gel: en este tipo de asfalto las micelas por forman una sola estructura, estos ligantes son duros, tienen baja ductibilidad y no se dejan afectar fácilmente por la temperatura.



- Tipo mediano: estos son los que se encuentran en la mitad del tipo gel y el tipo sol.

#### **4.1.3 Reología de los asfaltos.**

La reología es el estudio del comportamiento de la deformación y el fluir de la materia, es la parte física que relaciona el esfuerzo y la deformación(7).

Mejorando las propiedades del asfalto podemos aumentar la vida útil de las carreteras ya que el ligante asfáltico es el material más importante de la carpeta de un pavimento flexible, es el que proporciona a los agregados la adherencia, la impermeabiliza y le da las propiedades elásticas que le permiten volver a su estado normal después de una deformación causada por cargas vehiculares, entre otras funciones, determinando el comportamiento reológico del bitumen podremos aproximarnos al comportamiento que va a tener el pavimento en su vida útil.

Las propiedades reológicas más importantes son:

- Consistencia del asfalto: es la resistencia que pone el asfalto a ser deformado, se mide con los ensayos, de punto de ablandamiento que es el que mide la tendencia a fluir de asfalto a altas temperaturas y el ensayo de penetración estándar que mide la dureza del asfalto al ser penetrado por una aguja normalizada.  
Para poder estimar la consistencia de un asfalto a otro se debe elegir una temperatura de referencia y hacer comparaciones de los resultados de penetración estándar y viscosidad.
- Viscosidad: Se denomina coeficiente de viscosidad a la relación entre el esfuerzo cortante aplicado y la deformación por corte obtenida; es una medida de la resistencia del líquido a fluir y comúnmente se llama viscosidad. Se puede medir con el ensayo de viscosidad rotacional (8).

- Pureza: este es el índice de materia orgánica que puede poseer un asfalto, los asfaltos naturales son los que contienen mayor cantidad de materia orgánica
- Ductilidad: es la medida de cuanto puede ser estirado una muestra de asfalto.
- Adherencia: es la propiedad del asfalto que le permite ser mezclado con sustancias pétreas y otros.

Los ensayos comúnmente utilizados son de:

- Penetración estándar: mide la distancia que recorre una aguja normalizada con una carga de 100g y a una temperatura de 25°C (77°F). este laboratorio es una medida de consistencia, que entre mayor sea mayor es la calidad del asfalto. (9)
- Punto de ablandamiento: El punto de ablandamiento es útil para clasificar productos bituminosos y es un valor índice de la tendencia del material a fluir cuando está sometido a temperaturas elevadas, durante su vida de servicio. También, puede servir para establecer la uniformidad de los embarques o fuentes de abastecimiento.(10)
- Ensayo de viscosidad rotacional: este ensayo mide la viscosidad aparente del asfalto del asfalto a elevadas temperaturas, desde 60° a 200°C, usando un viscosímetro rotacional equipado con un sistema termosel.

Otros ensayos utilizados son:

- Ensayo de punto de inflamación: Mide la temperatura en la que el asfalto se inflama, esta temperatura es menor que la del punto de combustión y se realiza en un vaso de bronce con asfalto calentándose a una rata controlada

hasta que sobre la superficie del asfalto se muestre una llama. El punto de inflamación representa la temperatura a la cual un asfalto puede calentarse con seguridad, sin que éste se inflame en presencia de una llama. Esta temperatura representará el punto de inflamación.

- Ensayo en horno de película delgada: este ensayo simula el envejecimiento de un asfalto sometiéndolo a elevadas temperaturas siendo girado a 5 rev/min durante 5 horas, después de esto se le realizan pruebas de viscosidad penetración y punto de ablandamiento.
- Ensayo de ductilidad: este ensayo mide la distancia a la cual la muestra se rompe cuando el asfalto es sometido a una elongación determinada.
- Ensayo de solubilidad: es la medida de pureza del asfalto se disuelve el asfalto en tricloro-etileno, luego se filtra y se pesa que cantidad de sustancia no se disolvieron.

#### **4.1.4 Envejecimiento del asfalto. (1)**

Existen dos tipos de envejecimiento en una mezcla asfáltica es que se produce en la etapa de la fabricación y/o colocación que es llamado de corto plazo, y el que se produce a partir de los factores medio ambientales y altos volúmenes de tránsito que se produce a largo plazo.

La calidad de los materiales en una de las principales razones del envejecimiento y el material mas importante y el que posee más funciones es el asfalto, de las propiedades y características de este depende la adherencia de los agregados, la impermeabilización de la estructura del pavimento, la elasticidad.

Las principales causas de envejecimiento a largo plazo más comunes son la oxidación, la volatilización, la toxitropia, la sinéresis y la separación:

- La oxidación: esta causa de envejecimiento es la más fuerte y se da a partir de la inclusión de partículas de oxígeno en la estructura polimérica del asfalto.
- La polimerización: es la que produce el endurecimiento del asfalto ya que las moléculas poliméricas se adhieren en estructuras fuertemente unidas y con el pasar del tiempo aumentan de tamaño.
- La volatilización: calentar mucho el asfalto puede causar pérdida de aceites livianos.
- La toxitropia: es notoria en las fisuras y grietas, su causa es la unión débil entre moléculas.
- La sinéresis: esta causa de envejecimiento se da a partir del cambio químico que se da al separarse las fases del asfalto dejando en la parte superior los aceites más livianos siendo estos arrastrados por las llantas de los vehículos.
- La separación: se da a partir de la separación de los máltenos y los asfáltenos.

## 4.2 Filler

### 4.2.1 Definición.

Los filler son sustancias que no son solubles en el asfalto pero son capaces de mejorar las propiedades y características del ligante siendo adicionadas, casi siempre son sustancias como el cemento, el polvo de tiza, la ceniza, la cal, talco entre otros minerales como la cal, la madera, el corcho, y algunas veces se utilizan sustancias minerales como la madera el corcho.

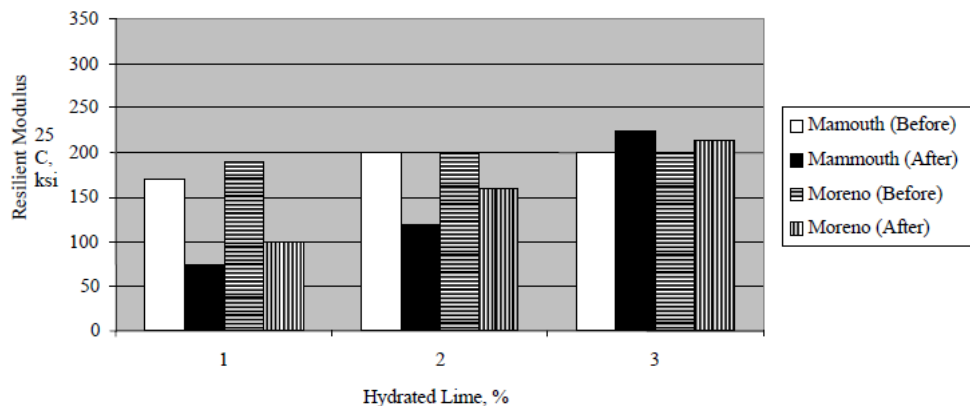
Generalmente el efecto que tiene esta sustancia en el asfalto es endurecerlo y darle un mejor comportamiento frente el envejecimiento y la deformación se disminuye. La mejora depende de la cantidad, la calidad y la forma del filler adicionado. Un filler como el polvo de ceniza proporciona un efecto menor con respecto a los filler normales como el cemento o la cal hidratada. (11).

Los filler solo influyen en las propiedades físicas ya que no cambian la estructura molecular del asfalto, generalmente son sustancias que paren por el tamiz #200. La mezcla de filler-ligante ha aumentado su popularidad en el mercado puesto que mejoran el comportamiento de las vías con el transcurrir del tiempo y disminuyendo fallas como la piel de cocodrilo, el ahuellamiento, fisuras entre otros; uno de los filler mas utilizados es la cal el cual tiende a mejorar, la adherencia del ligante con el agregado, su comportamiento frente al agua y disminuye su envejecimiento.

Según investigaciones anteriores la mejora de las propiedades del asfalto es proporcional a la cantidad de adición de filler que se le haga hasta un 40% adiciones mayores a ese porcentaje ya las propiedades comienzan a disminuir.  
(1)

Según una investigación en los estados unidos la adición de la cal hidratada aumenta la rigidez del ligante asfáltico lo que ayuda a disminuir las cargas de tráfico haciendo que se distribuyan en una mayor área mitigando las deformaciones permanentes como se ve en la figura 3 donde los resultados que proporciona el ensayo con la muestra de asfalto puro (sin adiciones) son de una resistencia mucho menor a la que se nota con la adición de cal hidratada, la cual se aumenta con la adición de cal, lo que demuestra que la cal usada como filler mitiga deformaciones puesto que proporciona mayor rigidez al asfalto.(12)

**Figura 3. Efecto de la cal hidratada en los módulos resistentes antes y después acondicionado Lottman de Truckee y Grass Valley. California mezclas (después Epps et al. (1092))**



Fuente: The benefits of hydrated lime on hot mix asphalt)

Los filler como el cemento y la cal son agentes efectivos de adhesión, en los ensayos realizados las mezclas sin adiciones presentan una baja resistencia al daño del agua mientras con adiciones se nota una mayor resistencia. (13)

#### 4.2.2 Arcilla Calcinada.

El filler propuesto por nosotros es la arcilla calcinada, material que se produce después de calentar la arcilla a elevadas temperaturas para obtener ladrillos,

después de realizar este proceso industrial queda mucho residuo de arcilla ya calcinada que no se puede reutilizar y toca deshacerse de ella lo cual crea un desecho industrial de alto volumen, que esta en un 10% y un 20% de la materia prima inicial (2)

**Figura N. 4. Arcilla Calcinada Pasa tamiz # 200**



Fuente: Los autores.

La arcilla es conocida por su elasticidad y su endurecimiento por la acción del calor que la hace un material apto para hacer molduras o ladrillos, pero después de calentarse comienza a perder agua, a los 100°C inicia con la eliminación higroscópica aunque a esta temperatura no pierde la propiedad de dar masas, con una temperatura de 400°C pierde el agua de liberación, si se sube la temperatura a 700°C ya el arcilla no tiene agua, a 800°C ya la arcilla adquiere propiedades de dureza contracción y sonoridad, la sílice y la alúmina comienzan a formar un silicato anhidro (Mullita:  $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ ). Esta combinación se completa entre los 1100y los 1200°C y hacia los 1500 °C se comienzan a ver los primeros síntomas de vitrificación. La temperatura de cocción de los ladrillos es de 900°C a 1000°C donde ya se han perdido todas las propiedades de plasticidad y el agua, y ha ganado características de dureza contracción y sonoridad. (14)

Después de este proceso la arcilla queda hecha polvo, sin hidratación, característica de los filler comunes.

## 5. PROCEDIMIENTO

### 5.1 Materiales a utilizar

#### 5.1.1 Asfalto.

El asfalto es un material bituminoso que es utilizado en las mezclas asfálticas como el ligante de los materiales pétreos, la calidad de esta sustancia indica la mayoría de las propiedades de la mezcla asfáltica, por lo tanto de las características y la calidad que va a tener la vía en el transcurrir de su existencia.

El fin de este trabajo de investigación es proponer una posible adición a este material para mejorar sus propiedades físicas, sin modificar las químicas.

El asfalto lo obtuvimos de una planta ubicada en Fontibon, este material es asfalto 60/70 y posee las características del complejo industrial de Barrancabermeja. En el cuadro 1 se observan las características de un asfalto 60/70.

**Cuadro N. 1. Propiedades de un asfalto 60/70**

| <b>Producto: asfalto 60/70</b>  |                 |                |               |               |
|---------------------------------|-----------------|----------------|---------------|---------------|
| <b>Grado: asfalto liquido</b>   |                 |                |               |               |
| <b>Referencia: ASTM 1437</b>    |                 |                |               |               |
| <b>Actualización Marzo 2005</b> |                 |                |               |               |
| <b>Características</b>          | <b>Unidades</b> | <b>Métodos</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> |
| Ductibilidad a 25 °C, 5cm/min   | Cm              | D113           | 100           |               |
| Penetración a 25°C, 100g 5 s    | Mm/10           | D5             | 60            | 70            |
| Punto de ablandamiento          | °C              | D 36           | 45            | 55            |
| Punto de inflamación            | °C              | D 92           | 232           |               |
| Solubilidad en tricloroetileno  | g/100g          | D 2042         | 99            |               |
| Pérdida de masa                 | g/100g          | D 2872         |               | 1             |

**Fuente: Ecopetrol**

**[portal.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=222&conID=37385](http://portal.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=222&conID=37385)**



### 5.1.2 Filler.

Los filler están definidos como partículas finamente divididas que pueden modificar las propiedades del asfalto sin ser misiles en el, los filler más comunes son la cal, la arena y el cemento.

En este trabajo utilizaremos la arcilla calcinada y el cemento, con lo que se busca saber si la arcilla calcinada puede ser utilizada como filler convencional al igual que el cemento.

La arcilla calcinada la conseguimos en la ladrillera San Marcos que se encuentra ubicada en la antigua vía Bogotá Villavicencio, se tamizo por el tamiz #200 su granulometría se puede observar en el Anexo A y su color es Naranja lo que se nota en la figura N. 5A.

**Figura N. 5. Filler utilizados.**



A. Arcilla Calcinada



B. Cemento

Fuente: Los Autores.

El cemento que utilizamos en este trabajo es cemento argos con las siguientes características, Su apariencia se nota en la figura 5B.

**Cuadro N.2 Características del cemento utilizado.**

| <b>PARAMETROS QUIMICOS</b>                | <b>ESPECIFICACIONES ARGOS</b> | <b>NTC 321 Tipo1</b> | <b>ASTM C-1157 Tipo GU</b> |
|---|-------------------------------|----------------------|----------------------------|
| <b>Oxido de magnesio MgO, máx (%)</b>     | <b>6</b>                      | <b>7</b>             | <b>-</b>                   |
| <b>Trióxido de azufre, SO, máximo (%)</b> | <b>3,5</b>                    | <b>3,5</b>           | <b>-</b>                   |
| <b>Fraguado Inicial mínimo (minutos)</b>  | <b>90</b>                     | <b>45</b>            | <b>45</b>                  |
| <b>Fraguado inicial máximo (mínimo)</b>   | <b>320</b>                    | <b>480</b>           | <b>420</b>                 |
| <b>Expansión autoclave, máximo (%)</b>    | <b>0,8</b>                    | <b>0,8</b>           | <b>0,8</b>                 |
| <b>Expansión en agua, máximo (%)</b>      | <b>0,02</b>                   | <b>-</b>             | <b>0,02</b>                |
| <b>Resistencia a 3 díasmínimo (Mpa)</b>   | <b>13,8</b>                   | <b>8</b>             | <b>10</b>                  |
| <b>Resistencia a 7 díasmínimo (Mpa)</b>   | <b>20,7</b>                   | <b>15</b>            | <b>17</b>                  |
| <b>Resistencia a 28 días</b>              | <b>29</b>                     | <b>24</b>            | <b>28</b>                  |

Fuente: Cemento Argos.

### **5.2 Adición de los filler al asfalto.**

El procedimiento que se realizo para mezclar el asfalto con el filler respectivo fue:

- Se definen los porcentajes de adición que se van a utilizar, que en este saco serian 5%, 15%, 25%, 35%, y 50%.
- Se tamiza la arcilla calcinada por el tamiz N. 200, con el fin de tener los dos filler listos para su uso.
- Se pesa para cada muestra la cantidad exacta de filler, para cada muestra, es decir, se desean muestras de 1000 gr de las cuales las cantidades de material son las que se ven en el cuadro N. 3.

**Cuadro N. 3. Cantidad de filler según el porcentaje de adición.**

| Porcentaje | Cantidad de Asfalto (gr) | Cantidad de Arcilla (gr) | Total muestra (gr) |
|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|
| 0%         | 1000                     | 0                        | 1000               |
| 5%         | 950                      | 50                       | 1000               |
| 15%        | 850                      | 150                      | 1000               |
| 25%        | 750                      | 250                      | 1000               |
| 35%        | 650                      | 350                      | 1000               |
| 50%        | 500                      | 500                      | 1000               |

Fuente: Los Autores.

- En total son 11 muestras de las cuales son 5 con adición de cemento y 5 con adición de arcilla calcinada y una de muestra asfáltica.
- Inicialmente se calienta el asfalto virgen a una temperatura no mayor de 140°C., hasta que tenga una contextura manejable.
- Se pesa la cantidad correspondiente de asfalto para cada muestra y se separa en recipientes diferentes.
- Se eleva la temperatura del asfalto y se adiciona el filler, se agita con un mezclador a una baja velocidad 30 rpm, se hasta que la contextura sea totalmente uniforme. Esto se repite con las 10 muestras con adición.

### 5.3 Penetración de los materiales asfálticos.

Este ensayo mide la consistencia de los materiales asfálticos determinando cual es la distancia que penetra una aguja normalizada de 100g en un tiempo de 5 seg.

El equipo utilizado en este ensayo es:

- Penetrometro.
- Aguja de penetración.
- Recipiente Circular con las dimensiones que se ven en el cuadro 4.

**Cuadro N. 4. Dimensiones del recipiente circular necesario para el ensayo de penetración estándar.**

|  | <b>Diámetro<br/>mm(")</b> | <b>Profundidad<br/>mm(")</b> |
|--|---------------------------|------------------------------|
| <b>Penetración hasta 200</b>           | <b>55 (2,17)</b>          | <b>35(1,38)</b>              |
| <b>Penetración entre 200 y<br/>350</b> | <b>55 (2,17)</b>          | <b>70(2,75)</b>              |

Fuente: Norma I.N.V.E – 706 – 07

- Baño de agua.
- Baño auxiliar.
- Cronometro.
- Termómetros.

El material utilizado en este ensayo es:

- Asfalto virgen.
- Asfalto modificado con cemento con porcentajes del 5% al 50%.

- Asfalto modificado con arcilla calcinada con porcentajes del 5% al 50%.

Los pasos a seguir en este laboratorio son:

- Calentar la muestra hasta lograr una viscosidad adecuada para poderla verter en los moldes. De cada porcentaje se sacan 3 recipientes.
- Dejar enfriar por 1 hora cubiertos por vasos de vidrio para evitar la contaminación.
- Posteriormente dejamos las muestras en un baño de agua previamente graduado a 25°C por 1 hora.

***Figura N.6 Baño de agua.***



Fuente: Los autores.

- Se sacan las muestras y se procede a realizar las penetraciones con el penetrometro.
- Se deja caer sobre la muestra y se deja penetrar por 5 seg, se baja el vástago y se toma la medida de la penetración que arroja el penetrometro, esta medida es en mm/10. Se toman 3 medidas de cada recipiente y se cambia de muestra.

**Figura N.7. Penetrometro.**



**Fuente: Los autores**

#### **5.4 Punto de Ablandamiento de Materiales Bituminosos (Aparato de Anillo y Bola.**

Este método es usado para determinar a qué temperatura entre 30 y 157°C dos discos de asfalto se ablandan lo suficiente para que una esfera de acero caiga 25mm. Este ensayo mide la tendencia a fluir a temperaturas elevadas de los materiales bituminosos durante su vida de servicio en las carreteras.

El equipo necesario para realizar este ensayo es:

- Anillos de bronce
- Platos de base
- Bolas de acero
- Guías de contacto
- Vaso de vidrio

- Soporte de anillos y montaje completo.
- Termómetros.

Los materiales necesarios para ejecutar este ensayo son:

- Asfalto virgen.
- Asfalto modificado con cemento con porcentajes del 5% al 50%.
- Asfalto modificado con arcilla calcinada con porcentajes del 5% al 50%.
- Agua destilada
- Aceites aislantes.

El procedimiento en el laboratorio es:

- Se calienta el asfalto a una temperatura mayor de 110°C teniendo la precaución que no suba más de 140°C.
- Cuando el asfalto este lo suficientemente liquido se vierte en los anillos de bronce previamente bañado superficialmente con el aceite aislante y se deja enfriar más o menos 30 min.
- Se cortan los excesos de material que hayan quedado por fuera de los anillos de bronce con un cuchillo precalentado.
- Se llena el vaso de agua destilada, se le añade hielo hasta que llegue a una temperatura de 4°C, se coloca encima de un mechero a gas y con ayuda de un cronometro y un termómetro se calcula que el agua se caliente a una rata de 5 °C.
- Cuando la llama este en la rata deseada s e hace el montaje de los anillos el soporte las guíasetc. dentro del vaso y se toma el tiempo que la esfera envuelta en material bituminoso se demore en caer a la guía.

- Este procedimiento se hace con cada muestra.

### 5.5 Índice de Penetración de Cementos Asfálticos.

Esta norma busca calcular el índice de penetración  $I_p$  partir del punto de ablandamiento que se obtiene a partir de la norma INVE-712 y del valor de la penetración a 25°C de acuerdo con la norma INV E – 706 bajo la fórmula

$$I_p = \frac{20 \times t_{RaB} + 500 \times \log P - 1952}{t_{RaB} - 50 \times \log P + 120}$$

Donde:

$t_{RaB}$  = punto de ablandamiento en grados Celsius.

P = penetración en 0,1 mm a 25°C.

Teniendo en cuenta que si el resultado es:

-  $I_p > 1$  son cementos asfálticos con menor susceptibilidad a la temperatura. Se les llama tipo gel o soplado ya que la mayoría de los asfaltos oxidados hacen parte de este grupo.

-  $I_p < -1$  son los que poseen mayor susceptibilidad a la temperatura con un contenido alto de resinas y comportamiento algo viscoso.

-  $I_p$  entre 1 y -1 son los que poseen características intermedias que son los que generalmente se usan para la construcción de vías.

### 5.6 Viscosidad Rotacional.

Este ensayo es utilizado para determinar la viscosidad aparente del asfalto utilizando el viscosímetro rotacional equipado con un sistema transversal.

El equipo que se utiliza en este ensayo es:

- Horno
- Termómetros



- Balanza
- Vástagos cilíndricos
- Viscosímetro rotacional
- Controlador de temperatura

Los materiales que se necesitan para este ensayo son:

- Asfalto virgen.
- Asfalto modificado con cemento con porcentajes del 5% al 50%.
- Asfalto modificado con arcilla calcinada con porcentajes del 5% al 50%.

El procedimiento que se debe seguir para la ejecución de este laboratorio es:

- Teniendo definidas las temperaturas a las que se desea realizar el ensayo, que para nosotros son 100, 120, 140 y 160.
- Precalentar la Termo celda a las temperaturas definidas.
- Calentar las muestras de asfalto a una temperatura no mayor de 135 °C.
- La aguja utilizada para el ensayo fue la #21, se uso para todas las muestras.
- Se marcan los cilindros de aluminio como se muestra en la N. 8. Como solamente hay 5 cilindros, se realizan 3 marcaciones, 3 turnos de ensayo.

**Figura N. 8. Cilindros de aluminio marcados(Ensayo de Viscosidad Rotacional).**



Fuente: Los Autores.

- Cuando la termocelda haya alcanzado la temperatura adecuada, se inserta el tubo de aluminio, se enciende el viscosímetro y se inserta la aguja (el splindler) y se programa el viscosímetro con el número de aguja.
- Se baja la aguja con cuidado de dañar el alambre y el motor, guiándose por la marca de la termocelda.
- Se tapa la termocelda con una tapa de cerámica por 30 min, y se procede a encender el motor.
- Se ajusta el viscosímetro a una velocidad máxima de 50 Rpm y a un torque de 1%.
- Se procede a tomar la lectura de la viscosidad, la velocidad y el torque.

- Se apaga el motor cuando la velocidad sea cero, se retira la aguja, se limpia con gasolina y se procede a calentar para eliminarla.

**Figura N. 9. Ensayo de viscosidad rotacional.**



Fuente: los autores.

### **5.7 Stripping.**

Con este ensayo se busca valorar el efecto de la acción del agua sobre una película asfáltica recubriendo los agregados mediante un ensayo de adhesividad pasiva con el cual se puede observar que tan afines son los materiales midiendo el área cubierta estimada que se expresa como “superior al 95%” o “inferior al 95%” .

Para este ensayo el equipo que se debe utilizar son:

- Tamices uno de 3/8” (9,5mm) y el otro de 1/4”(6,3mm)
- Balanza.
- Horno, capaz de mantener una temperatura entre 60 y 149 °C
- Recipientes de aluminio o estaño.
- Vasos de vidrio

- Placa de calefacción.
- Espátula de acero rígida.

Los materiales que van a utilizar en este laboratorio son:

- Materiales pétreos.
- Asfalto virgen.
- Asfalto modificado con cemento con porcentajes del 5% al 50%.
- Asfalto modificado con arcilla calcinada con porcentajes del 5% al 50%.
- Agua destilada.

El procedimiento a seguir en el laboratorio es el siguiente:

- Se pesan 100 gramos de agregados secos y se añade entre 8g y 0,2g de asfalto, se mezclan durante 3 min hasta que la temperatura baje a temperatura ambiente con una espátula hasta que toda la superficie del agregado este cubierta.
- Posteriormente a esto se coloca la cacerola con los agregados ya cubiertos en un horno a 60°C, después se mezclan hasta que queden cubiertos totalmente.
- Se pasa el agregado a frascos de 500cm<sup>3</sup> de capacidad y se llenan hasta 400cm<sup>3</sup> con agua destilada a temperatura ambiente y se deja en reposo 16 horas.
- Pasadas las 16 horas observamos las muestras y visualmente se dice si el área que permanece cubierta es mayor o menor a 95%.

**Figura N. 10. Laboratorio de Stripping.**



Fuente: Los autores. Laboratorio de Pavimentos, Universidad Piloto De Colombia.

### **5.8. Adherencia en bandeja.**

Este ensayo determina el grado de adherencia que tienen los agregados pétreos y un asfalto.

El equipo utilizado para este laboratorio es:

- Horno
- Bandeja. De acero de 2,38 mm de espesor y 200\*200 mm de base y una altura de 20mm de profundidad.

El material utilizado en este laboratorio es:

- Materiales pétreos.
- Asfalto virgen.
- Asfalto modificado con cemento con porcentajes del 5% al 50%.
- Asfalto modificado con arcilla calcinada con porcentajes del 5% al 50%.

El procedimiento a seguir en este ensayo es:

- Se toma una muestra representativa de 550 piezas de agregado petreo, se secan en el horno.
- Se calienta el ligante asfáltico y se vierte en la bandeja respectivamente marcada con la cantidad de adición y material con el que se está trabajando, dejando una película entre 1,5 mm y 2mm en cada una.
- Se colocan de a 50 piezas por bandeja, una por una, se deja enfriar hasta 50°C y se colocan en un horno a 60°C durante 24 horas.
- Se le agrega agua a la bandeja hasta cubrir totalmente las piedras, y se dejan a temperatura ambiente durante 4 días.
- Se sacan las piedras con un alicate una por una y observa que cantidad de asfalto queda adherido a las piedras, y se refleja en porcentaje.

***Figura N. 11 Montaje del ensayo de adherencia en bandeja.***



Fuente: Los autores.

## 6 ANALISIS Y RESULTADOS.

### 6.1 Penetración estándar.

Este ensayo se realizo a temperatura ambiente (25°C) con tres muestras para cada porcentaje de adición de cemento y arcilla calcinada, con el fin de observar la variación del comportamiento con el cambio de relación llenante- asfalto. Cada porcentaje se comparo con la muestra control con cero adiciones.

Los resultados con arcilla calcinada fueron los siguientes:

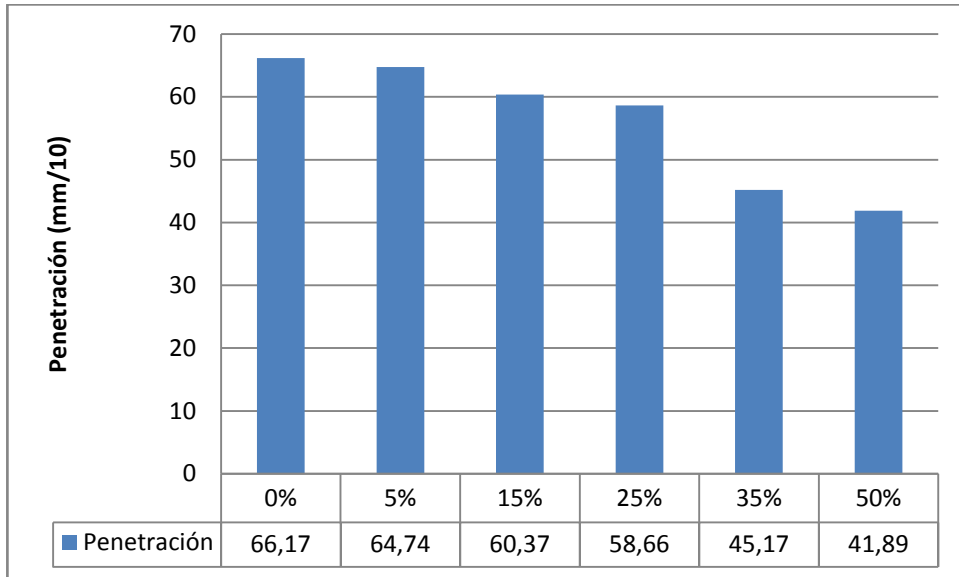
Teniendo en cuenta que de este ensayo se tomaron 45 datos en total, 9 de cada porcentaje, se realizo la media estadística de cada uno de los porcentajes sumando los 9 datos obtenidos y dividiéndolos entre los 9, para poder obtener el dato con el que vamos a trabajar para analizar los resultados, en el cuadro siguiente se muestra la media de cada porcentaje y la desviación estándar que obtuvimos por porcentaje, la menor desviación obtenida fue de 1,2y la máxima fue de 3,91;esto demuestra que de una muestra a otra no se tienen variaciones significativas.

**Cuadro N. 5. Promedios y desviación estándar de los datos obtenidos con el ensayo de penetración estándar.**

| <b>Penetración estándar (mm/10)</b> |                 |                            |
|-------------------------------------|-----------------|----------------------------|
| <b>Porcentaje</b>                   | <b>Promedio</b> | <b>Desviación estándar</b> |
| 0%                                  | 66,17           | 0,49                       |
| 5%                                  | 64,74           | 2,47                       |
| 15%                                 | 60,37           | 1,53                       |
| 25%                                 | 58,66           | 2,30                       |
| 35%                                 | 45,17           | 3,91                       |
| 50%                                 | 41,89           | 1,20                       |

Fuente: Los autores.

**Figura 12. Resultados del ensayo Penetración Estándar con diferentes porcentajes de adición de arcilla calcinada.**



Fuente: Los autores.

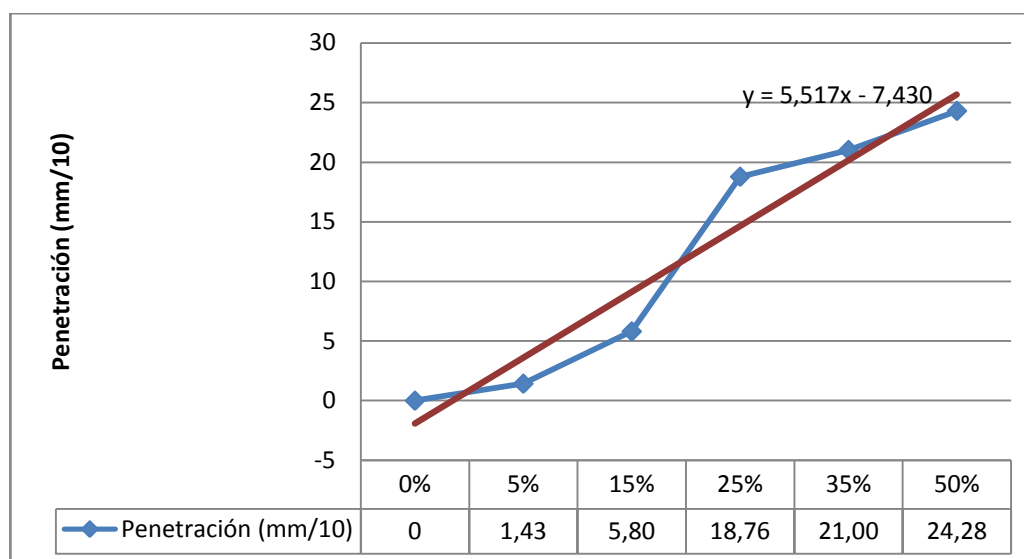
La muestra con cero adiciones muestra una penetración superior como se ve en la grafica numero 10, se nota una disminución de la penetración con el aumento del porcentaje de adición de arcilla calcinada. Nótese que en cuanto mayor sea la participación de la arcilla mayor va a ser la mejora en la consistencia del asfalto.

En el porcentaje de 0% la penetración es del 66,17 (mm/10) y va disminuyendo según la cantidad de arcilla calcinada hasta cuando se tiene el 50% de adición la penetración es del 41.89 (mm/10).

se observa en la grafica numero 12 de penetración, se puede constatar, una mejora en todos los porcentajes inclusive en el mayor que es del 50%, aunque la pendiente comienza a disminuir en el 35% haciendo pensar que la línea de tendencia con porcentajes más altos ya no mostraría mejora en las propiedades si no por el contrario disminución.



**Figura13.Reducción de la penetración con diferentes porcentajes de adición de arcilla calcinada.**



Fuente: Los autores.

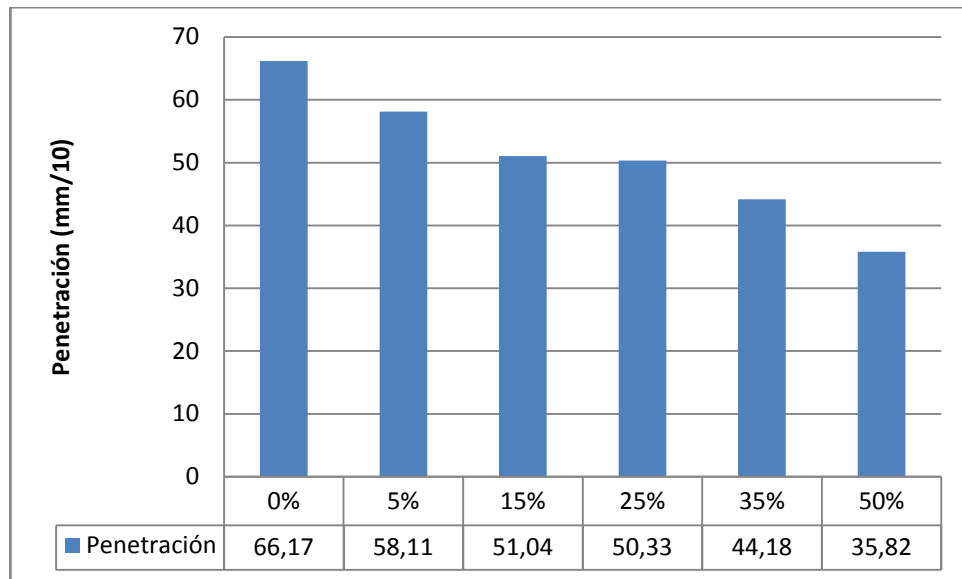
Los resultados con cemento fueron los que se ven en la figura 13, los cuales obtuvimos del promedio de los 9 datos conseguidos de cada porcentaje, estos promedios se ven en el cuadro N. 6, los datos completos se pueden ver en el Anexo B. Las desviaciones en este caso no son mayores de 1lo que hace notar la homogeneidad de los datos obtenidos.

**Cuadro N.6. Promedios y desviación estándar de los datos obtenidos con el ensayo de penetración estándar.**

| Penetraciónestándar (mm/10) |          |                     |
|-----------------------------|----------|---------------------|
| Porcentaje                  | Promedio | Desviación estándar |
| 0%                          | 66,17    | 0,49                |
| 5%                          | 58,11    | 0,63                |
| 15%                         | 51,04    | 0,48                |
| 25%                         | 50,33    | 0,69                |
| 35%                         | 44,18    | 0,52                |
| 50%                         | 35,82    | 0,87                |

Fuente: Los autores.

**Figura N. 14. Resultados del ensayo de penetración estándar con diferentes porcentajes de adiciones de Cemento Portland.**

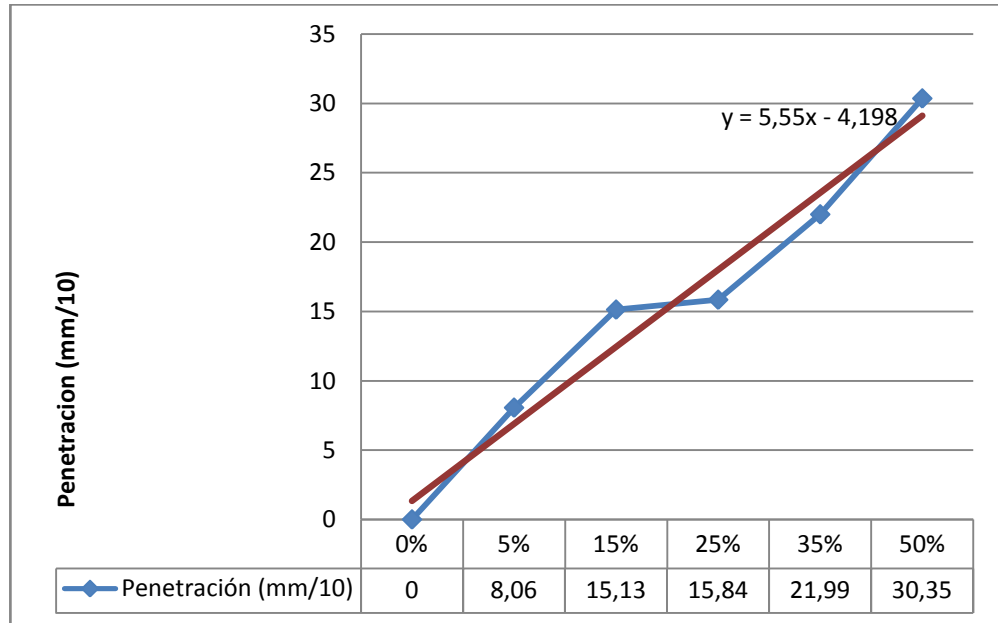


Fuente: los autores.

En la grafica se nota una disminución de la penetración de igual manera que se ve con la arcilla calcinada, la penetración y el porcentaje de adición del cemento, son inversamente proporcionales.

La penetración del asfalto virgen es de 66,17 (mm/10) lo que se nota en la 14. Se disminuye considerablemente según la adición del filler, sea Arcilla calcinada o cemento Portland; la muestra con el 50% de adición disminuye casi a la mitad, el ligante asfaltico tiene una reducción en la penetración de 30,35 (mm/10), la cual es menor que la de la arcilla calcinada.

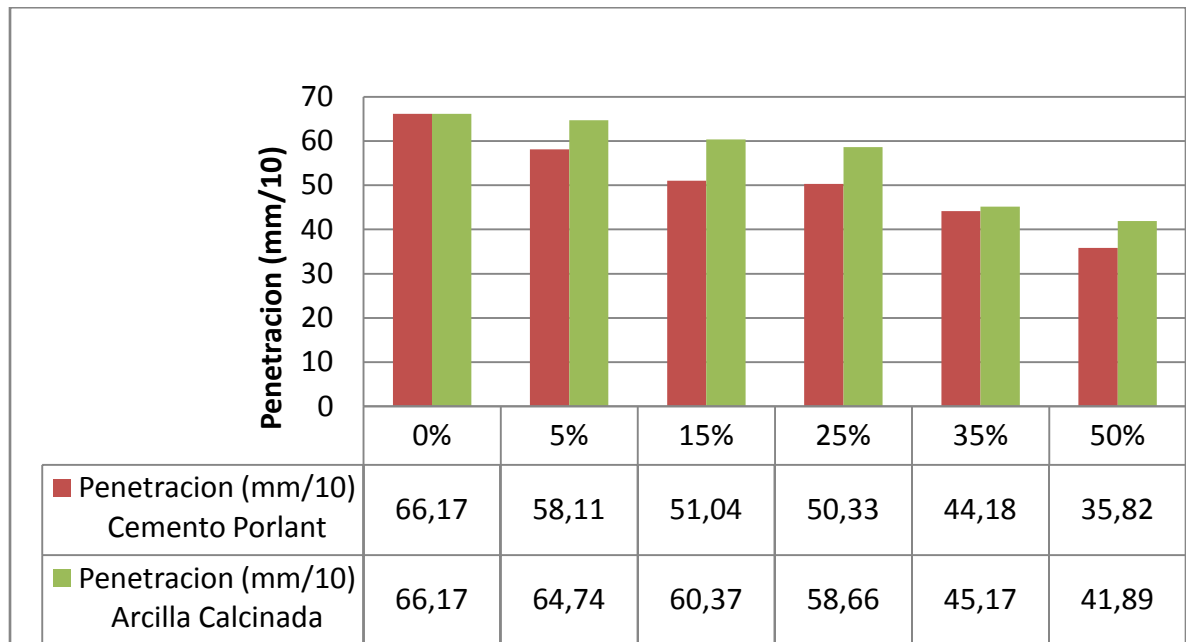
**FiguraN. 15. Cambio de penetración con diferentes porcentajes de adición de Cemento Portland.**



Fuente: los autores.

Comparando el comportamiento que se obtiene con la Arcilla calcinada y el cemento se puede apreciar que son similares, aunque el comportamiento de la arcilla tiende a ser menor como se nota en la figura 16. La penetración en 3 de los 5 porcentajes es menor, aunque la diferencia no es mucha.

**Figura N. 16. Comparación de los resultados de penetración entre la arcilla calcinada y el Cemento Portland.**



Fuente: los autores.

Iniciando con el porcentaje del 5% notamos que la arcilla reduce la penetración y así mismo la consistencia, pero mientras va subiendo el porcentaje se van igualando, en el porcentaje del 35% la diferencia es solamente de 1 mm/10 y posteriormente llegando al 50% de adición la penetración es menor con el cemento.

### 6.2 Anillo y bola:

Esta prueba se realizó en un intervalo de temperatura de 30°C a 157°C con el aparato de anillo y bola manejando el aumento de la temperatura a una tasa controlada de 5°C por minuto. Se tomaron 6 datos por cada porcentaje de adición.

Utilizando Arcilla Calcinada como filler obtenemos los resultados que se muestran en el cuadro 7 donde la desviación estándar mayor es de 0,95 y la menor de 0,38 con lo que se puede notar la homogeneidad de las temperaturas:

**Cuadro N 7. Promedios y desviación estándar de los datos obtenidos con el ensayo de Anillo y bola.**

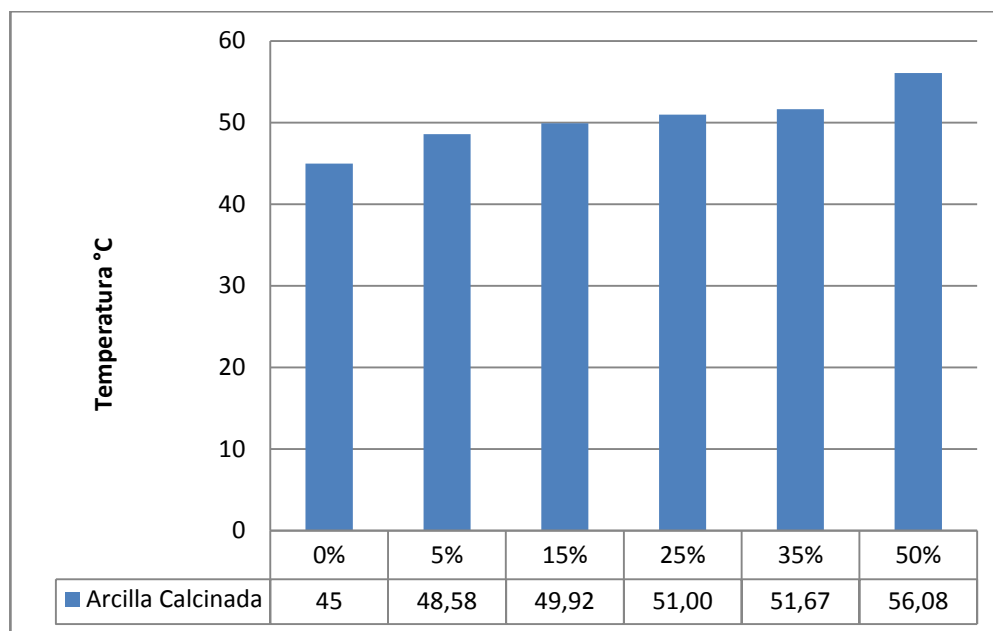
| <b>Anillo y bola (mm/10)</b> |                 |                            |
|------------------------------|-----------------|----------------------------|
| <b>Porcentaje</b>            | <b>Promedio</b> | <b>Desviación estándar</b> |
| 0%                           | 45,00           | 0,45                       |
| 5%                           | 48,58           | 0,38                       |
| 15%                          | 49,92           | 0,66                       |
| 25%                          | 51,00           | 0,95                       |
| 35%                          | 51,67           | 0,52                       |
| 50%                          | 56,08           | 0,38                       |

Fuente: Los autores.

Con cero por ciento de adiciones vemos en la figura siguiente que la temperatura de ablandamiento es de 45°C lo cual para un asfalto común esta dentro de los parámetros normales, vemos que esta temperatura de ablandamiento se hace más alta con el aumento del filler y de esta manera se mejora la resistencia del ligante a altas temperaturas, lo que en la vida real disminuiría problemas como el ahuellamiento y la fatiga entre otros.

La mejora superior se obtiene con el mayor porcentaje que es del 50%, se aumenta la resistencia del asfalto 11.08 °C , esta mejora se ve de forma constante con cada porcentaje, en ningún punto se estabiliza la temperatura.

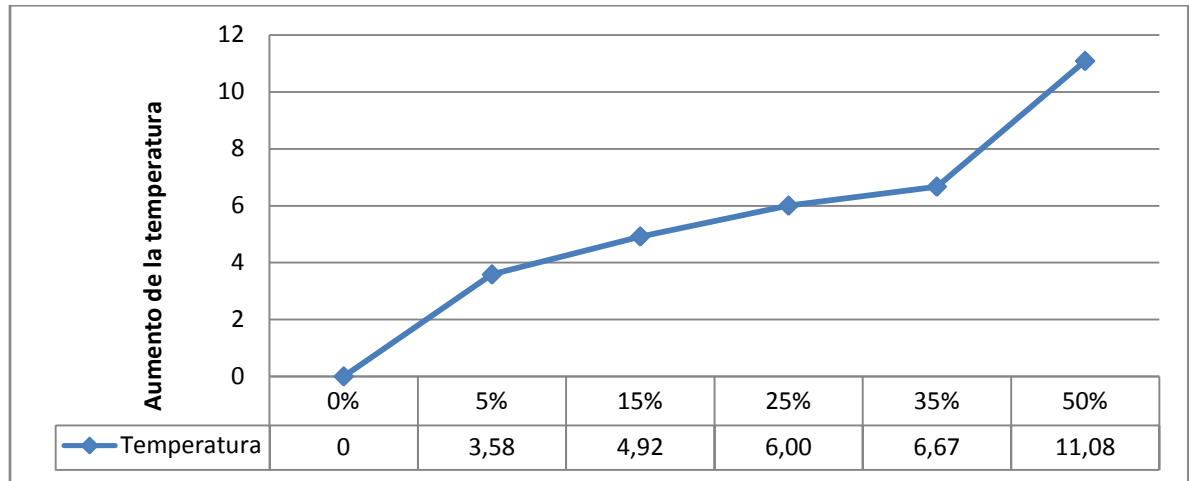
**Figura N. 17. Resultados del ensayo de anillo y bola con diferentes porcentajes de adición de arcilla calcinada.**



Fuente: Los autores.

Con la mayor adición de la arcilla calcinada, tenemos una resistencia hasta llegar a 56,08°C temperatura que en nuestro medio es bastante buena, ya que son temperaturas muy inusuales en una vía se asegurará no tener fallas de ahuellamiento y/o fatiga, es decir no existirán deformaciones permanentes en el asfalto que es lo ideal.

**Figura N. 18. Cambio de la temperatura de ablandamiento del asfalto con diferentes porcentajes de adición de arcilla calcinada.**



Fuente: los autores.

Obtener una reducción en la temperatura de 11,08°C es algo muy bueno, se ve en la figura anterior que hay un salto entre los porcentajes de adición del 35% y el 50%. Lo que nos dice que la arcilla calcinada reduce la susceptibilidad térmica del asfalto ayudándolo a que su comportamiento sólido persista a una temperatura mayor.

Como se ve en la figura anterior la resistencia a la temperatura aumenta según el porcentaje de adición y se ve una pequeña disminución en esa mejora entre los dos porcentajes más grandes, por lo que se supone que con adiciones mayores el ligante asfáltico tiende a estabilizarse para luego descender.

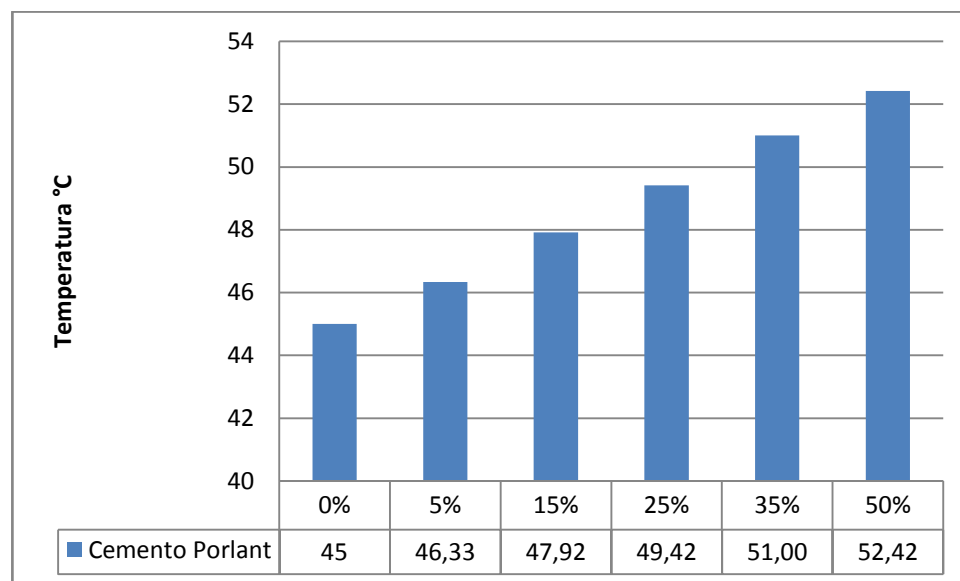
Los resultados con Cemento Portland se ven en el cuadro 8, los que se obtuvieron a partir de 6 datos que se ven en el Anexo B, las desviaciones estándar de estos datos no suben de 0,5 demostrando que todos los datos con adición de cemento fueron muy homogéneos.

**Cuadro N. 8. Promedios y desviación estándar de los datos obtenidos con el ensayo de Anillo y bola.**

| Anillo y bola (mm/10) |          |                     |
|-----------------------|----------|---------------------|
| Porcentaje            | Promedio | Desviación estandar |
| 0%                    | 45,00    | 0,45                |
| 5%                    | 46,33    | 0,26                |
| 15%                   | 47,92    | 0,49                |
| 25%                   | 49,42    | 0,20                |
| 35%                   | 51,00    | 0,45                |
| 50%                   | 52,42    | 0,20                |

Fuente: Los autores.

**Figura 19. Resultados de anillo y bola con diferentes porcentajes de adición de cemento Portland.**



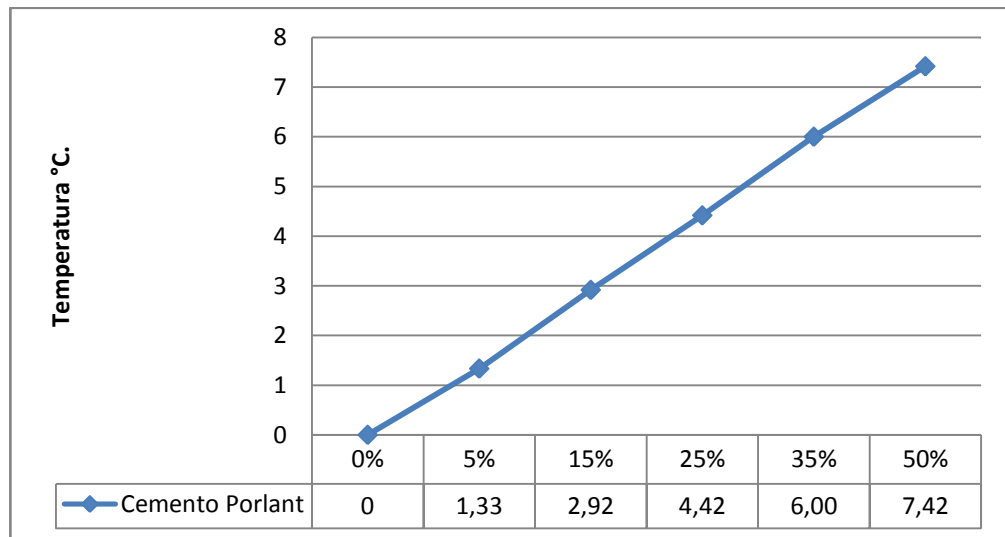
Fuente: los autores.

Con las diferentes adiciones de cemento se ve un aumento en la temperatura la mejora total es de 7,42 °C, mientras la adición se va acrecentando se observa de



igual manera una ampliación en la temperatura esto aumenta de una manera constante.

**Figura N. 20. Cambio de la temperatura de ablandamiento del asfalto con diferentes porcentajes de adición de cemento Portland.**

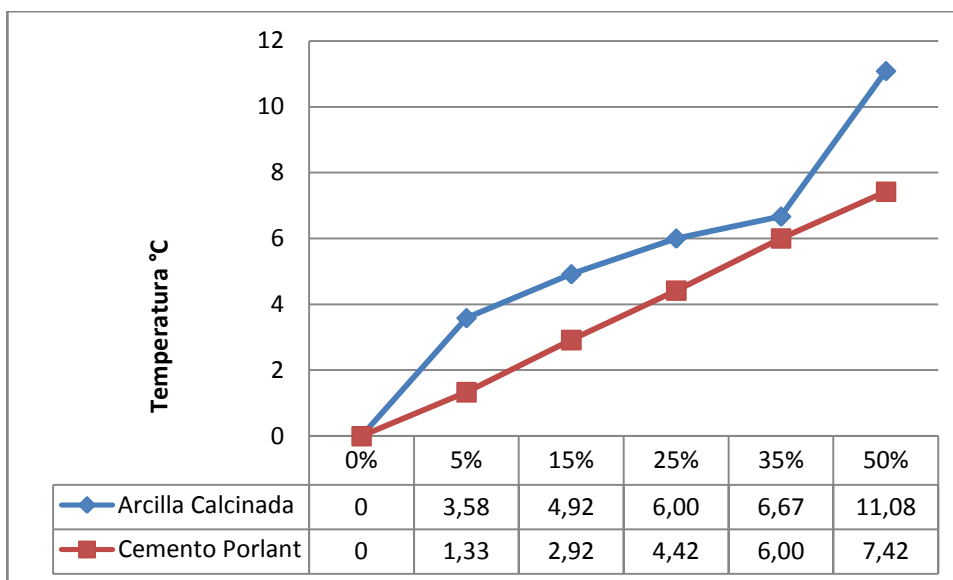


Fuente: los autores.

Comparado con la arcilla calcinada se obtiene una reducción mayor, lo que demuestra que este filler es superior porque disminuye la susceptibilidad térmica entre 3°C a 4°C más que el cemento, que es el llenante mineral más usado. Lo que se ve en la siguiente figura.

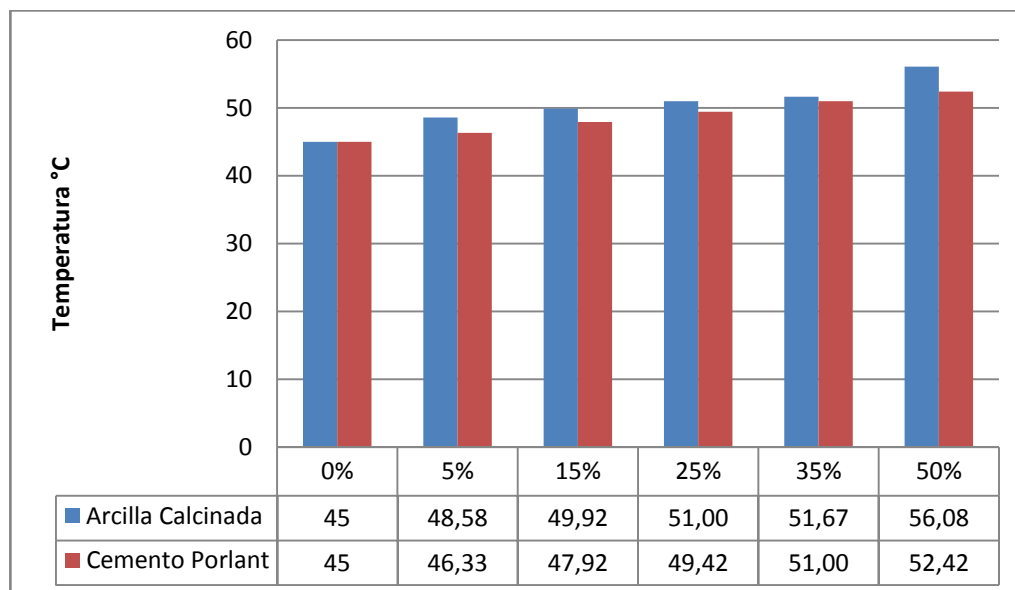
El cotejo de las temperaturas que resultan en cada uno de los porcentajes arroja que la arcilla calcinada y el cemento mejoran notoriamente la resistencia a la temperatura del asfalto. Siendo mejor la mejora de la arcilla calcinada como se ve en las figuras 21 y 22.

**Figura N. 21. Comparación del cambio de temperatura en diferentes porcentajes de adición con cemento o arcilla calcinada.**



Fuente: Los autores.

**Figura N. 22. Comparación de la temperatura en diferentes porcentajes de adición con cemento o arcilla calcinada.**



Fuente: los autores.

### 6.3 Índice de penetración.

El índice de penetración es una medida de susceptibilidad del asfalto a la temperatura, se basa en los laboratorios de penetración estándar determinada por la norma INVE- 706 y anillo y bola determinada por la norma INV E – 712.

La fórmula que determina el  $I_p$  (índice de penetración) es la que se explica en el numeral 5.3, y que se muestra a continuación:

$$I_p = \frac{20 \times tRaB + 500 \times \log P - 1952}{tRaB - 50 \times \log P + 120}$$

Los resultados con Arcilla calcinada fueron los que se notan en el cuadro N. 9:

**Cuadro N 9. Resultados del índice de penetración con diferentes porcentajes de arcilla calcinada.**

|     | <b>Penetración</b> | <b>Anillo y Bola</b> | <b><math>I_p</math></b> |
|-----|--------------------|----------------------|-------------------------|
| 0%  | 66,17              | 45,00                | -1,92                   |
| 5%  | 64,74              | 48,58                | -0,96                   |
| 15% | 60,37              | 49,92                | -0,78                   |
| 25% | 47,41              | 51,00                | -1,08                   |
| 35% | 45,17              | 51,67                | -1,03                   |
| 50% | 29,41              | 56,08                | -0,94                   |

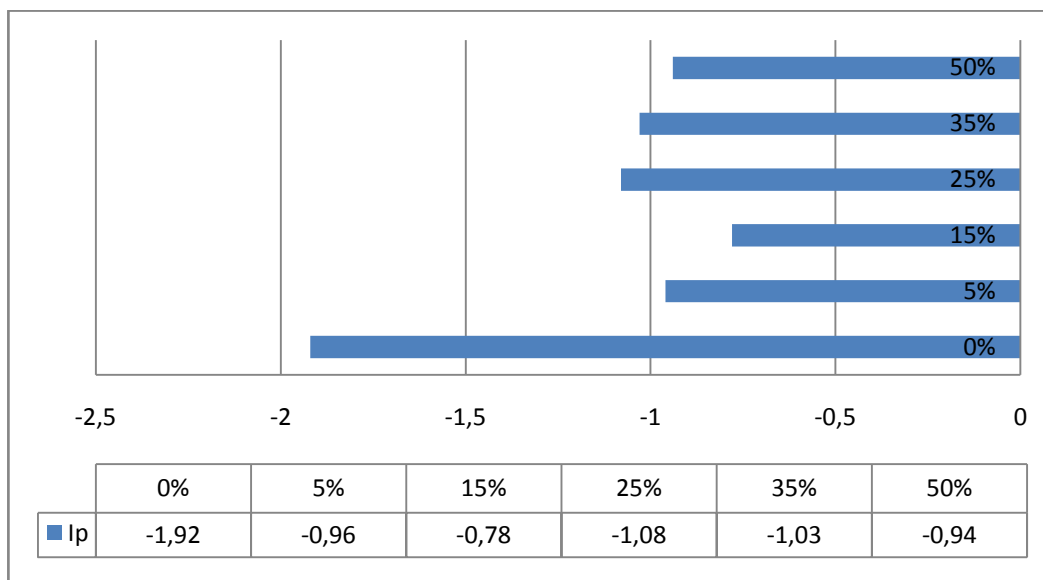
Fuente: Los autores.

Los resultados obtenidos del índice de penetración nos indican, que los valores hallados representan la susceptibilidad a la temperatura. Es de indicar que los resultados esperados se comportaran de una manera lineal respecto a la cantidad de arcilla calcinada presente en el asfalto. Pero los resultados muestran dos categorías de  $I_p$ . diferentes pero dentro de la normativa vigente.

Si analizamos la grafica numero 20 el Ip. de la muestra control nos da por fuera del rango -1 al 1 recomendado para asfaltos de uso vial y dentro de este encontramos 5%, 15% y 50% sugerido. Sin embargo nos deja sin un análisis claro su comportamiento al 25% y 35%.

Se puede decir que aunque los resultados no tengan una tendencia lineal todos disminuyen la susceptibilidad del asfalto llegando a obtener índices de penetración entre 1 y -1 que son los asfaltos que poseen propiedades intermedias, y son los recomendados para las vías. Se nota que en los porcentajes 5% ,15% y 50% el cambio del índice de penetración es constante, con una tendencia lineal con resultados óptimos que dejan al asfalto con las características optimas para ser utilizado en una vía.

**Figura N. 23. Grafica de resultados del índice de penetración.**



Fuente: Los Autores.

Los resultados con cemento portland fueron los que se notan en el cuadro N. 10:

**Cuadro N 10. Resultados del índice de penetración con diferentes porcentajes de arcilla calcinada.**

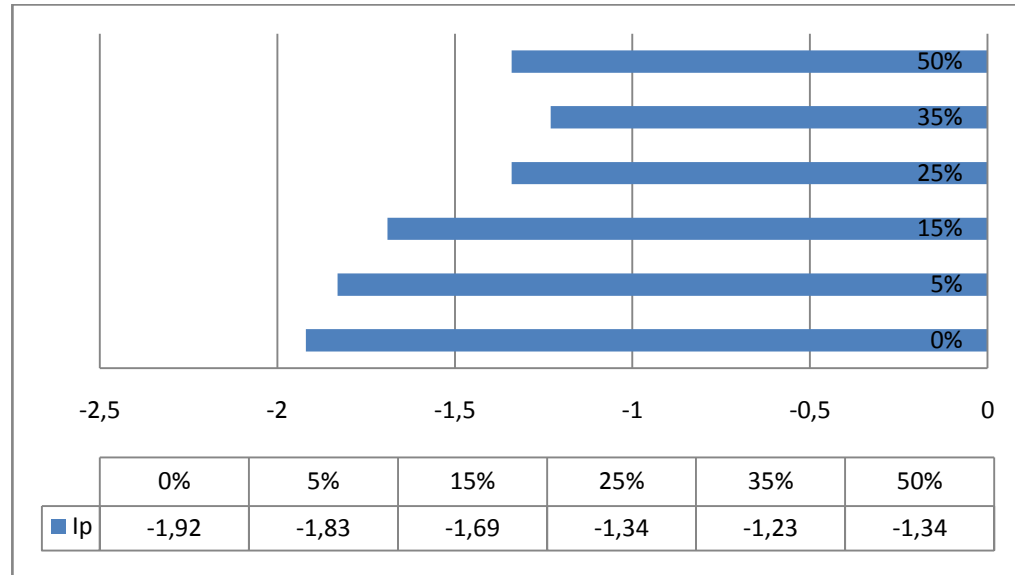
| <b>Índice de Penetración (mm/10) con Cemento Portland</b> |                    |                      |           |
|---|--------------------|----------------------|-----------|
|   | <b>Penetración</b> | <b>Anillo y Bola</b> | <b>Ip</b> |
| 0%  | 66,17              | 45,00                | -1,92     |
| 5%  | 58,11              | 46,33                | -1,83     |
| 15%   | 51,04              | 47,92                | -1,69     |
| 25%   | 50,33              | 49,42                | -1,34     |
| 35%   | 44,18              | 51,00                | -1,23     |
| 50%   | 35,82              | 52,42                | -1,34     |

Fuente: Los autores.

El cemento disminuye la susceptibilidad de igual manera que lo hace la Arcilla calcinada pero también tiene la misma tendencia que esta, ya que los resultados varían sin tener una directriz lineal como los resultados que se consiguieron con los laboratorios anteriores de penetración y anillo y bola, como se ve en la figura N. 24.

En los porcentajes 5%, 15%, 25% y 35% se ve una disminución constante donde la disminución de la susceptibilidad del asfalto es proporcional a la cantidad de cemento que se le ha adicionado. Notando la disminución mayor que es de -1,23 se acerca a la condición óptima de los asfaltos pero no alcanza a estar dentro de ese rango.

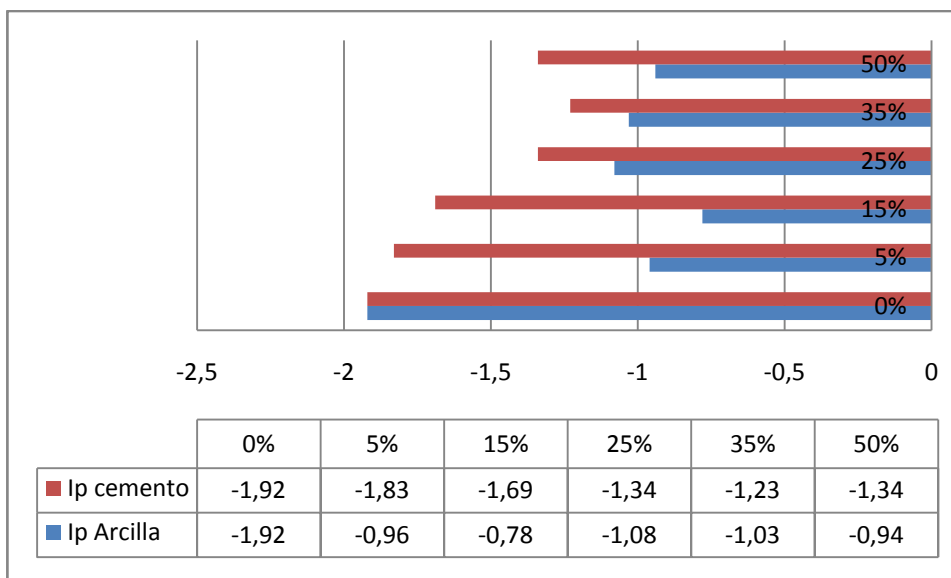
**Figura N. 24. Resultados del ensayo de índice de penetración con diferentes adiciones de cemento portland.**



Fuente: Los autores.

Los resultados que se obtuvieron con la arcilla son mucho mejores que los que se consiguieron con el cemento lo que se puede observar con mayor claridad en la figura N. 25, en todos los porcentajes la arcilla disminuye la susceptibilidad mucho mayor que el cemento. La mayor disminución que se obtiene con la arcilla es de  $-0,74$  lo que hace que las propiedades alcanzadas con este filler sean apropiadas para un asfalto utilizado en vías, lo que no pasa con el cemento.

**Figura N. 25. Comparación de los resultados del índice De Penetración.**



Fuente: Los Autores

#### 6.4. Stripping.

Este ensayo describe la medida del efecto que tiene el agua sobre la película asfáltica que recubre el agregado, apoyándose en un ensayo de adhesividad pasiva que dice la afinidad que pueden tener los dos materiales.

**Cuadro N. 11 Resultados de Stripping.**

|                                      |                 |
|--------------------------------------|-----------------|
| Muestra Control                      | Inferior al 95% |
| Asfalto con 5% de Cemento            | Superior al 95% |
| Asfalto con 15% de Cemento           | Superior al 95% |
| Asfalto con 25% de Cemento           | Superior al 95% |
| Asfalto con 35% de Cemento           | Superior al 95% |
| Asfalto con 50% de Cemento           | Superior al 95% |
| Asfalto con 5% de Arcilla calcinada  | Superior al 95% |
| Asfalto con 15% de Arcilla calcinada | Superior al 95% |
| Asfalto con 25% de Arcilla calcinada | Superior al 95% |
| Asfalto con 35% de Arcilla calcinada | Superior al 95% |
| Asfalto con 50% de Arcilla calcinada | Superior al 95% |

Fuente: Los autores.

Con la adición del filler se aumenta la afinidad que puede poseer un asfalto 60/70 con los agregados pétreos, con la ampliación del porcentaje de añadidura de filler se nota un mejor cubrimiento frente al agua mejorando las propiedades del asfalto común que no da un buen cubrimiento a los agregados.

Desde el primer porcentaje que es 5% se nota un mejor cubrimiento mejorando la adherencia del asfalto al material pétreo.

Este ensayo puede ser considerado como subjetivo de tipo apreciativo de apto o no apto para ser utilizado en obra según lo que dice la norma N.V. E – 737 entonces podemos afirmar que todas las muestras con diferentes adiciones podemos utilizarlas en mezclas asfálticas sin tener el riesgo de ser afectadas por el agua o por la falta de afinidad entre los agregados y el ligante.

El asfalto puro no tuvo un comportamiento satisfactorio en presencia de agua, ya que las esquinas se veían descubiertas y el grosor de la capa de ligante sobre el material pétreo no se veía muy grueso, que por el contrario con las muestras con adición de arcilla calcinada y cemento si se veía totalmente cubierto, lo que demuestra que nuestro material propuesto tiene facultades para ser utilizado como filler al igual que el cemento.

#### **6.5. Adherencia en bandeja.**

Este ensayo se basa en determinar el grado de adherencia de entre el ligante asfáltico y el agregado grueso en un porcentaje, los resultados de este laboratorio se determinan visualmente y los datos tomados fueron los que se ven en el cuadro número 8, donde todos los porcentajes poseen una adherencia mayor al 95%, el porcentaje de asfalto puro conserva una adherencia de 97% la cual con la adición del 5% aumenta una unidad, que posteriormente con la siguiente adición vuelve a disminuir y continua disminuyendo, se puede afirmar que la arcilla calcinada no



tiene mayor afectación en la adherencia puesto que todos los porcentajes están dentro de un rango no mayor a 3 unidades.

**Cuadro N.12. Resultados del ensayo de adherencia en bandeja con adiciones de arcilla calcinada.**

| <b>Adherencia de arcilla</b> |     |
|------------------------------|-----|
| 50%                          | 96% |
| 35%                          | 95% |
| 25%                          | 96% |
| 15%                          | 97% |
| 5%                           | 98% |
| 0%                           | 97% |

Fuente: Los autores.

Los resultados con el cemento son los que se muestran en el cuadro numero 9 los cuales se denotan en un rango entre el 96% y el 98%,este filler no afecta la adherencia puesto que a pesar que en algunos porcentajes como en el 15% se ve una disminución no es mayor a dos unidades y sigue presentando un buen comportamiento.

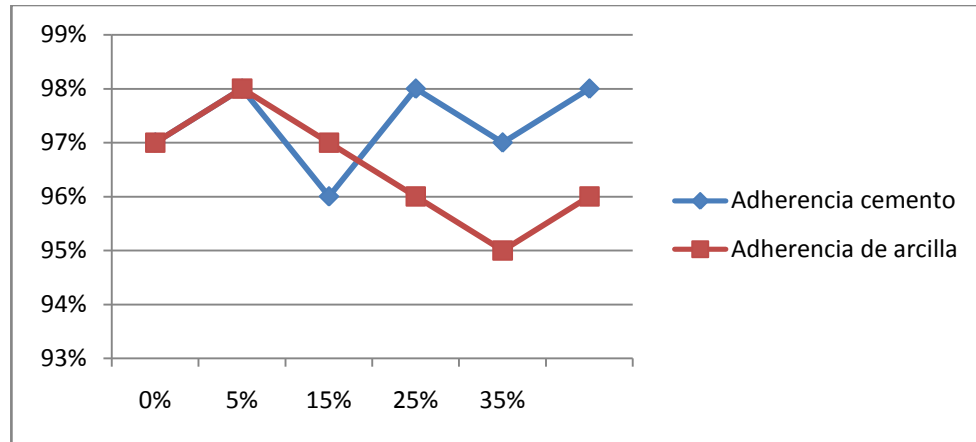
**Cuadro N.13. Resultados del ensayo de adherencia en bandeja con adiciones de cemento portland.**

| <b>Adherencia de cemento</b> |     |
|------------------------------|-----|
| 50%                          | 98% |
| 35%                          | 97% |
| 25%                          | 98% |
| 15%                          | 96% |
| 5%                           | 98% |
| 0%                           | 97% |

Fuente: Los autores.

Comparando los dos filler en la figura numero 26 se nota que el cemento posee una adherencia mayor a partir del 25%, aunque la variación no es mayor a dos puntos, y en el porcentaje del 5% tienen el mismo valor.

**Figura N. 26. Comparación de la adherencia con diferentes porcentajes de adición de arcilla calcinada y cemento**



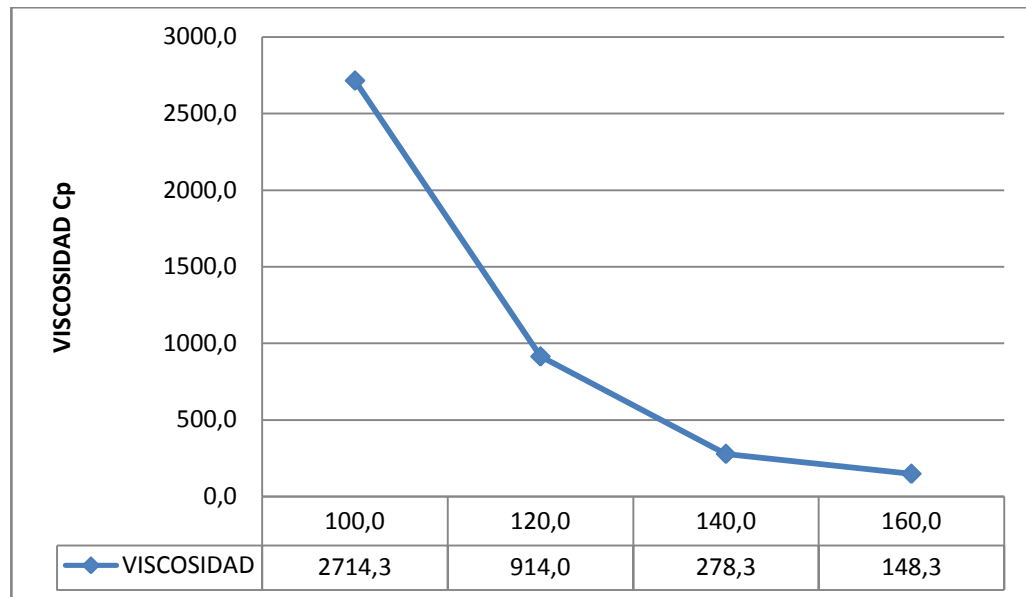
Fuente: los autores.

## 6.6 Viscosidad rotacional.

La viscosidad medida a altas temperaturas indica la manejabilidad que tiene el asfalto en la refinería, este ensayo permite hacer diagramas de temperatura vs viscosidad que ayudan a estimar la temperatura que se debe manejar para el procedimiento de mezclado y de manejo del ligante asfáltico.

El asfalto tiende a comportarse como un vidrio a bajas temperaturas y a elevadas temperaturas se comporta como un fluido como se observa en el diagrama de la muestra original de asfalto en la figura N. 27.

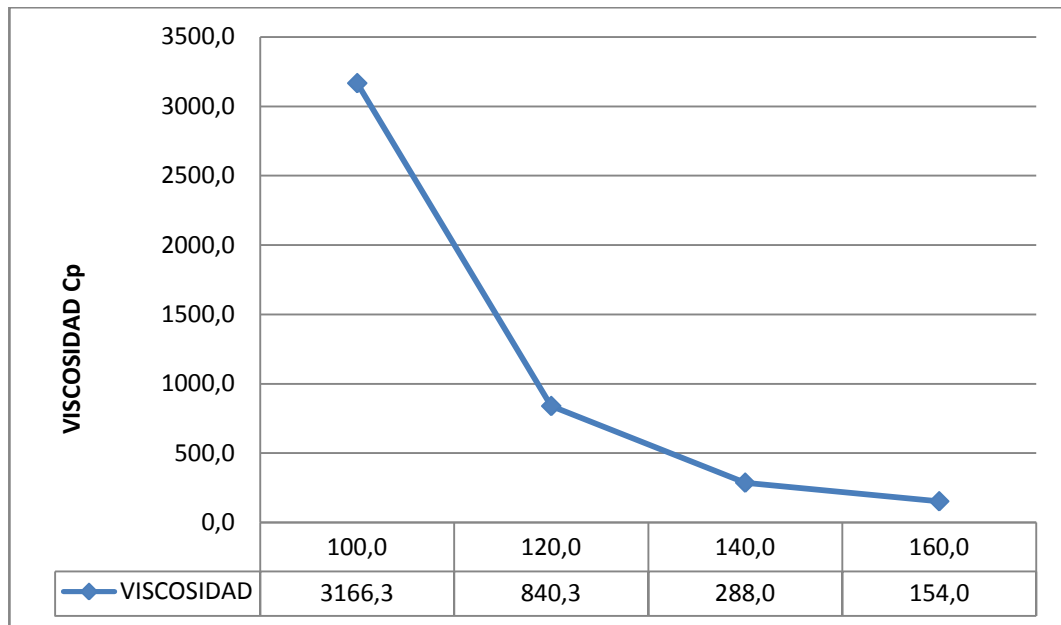
**Figura N. 27. Diagrama Temperatura vs Viscosidad muestra sin adiciones.**



Fuente: Los Autores.

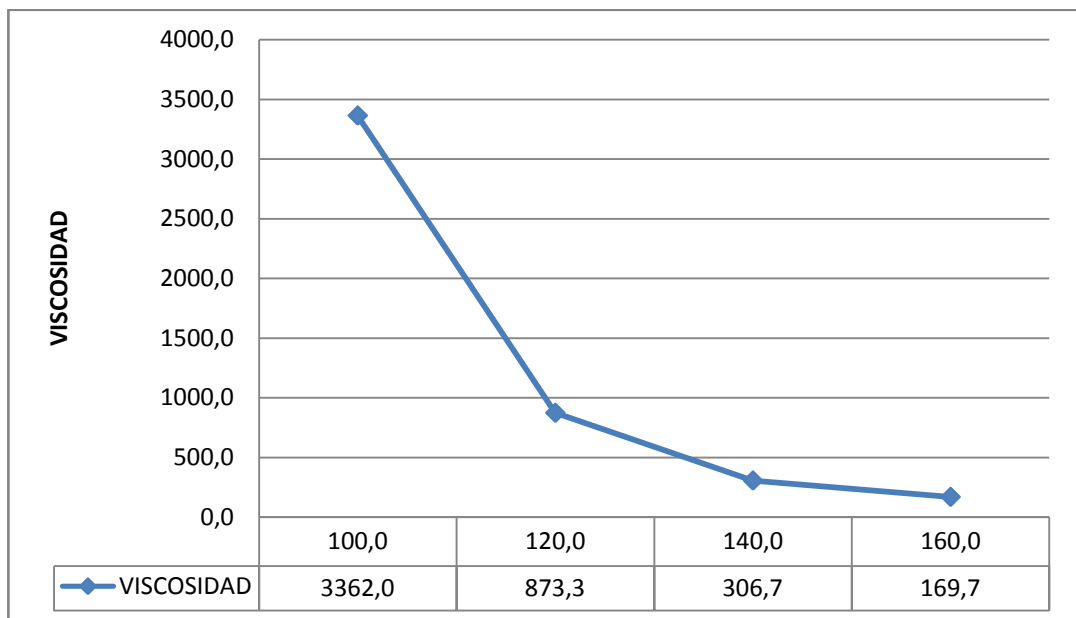
Las muestras con adición de arcilla calcinada tienen un comportamiento similar al de la muestra patrón lo único que varía es que entre mayor sea la adición mayor aumento tiene la viscosidad como se nota en las figuras 28 a la 32 que se muestran a continuación.

**Figura N. 28. Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de 5% de arcilla calcinada.**



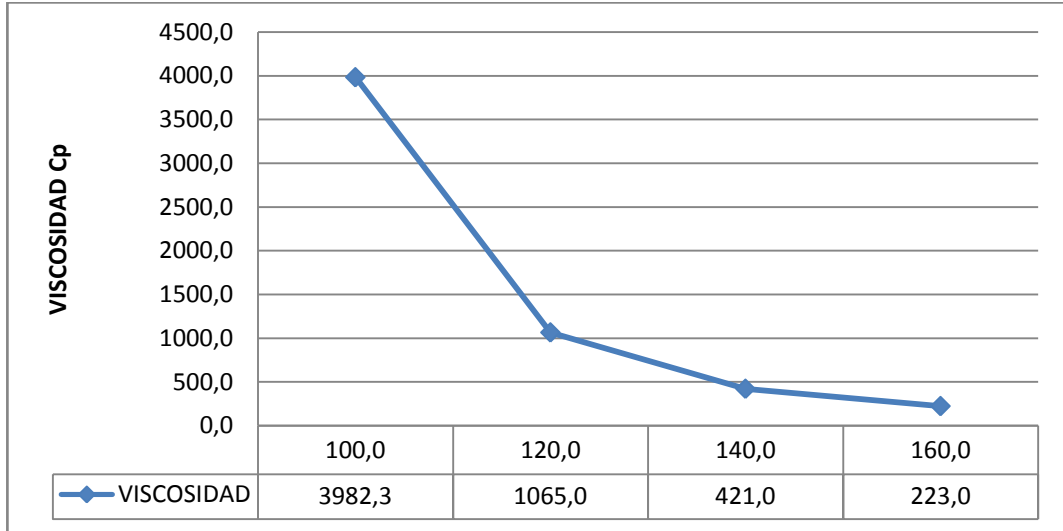
Fuente: Los Autores.

**Figura N. 29. Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de 15% de arcilla calcinada.**



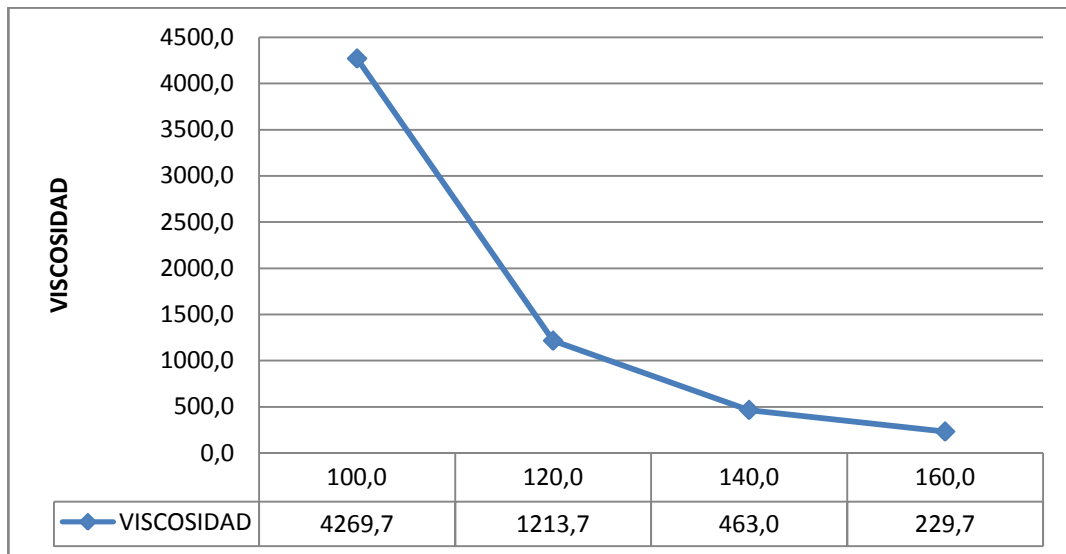
Fuente: Los Autores.

**Figura N. 30. Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de 25% de arcilla calcinada.**



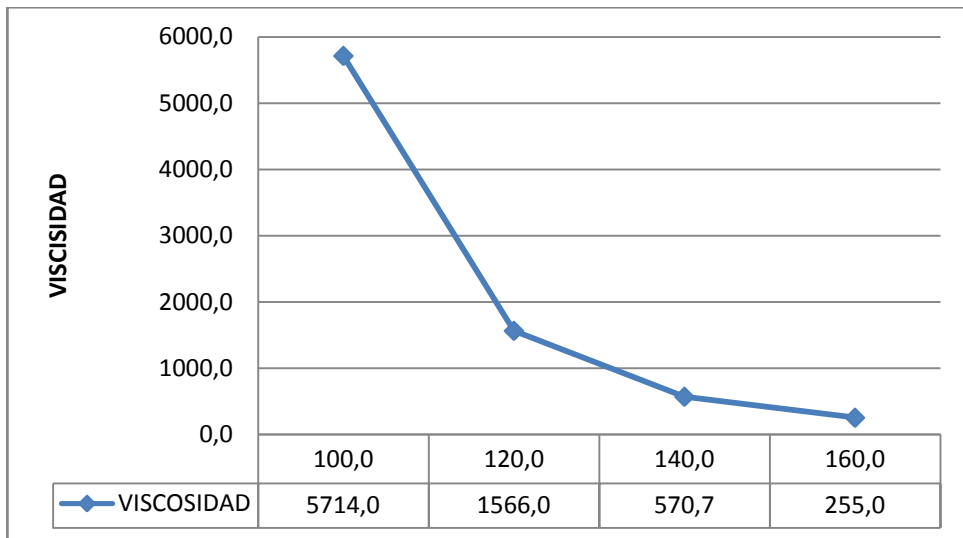
Fuente: Los Autores.

**Figura N. 31. Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de 35% de arcilla calcinada.**



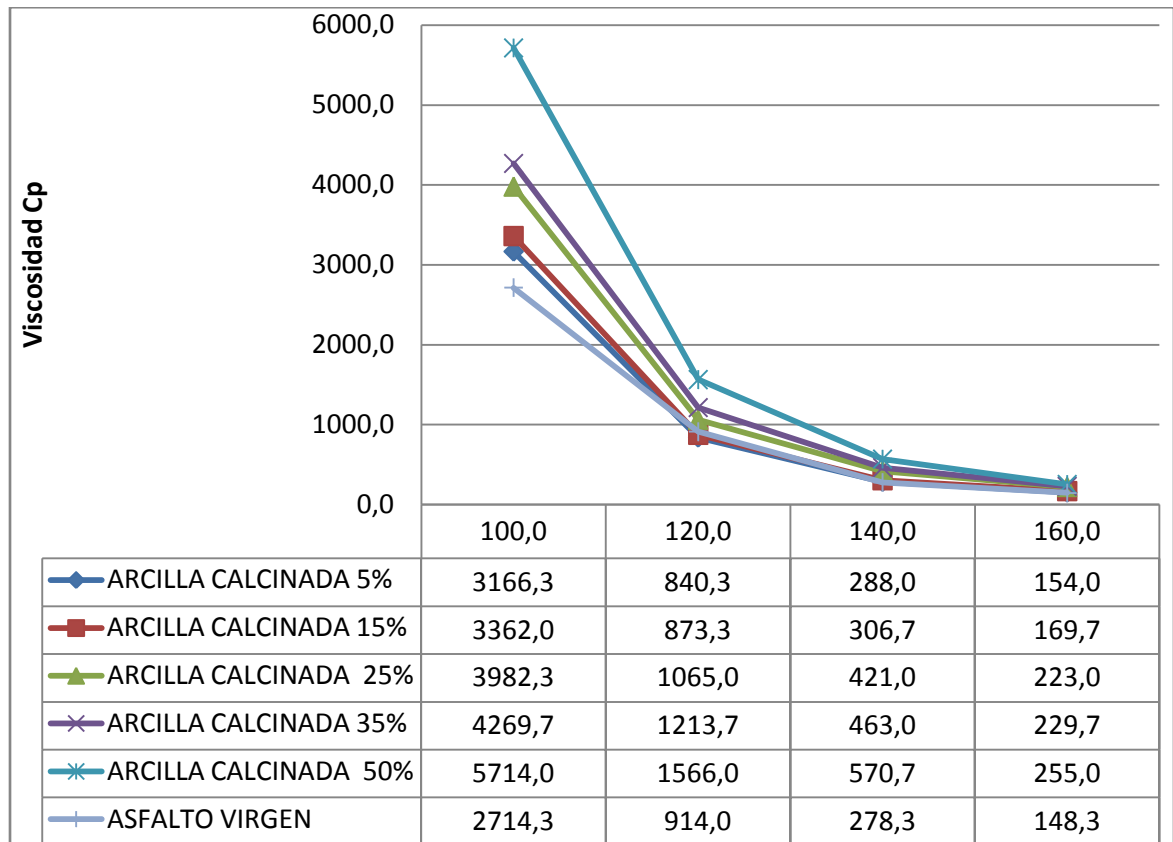
Fuente: Los Autores.

**Figura N. 32. Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de Arcilla Calcinada.**



Fuente: Los autores.

**Figura N. 33. Diagrama comparativo de los resultados con adiciones de arcilla calcinada, Temperatura Vs Viscosidad.**



Fuente: Los autores.

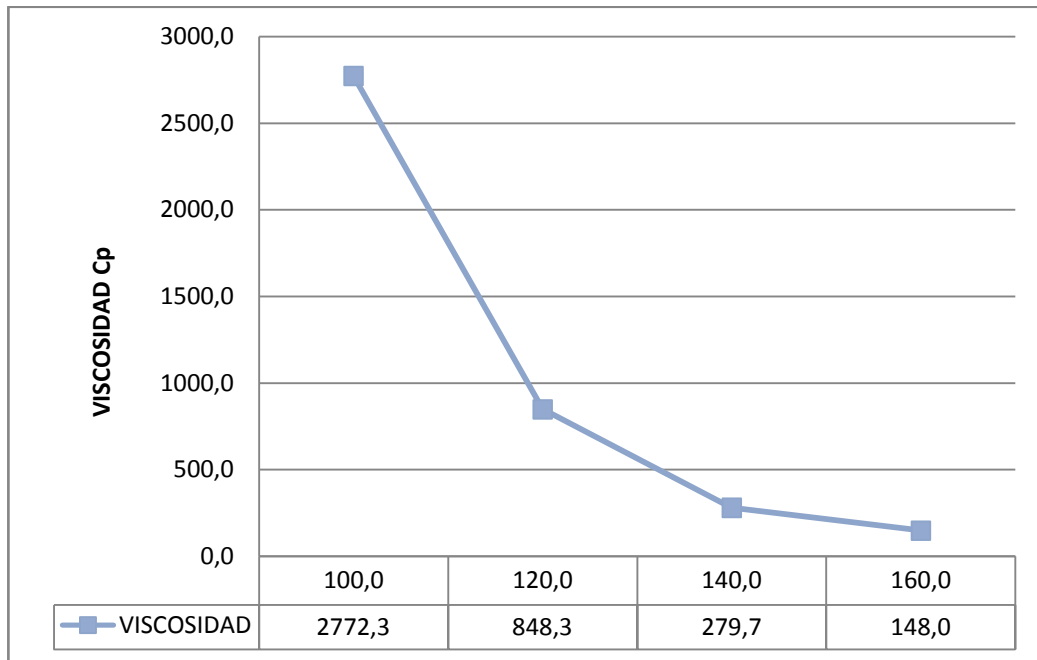
Los diagramas de Temperatura vs Viscosidad tienen un comportamiento muy similar lo único que varía es que la viscosidad aumenta con las diferentes adiciones en cada una de las temperaturas lo que se nota con mayor claridad en la figura 33.

La arcilla calcinada hace que el asfalto pierda su viscosidad y se haga más resistente a la temperatura lo que podría ayudar a que su uso en las vías se prolongue y necesite menos mantenimiento, pero en el momento que se encuentre en la refinería el bombeo se puede dificultar por su poca manejabilidad

y las temperaturas de mezclado deben ser mayores las normales puesto que el asfalto modificado necesita mayor temperatura.

Los resultados con el cemento tienen el mismo comportamiento que la arcilla y la muestra patrón entre mayor sea la temperatura menor es la viscosidad de la muestra. Los diagramas Temperatura Vs Viscosidad se muestran en las figuras 34 a la 38.

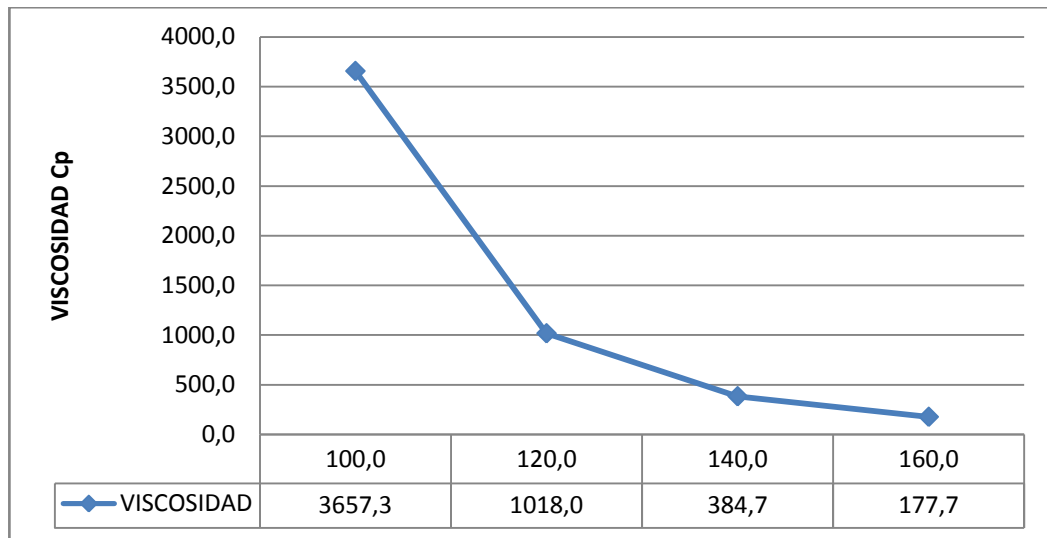
**Figura N. 34. Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de 5% de Cemento.**



Fuente: Los Autores.

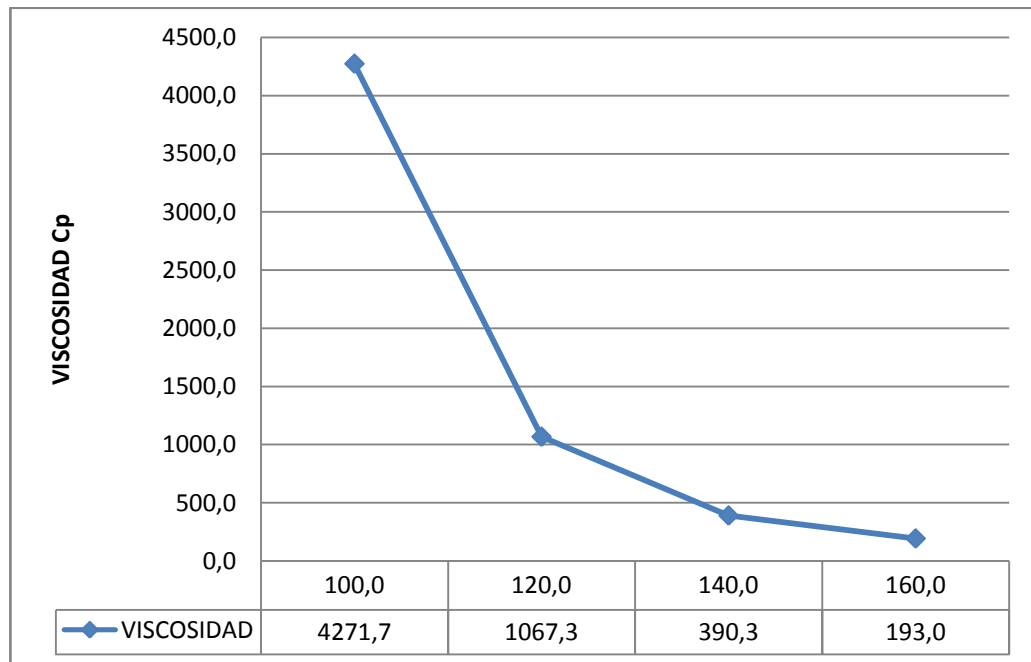


**Figura N. 35. Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de 15% de Cemento.**



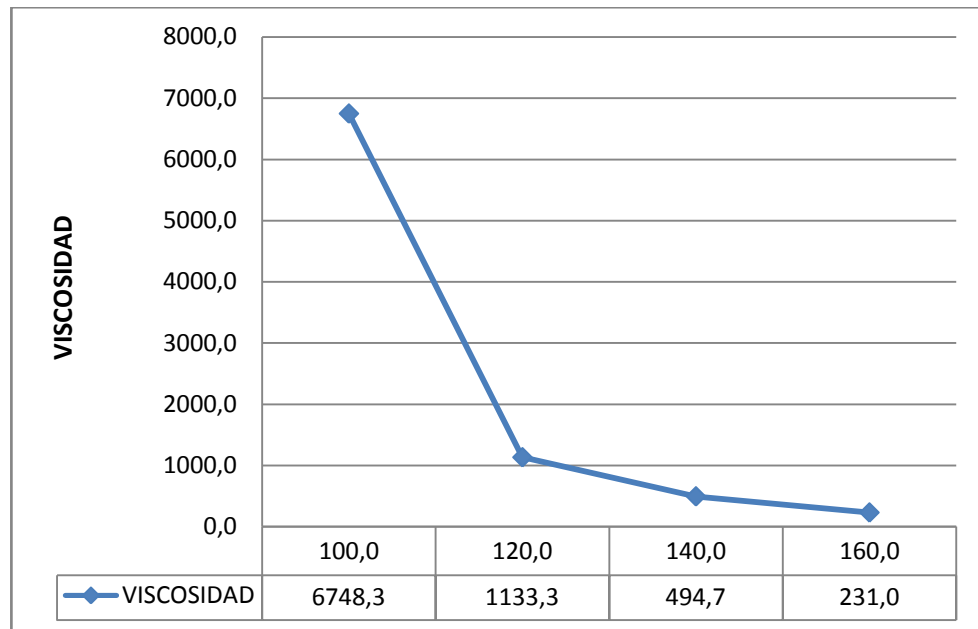
Fuente: los Autores.

**Figura N. 36. Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de 25% de Cemento.**



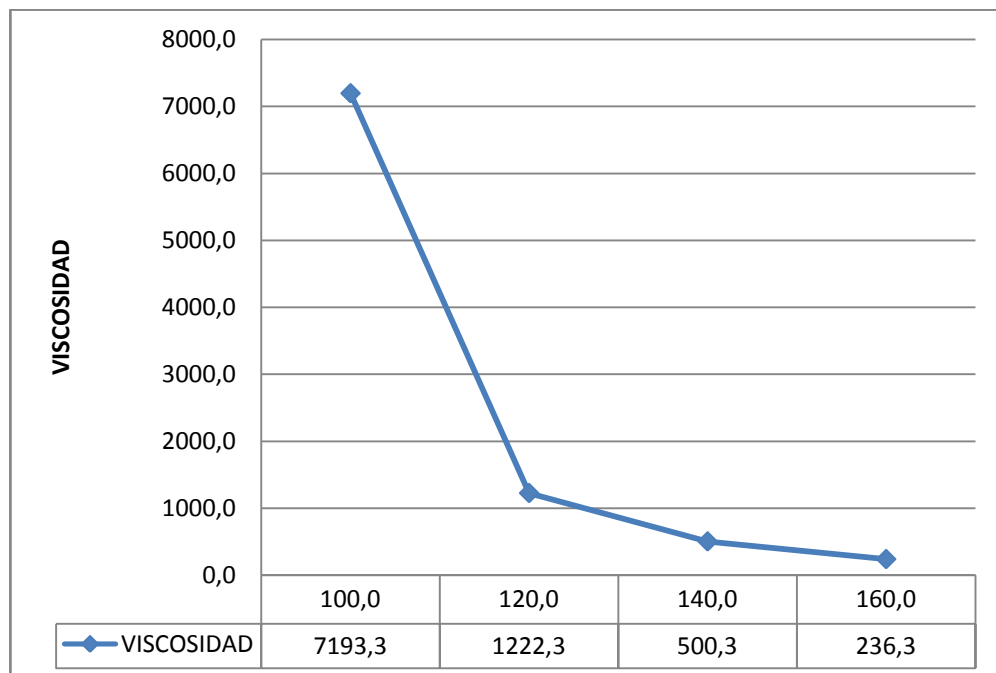
Fuente: Los Autores.

**Figura N. 37. Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de 35% de Cemento.**



Fuente: Los Autores.

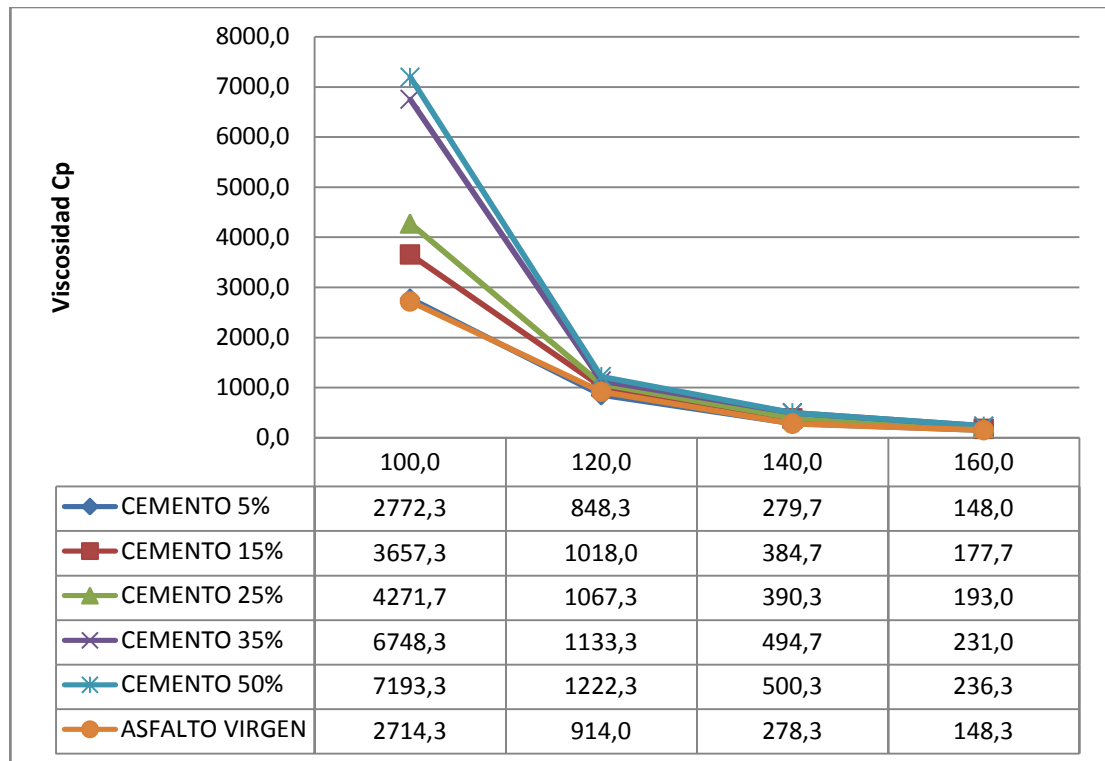
**Figura N. 38. Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de 50% de Cemento.**



Fuente: Los Autores.

Entre mayor es el porcentaje de adición mayor es la viscosidad en cada una de las temperaturas lo que se puede observar en la figura 39. Al igual que la Arcilla.

**Figura N. 39. Diagrama Temperatura Vs Viscosidad de la muestra con adición de Cemento.**

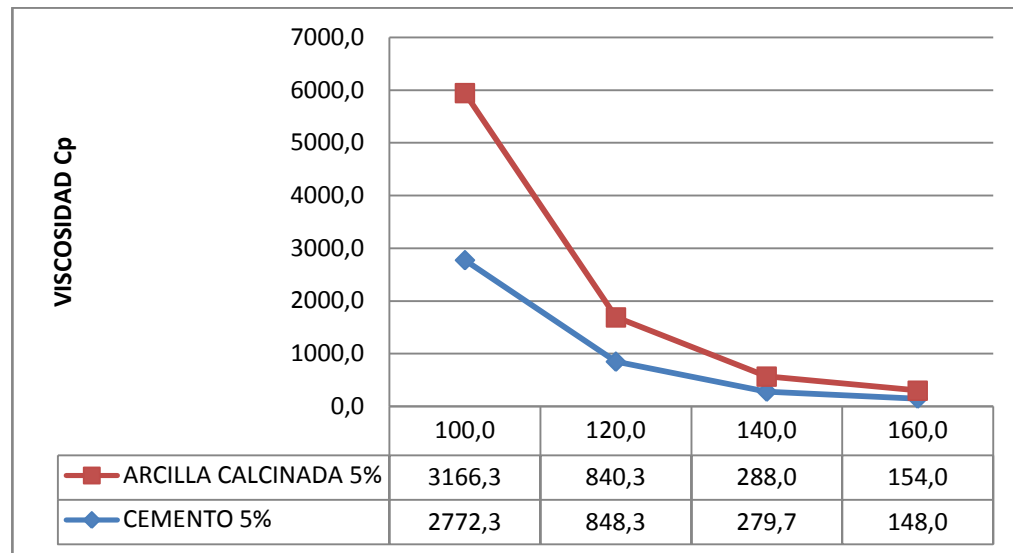


Fuente: Los Autores.

El cemento y la arcilla tienen comportamientos muy parecidos los dos se comportan como un coloide, y la mayor disminución de viscosidad se ve en la primeras disminuciones de temperatura, porque se nota que en 160 °C tiende a estabilizarse.

Comparando cada uno de los porcentajes con los dos filler, tienen comportamientos similares, y valores muy cercanos, por ejemplo en el 5% de adición la arcilla tiene una mayor viscosidad como se nota en la figura 40.

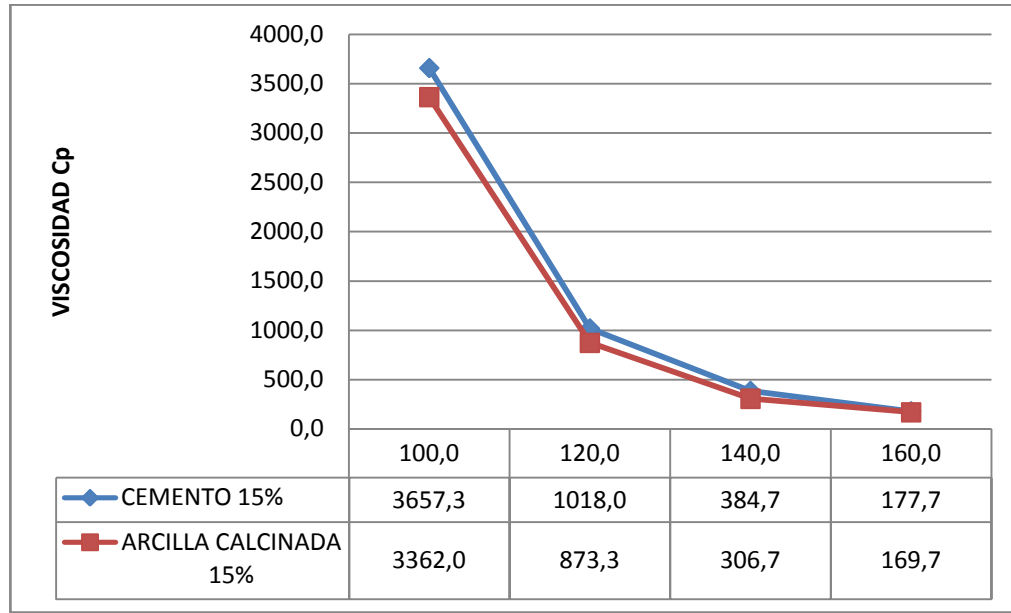
**Figura N. 40. Comparación entre el comportamiento de la arcilla calcinada y el cemento con adición del 5%, en los resultados de la viscosidad rotacional.**



Fuente: Los autores.

En el porcentaje del 15% el cemento tiene mayor viscosidad aunque el comportamiento es más parecido la diferencia es menor que el porcentaje a menor. Como se ve en la figura N. 41.

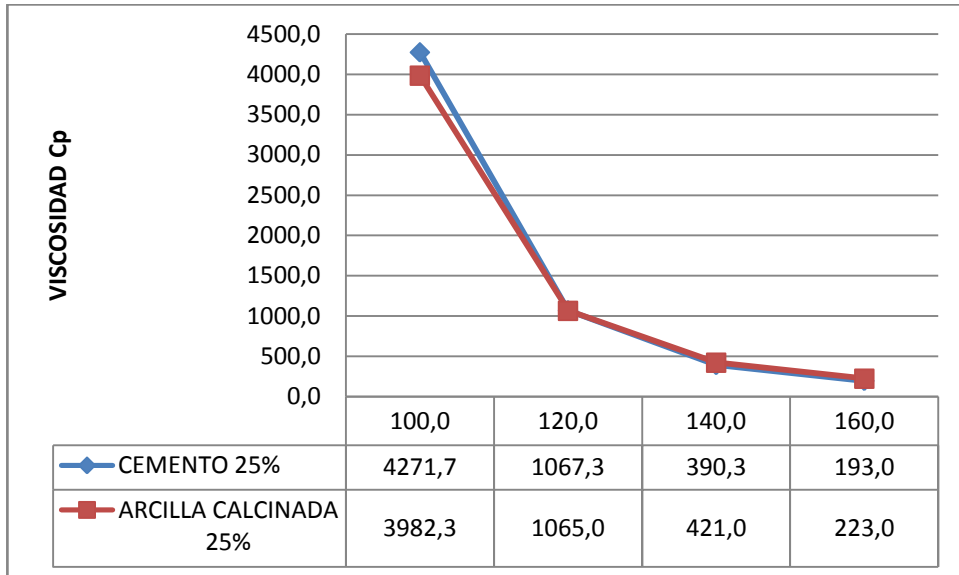
**Figura N. 41. Comparación entre el comportamiento de la arcilla calcinada y el cemento con adición del 15%, en los resultados de la viscosidad rotacional.**



Fuente: Los autores.

En el porcentaje del 25% el cemento tiene una mayor viscosidad casi en todas las temperaturas excepto en las dos más altas que son 140 y 160 °C, pero de igual manera las viscosidades son muy parecidas, como se ve en la figura 42.

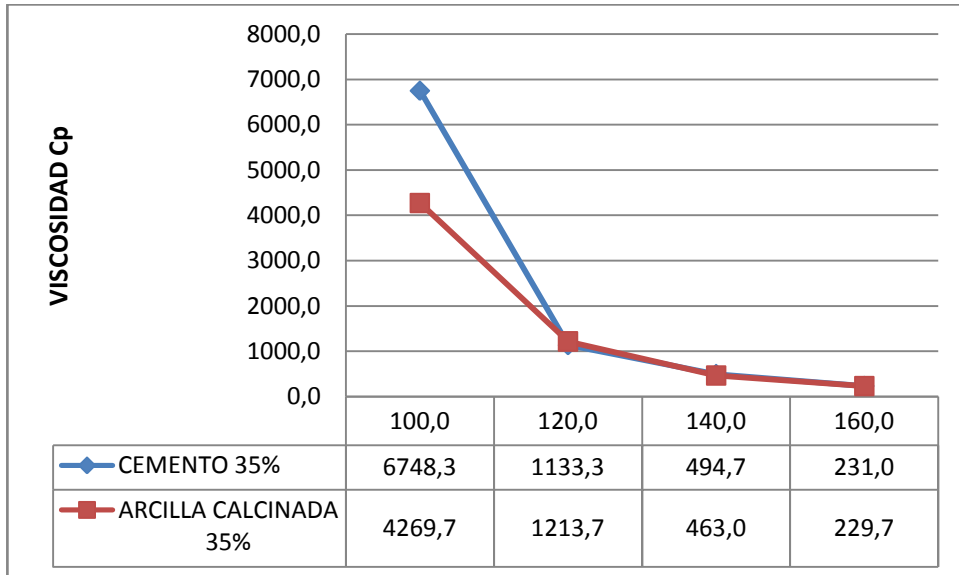
**Figura N. 42. Comparación entre el comportamiento de la arcilla calcinada y el cemento con adición del 25%, en los resultados de la viscosidad rotacional.**



Fuente: Los autores.

El comportamiento de los filler con adición del 35% son similares, aunque en la temperatura de los 100 °C tiene una diferencia mayor que en los otros, después de 120°C tienden a parecerse los dos filler, hasta tener una diferencia de 1,3 Cp. Que en realidad es algo muy mínimo y no muy influyente.

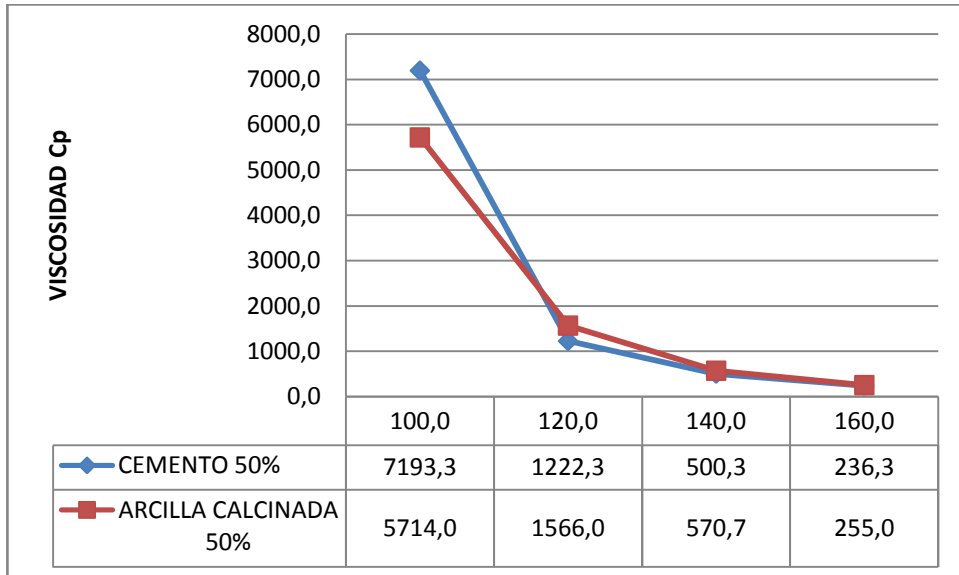
**Figura N. 43. Comparación entre el comportamiento de la arcilla calcinada y el cemento con adición del 35%, en los resultados de la viscosidad rotacional.**



Fuente: Los autores.

La comparación de la adición del 50% de los dos filler, empieza con una diferencia de 1477,3 siendo el cemento el que tiene mayor viscosidad en la menor temperatura y terminando con la arcilla con una viscosidad 18,7 por encima de la del cemento, como se ve en la figura 44.

**Figura N. 44. Comparación entre el comportamiento de la arcilla calcinada y el cemento con adición del 50%, en los resultados de la viscosidad rotacional.**



Fuente: Los autores

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la tesis “EFECTO DE LA ARCILLA CALCINADA COMO LLENATE MINERAL EN EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DEL ASFALTO”(3) se puede decir que los resultados son similares pero, los hallados aquí, muestran mejor comprensión ya que sometemos las muestras a altas temperaturas, que son las que actualmente se trabajan en las refinerías. La mejora superior con la adición de arcilla en el máximo porcentaje que en el caso de ellos es 5% y en el de nosotros es 50%.



**Cuadro N. 14 Resultados de la tesis “EFECTO DE LA ARCILLA CALCINADA COMO LLENATE MINERAL EN EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DEL ASFALTO”**

| <b>Viscosidad Cp</b>        |           |            |            |            |
|-----------------------------|-----------|------------|------------|------------|
| <b>Temperatura</b>          | <b>80</b> | <b>100</b> | <b>120</b> | <b>140</b> |
| <b>Cemento 1%</b>           | 20075     | 3483,3     | 983,3      | 400        |
| <b>Cemento 3%</b>           | 21817     | 3641,7     | 1075       | 483,3      |
| <b>Cemento 5%</b>           | 24742     | 4483,3     | 1208       | 533,3      |
| <b>Arcilla Calcinada 1%</b> | 19841,7   | 3208,3     | 933,3      | 333,3      |
| <b>Arcilla Calcinada 3%</b> | 21208,3   | 3525       | 1041,7     | 441,7      |
| <b>Arcilla Calcinada 5%</b> | 22360     | 3875       | 1100       | 491,7      |

**Fuente: Efecto De La Arcilla Calcinada Como Llenate Mineral En El Comportamiento Reológico Del Asfalto (3)**

En el cuadro14 se muestran los resultados obtenidos en la tesis anteriormente mencionada donde en todos los casos la viscosidad a la temperatura de 80°C es muy alta y es mayor a 19800 y va disminuyendo hasta llegar a ser casi 60 veces menos al estar a los 140° C, lo que es cerca de la mitad de la reducción que se nota en nuestro caso, ya que nosotros manejamos 20° mas, y el cambio de viscosidades es más notorio cuando las temperaturas son menores, es decir se ve mayor cambio de viscosidades cuando se pasa de una temperatura de 80°C a 140°C que cuando se pasa de 100°C a 160°C.

### **6.6.Análisis de precios**

Una parte muy importante en este trabajo es comparar los beneficios de cada filler con su costo en el cuadro 6se observa el precio de cada gramo de la arcilla y del cemento.

**Cuadro N. 15. Precios de los materiales utilizados en la investigación**

| Material          | Precio (\$/Kg) |
|-------------------|----------------|
| Cemento           | 440            |
| Arcilla Calcinada | 250            |
| Asfalto           | 930,1          |

Fuente: los autores.

La arcilla calcinada en este momento es tratada como un desecho, pero si se llegara a utilizar, las ladrilleras le darían un valor, tomamos el valor del kilo a 250, es decir el bulto de 50 kg tendría un costo de \$12.500, este precio incluiría el tratamiento que se debe hacer de trituración y tamización, el transporte y un precio supuesto; de 7.500, 2.000 y 3.000 respectivamente.

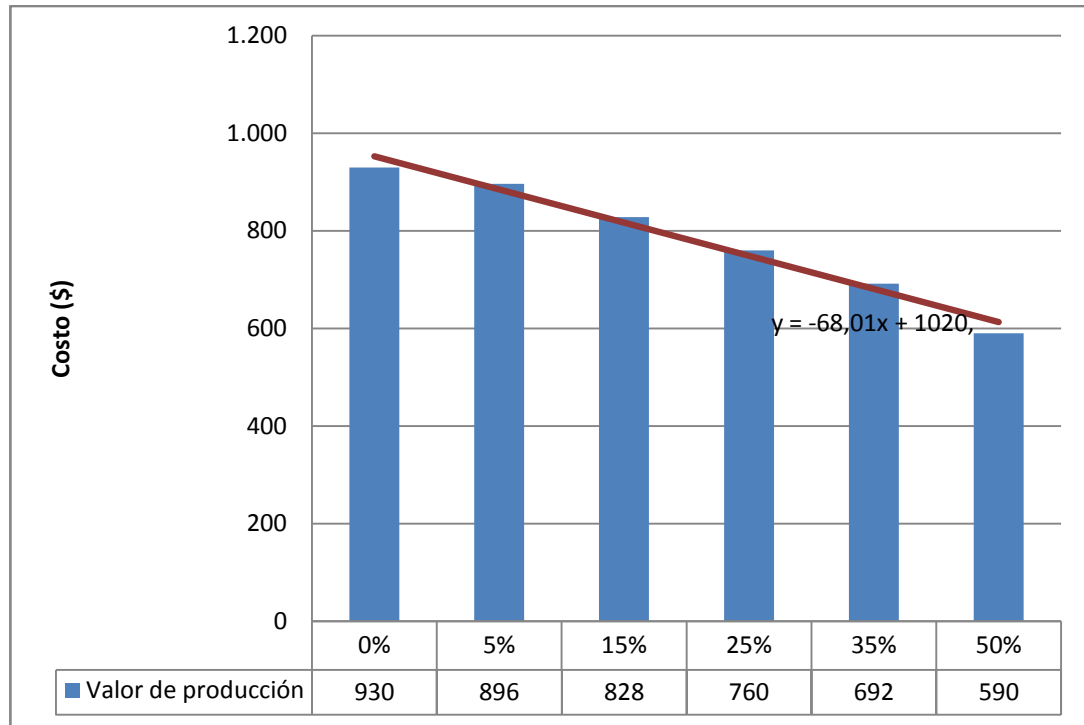
El precio de 1000 gr es decir de 1 kg de asfalto es de \$ 930,1 lo que se puede reducir adicionando un llenante mineral como la arcilla calcinada, los costos de producción con arcilla calcinada se ven en el cuadro 16ve a continuación.

**Cuadro N. 16. Costo de producción de una muestra de 1000gr.**

| <b>Diagrama De Costo De Producción Para Una Muestra De 1000 gr. Con arcilla Calcinada.</b> |                          |                          |                    |                    |                    |                                 |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|
| Porcentaje   | Cantidad de Asfalto (gr) | Cantidad de Arcilla (gr) | Total muestra (gr) | Valor asfalto (\$) | Valor Arcilla (\$) | Valor Total de producción (\$). |
| 0%   | 1000                     | 0                        | 1000               | 930                | 0                  | 930                             |
| 5%   | 950                      | 50                       | 1000               | 884                | 13                 | 896                             |
| 15%  | 850                      | 150                      | 1000               | 791                | 38                 | 828                             |
| 25%  | 750                      | 250                      | 1000               | 698                | 63                 | 760                             |
| 35%  | 650                      | 350                      | 1000               | 605                | 88                 | 692                             |
| 50%  | 500                      | 500                      | 1000               | 465                | 125                | 590                             |

Fuente: los autores.

**Figura 45. Diagrama de costos de producción**



Fuente: Los autores.

Con la adición de arcilla calcinada no solo obtenemos mejoras en el comportamiento del asfalto si no que reducimos los gastos de producción significativamente en un total de \$340 con una adición del 50% en una muestra de 1000 gr. Lo que nos representaría una reducción del costo del 37% es decir el valor de una tonelada de asfalto es de \$ 930.1y con una adición del 50% pasaría a ser de \$590.

El precio del asfalto se referencio del que tiene Ecopetrol en su lista de precios de noviembre del año 2011. Que se ve en el ANEXO C.

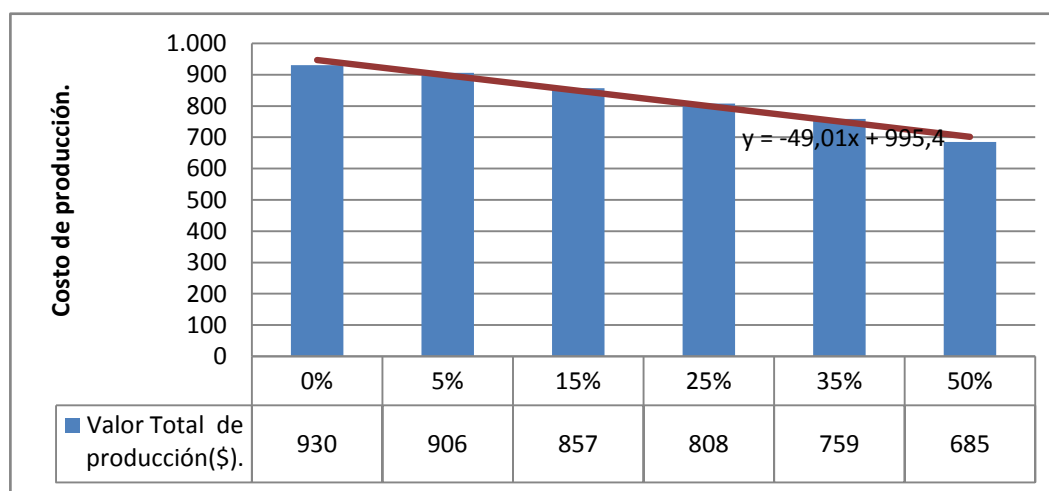
Con cemento de igual manera obtenemos una reducción en el costo de producción:

**Cuadro17. Costo de producción de una muestra de 1000 gr.**

| <b>Costo De Producción Para Una Muestra De 1000 gr. Con Cemento Portland.</b> |                          |                          |                    |                    |                    |                                 |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|
| Porcentaje  | Cantidad de Asfalto (gr) | Cantidad de Cemento (gr) | Total muestra (gr) | Valor asfalto (\$) | Valor Cemento (\$) | Valor Total de producción (\$). |
| 0%  | 1000                     | 0                        | 1000               | 930                | 0                  | 930                             |
| 5%  | 950                      | 50                       | 1000               | 884                | 22                 | 906                             |
| 15%   | 850                      | 150                      | 1000               | 791                | 66                 | 857                             |
| 25%   | 750                      | 250                      | 1000               | 698                | 110                | 808                             |
| 35%   | 650                      | 350                      | 1000               | 605                | 154                | 759                             |
| 50%   | 500                      | 500                      | 1000               | 465                | 220                | 685                             |

Fuente: los autores.

**Figura 46. Cambio del costo de producción con diferentes porcentajes de adición de cemento Portland.**

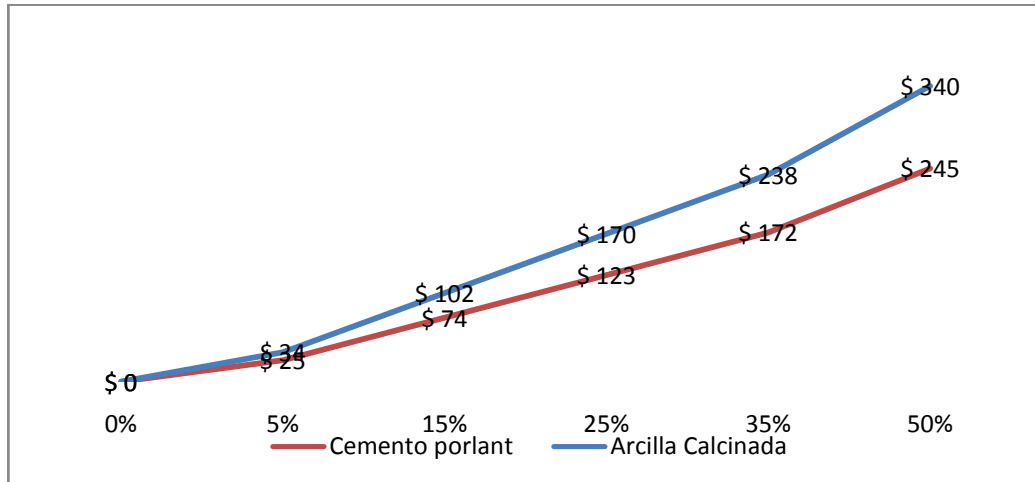


Fuente: Los autores.

Con el cemento obtenemos una reducción de costos de \$245 con el 50%, por lo tanto la reducción del costo del cemento con el asfalto sería de 26%, lo que en una tonelada de asfalto significaría un cambio de \$ 930.1 a \$ 685. La línea de

tendencia tiene una menor pendiente que la arcilla calcinada obteniendo una menor reducción del costo de producción con el cemento. Como se ve en la figura 47.

**Figura 47. Comparación de la reducción del costo de producción.**



Fuente: Los autores.

## 7 CONCLUSIONES.

1. Al evaluar el comportamiento de los ligantes asfálticos con cada uno de los porcentajes usados 5%- 15%- 25%- 35%- 50% de arcilla calcinada se encontró que la tendencia de su comportamiento es similar a la del cemento y mostrando los siguientes efectos en cada laboratorio:
  - a) La viscosidad es una propiedad que determina la capacidad de moverse, que tiene una sustancia. En los materiales bituminosos la viscosidad es inversamente proporcional a la temperatura; lo que se ve en todas las muestras estudiadas en este trabajo, donde las variaciones más significativas en los resultados con cada una de las proporciones de los filler utilizados, se ven en la temperatura más baja que es 100°C, mientras que a mayores temperaturas cercanas a los 160°C todas las proporciones de filler utilizados muestran una viscosidad semejante.

Haciendo un análisis comparativo de los dos filler (cemento y arcilla) se puede decir que su efecto es muy similar y que a mayor proporción de adición de cada uno de estos productos, es mayor la viscosidad.
  - b) La adhesión de los materiales pétreos con el ligante asfáltico es muy importante frente al agua y puede determinar el comportamiento que del asfalto en la vía. En el ensayo de stripping, se notó una mejora en la compatibilidad de los materiales, puesto que el cubrimiento del agregado pétreo es mayor.
  - c) La penetración estándar ayuda a determinar la consistencia del asfalto, las penetraciones altas demuestran consistencias blandas; en los porcentajes de adición del 5% y 15% la arcilla calcinada le da una menor consistencia al asfalto que el cemento; en los porcentajes de 25% y 35% el cemento es superior a la arcilla casi en una décima de milímetro, y en el mayor porcentaje de adición 50% la mejora que proporciona el cemento es mucho mayor que con la arcilla calcinada.

- d) El punto de ablandamiento de materiales bituminosos determina la temperatura en la cual el asfalto deja de comportarse como un sólido y pasa a estado líquido; los resultados obtenidos con los dos filler son muy similares, los dos tienen una tendencia lineal en la que la temperatura de ablandamiento se eleva en la medida que se aumenta el porcentaje de adición.
  
- e) El ensayo de adherencia en bandeja determina el grado de compatibilidad que posee un material asfáltico con el agregado grueso. Se observó que todas las muestras con las diferentes adiciones tuvieron un buen comportamiento, ya que en todas el asfalto se adhirió a la perfección notando que la mejor compatibilidad está en el porcentaje del 5%, ya que con los dos filler después de este porcentaje disminuye, las variaciones de los resultados no son mayores de 3 unidades notando que el filler puede aportar un cambio no muy significativo en los resultados de este ensayo.

Se recomienda estudiar químicamente el comportamiento del Mastic de arcilla calcinada y asfalto para garantizar que no existe miscibilidad entre los dos materiales y así, asegurar que nuestro filler propuesto no modifica las características químicas del ligante bituminoso.

- 2. La arcilla calcinada es un desecho proveniente de las ladrilleras y es aproximadamente entre el 10% y 20% del producto bruto de la materia prima. Los beneficios ambientales que se pueden obtener al utilizarla como llenante mineral para la producción de asfalto, son varios:
  - a) Disminución de la contaminación ambiental al ser utilizada como filler.
  - b) Proporciona ayudas económicas a personas que recogen estos sobrantes.

- c) Evita la contaminación en cauces naturales y colmatación de alcantarillados, por en indebido manejo de estos desechos sólidos.
3. El estudio de la incorporación de arcilla calcinada y cemento al ligante asfáltico permite establecer que la adición de estos filler mejoran las propiedades físicas del asfalto B-60/70, en todas las proporciones utilizadas..Demostrando que la arcilla calcinada tiene suficientes características para ser un filler competitivo. Sin embargo, se recomienda en futuras investigaciones relacionadas con este trabajo de grado realizar ensayos en mezclas asfálticas.
  4. El comportamiento de la arcilla calcinada y el cemento es muy similar en la mayoría de los laboratorios; la arcilla calcinada mostró resultados levemente mayores que los del cemento en casi todos los ensayoshaciendo que la arcilla calcinada sea una muy buena opción para remplazar los filler convencionales, cumpliendo con la normativa vigente por el INVIAS.



## **8 RECOMENDACIONES.**

- Verificar que la ladrillera, cumpla con los requisitos de normatividad para fabricar el ladrillo, para constatar que los desechos obtenidos son aptos para utilizarlos en los ligantes asfálticos.
- Utilizar la mezcla asfáltica con adición del 50% de arcilla calcinada en climas cálidos un proceso constructivo, para evaluar el comportamiento de sus características.
- Realizar un estudio físico químico, para constatar las propiedades y los componentes de la arcilla.
- Estudiar diferentes arcillas a nivel nacional para estudiar las variaciones de los componentes y del comportamiento, y así poder afirmar cuáles son las que se deben utilizar para la adición en asfalto.
- Tamizar la arcilla calcinada en tamiz N°200, para mayor facilidad de mezclado con el asfalto hasta que toda la muestra quede homogénea.

## 9 BIBLIOGRAFIA

1. PEDROZA, Jorge. Efecto de la cal hidratada en el cambio reológico del asfalto y del desempeño de la mezcla. Tesis de grado, Universidad de los Andes. Bogotá, 2009.
2. SOLEIDAD, Siñani. BADI, Mancilla. Problemática ambiental producida por las ladrilleras. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. 2002
3. ROMERO, Jhon Jaime; SANCHEZ, María Camila, Efecto de la arcilla calcinada como llenante mineral en el comportamiento reológico del asfalto. Trabajo de grado (Ing. Civil). Universidad piloto De Colombia. Páginas 61-68. Bogotá, 2011
4. ARENAS LOZANO Hugo, Tecnología del cemento Asfáltico, Editorial Faid editores ISBN: 9589666604 v. 800 pags. 304. Colombia 2005.
5. REYES LIZCANO Fredy Alberto, Diseño racional de pavimentos. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Pag 573. Bogotá 2003.
6. SUBIAGA, Alicia. Partes Fundamentales y Reología de Asfaltos para Uso Vial. <http://www.frlp.utn.edu.ar/lemac/Publicaciones/Del%202005/007%20-%20cila%20reologia.pdf>
7. Reología conceptos básicos,  
<http://www.webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/mabel/materias/sistemdisperso s/reologia.pdf>

8. INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, NORMA I.N.V. E – 717 – 07, Método Para Determinar La Viscosidad Del Asfalto Empleando El Viscosímetro Rotacional.
9. INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, NORMA I.N.V. E – 706 – 07, Penetración De Los Materiales Asfálticos.
10. INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, NORMA I.N.V. E – 712 – 07, Punto De Ablandamiento De Materiales Bituminosos (Aparato De Anillo Y Bola).
11. E-ASPHALT, Asphalt machines and equipment. <http://www.e-asphalt.com/propiedades/propiedades.htm>. Noviembre 2011.
12. DALLAS N. LITTLE, Jon A. Epps, The Benefits Of Hydrated Lime In Hot Mix Asphalt. National Lime Association. UnitedStates. 2001
13. PROFESSOR S F BROWN<sup>1</sup> AND DR D NEEDHAM, A Study of Cement Modified Bitumen Emulsion Mixtures. Association of Asphalt Paving Technologists. University of Nottingham .ReinoUnido. 2000.
14. MONOGRAFIAS, Producción y comercialización del ladrillo, <http://www.monografias.com/trabajos14/ladrillocolomb/ladrillocolomb.shtml#> ARCI. Noviembre 2011.

**ANEXO A.**

**GRANULOMETRÍA DE LA  
ARCILLA CALCINADA.**

**Norma I.N.V.E – 124 – 07, *Análisis granulométrico por medio del hidrómetro.***

Este ensayo mide la granulometría que posee la arcilla calcinada por medio de la lectura con hidrómetro.

El equipo utilizado en este ensayo es:

- Balanza.
- Tamices.
- Aparato Agitador.
- Hidrómetro.
- Cilindro de vidrio de sedimentación.
- Termómetro.
- Cronometro.
- Baño de agua.
- Arcilla Calcinada.

El procedimiento para realizar este laboratorio es:

- Se anotan en una hoja datos como peso seco de la muestra y otros datos convenientes.
- Se determina la corrección por defloculante y de menisco.
- Se deja la muestra en remojo por una noche en agua destilada.
- Se pasa la muestra a un vaso de dispersión, lavando los residuos con agua destilada, se coloca en el aparato de dispersión por un minuto.
- Se transfiérela mezcla a un cilindro de sedimentación de 1000ml y se lleva a temperatura ambiente.
- Se tapa el cilindro y se agita bien hasta lograr una mezcla uniforme.
- Se enciende el cronometro y se toman lecturas a los 2, 5, 15, 30, 60, 120, 250 y 1440.

Peso específico de sólidos Gs: 2,681

Peso de la muestra Wm: 68,15g

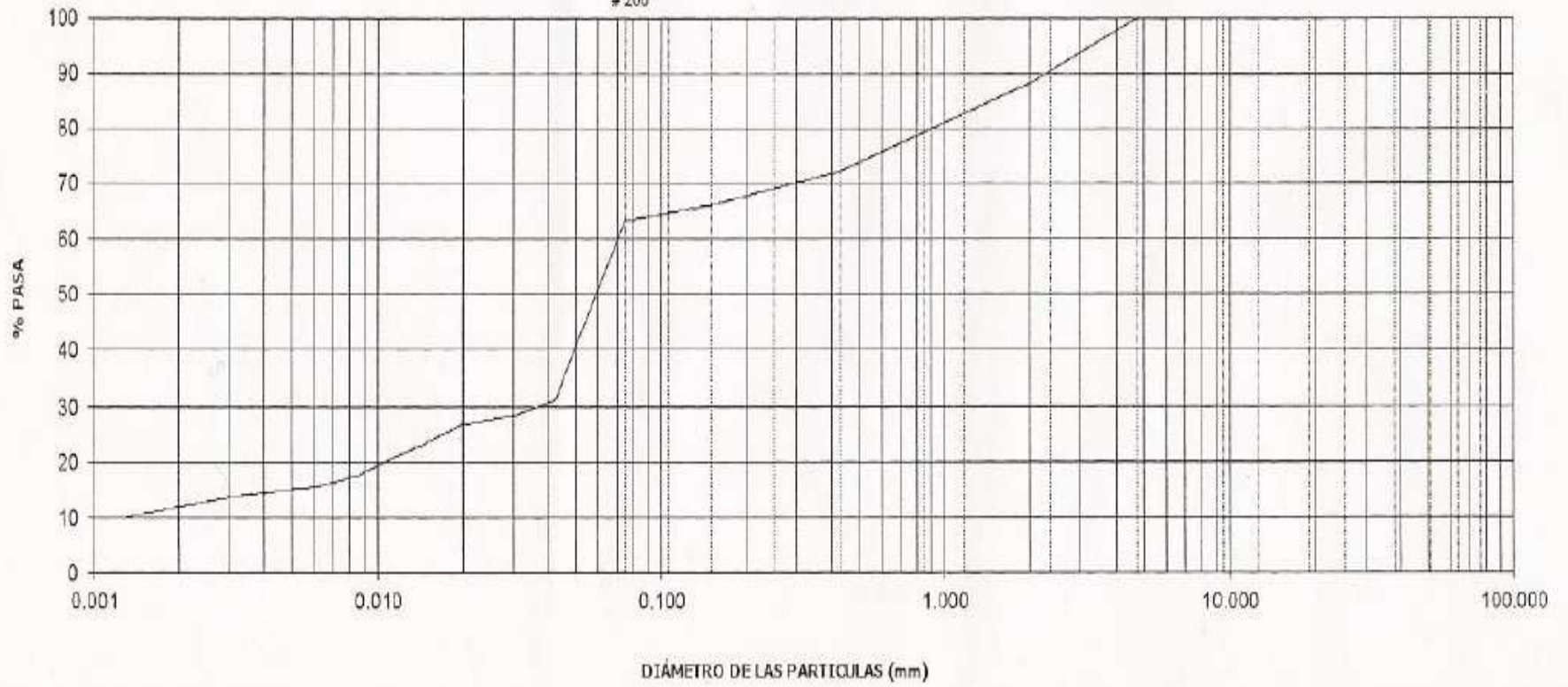
Factor de corrección por Gs: 0,992

Corrección por menisco: 1g/l

Corrección por defloculante y punto cero: 6,7

| Periodo de sedimentación | Temperatura °C | Lectura del hidrómetro |                | K       | L(cm) | Diámetro partículas | D%    | % Pasa (P1) |
|--------------------------|----------------|------------------------|----------------|---------|-------|---------------------|-------|-------------|
|                          |                | R´(g/l)                | R= R´+Cm (g/l) |         |       |                     |       |             |
| 1                        | 19,2           | 40                     | 41             | 0,01366 | 9,6   | 0,04231             | 49,66 | 31,29       |
| 2                        | 19,2           | 37                     | 38             | 0,01366 | 10,1  | 0,03069             | 45,29 | 28,53       |
| 5                        | 19,2           | 35                     | 36             | 0,01366 | 10,4  | 0,01969             | 42,38 | 26,7        |
| 15                       | 19,2           | 31                     | 32             | 0,01366 | 11,1  | 0,01439             | 36,56 | 23,03       |
| 30                       | 19,1           | 29                     | 30             | 0,01367 | 11,4  | 0,01192             | 33,61 | 21,17       |
| 60                       | 19             | 25                     | 26             | 0,01369 | 12    | 0,00866             | 27,74 | 17,48       |
| 120                      | 18,9           | 23                     | 24             | 0,01371 | 12,4  | 0,00623             | 24,79 | 15,62       |
| 250                      | 18,7           | 21                     | 22             | 0,01374 | 12,7  | 0,0031              | 21,8  | 13,73       |
| 1440                     | 19             | 17                     | 18             | 0,01369 | 13,3  | 0,00132             | 16,09 | 10,14       |

ANÁLISIS MECÁNICO POR MEDIO DEL HIDRÓMETRO  
# 200



**ANEXO B.**  
**RESULTADOS**  
**GENERALES DE LAS**  
**PROPIEDADES**  
**REOLOGICAS.**



Resultados de ensayos de penetración estándar con las diferentes adiciones de arcilla calcinada.

| <b>ASFALTO CON ARCILLA AL 50%</b> |                         |       |       |
|-----------------------------------|-------------------------|-------|-------|
|                                   | <b>Penetración (mm)</b> |       |       |
| Muestra No. 1                     | 42,50                   | 43,80 | 41,70 |
| Muestra No. 2                     | 41,90                   | 41,10 | 42,20 |
| Muestra No. 3                     | 39,80                   | 43,10 | 40,90 |
| Promedio                          | 41,89                   |       |       |

| <b>ASFALTO CON ARCILLA AL 35%</b> |                         |       |       |
|-----------------------------------|-------------------------|-------|-------|
|                                   | <b>Penetración (mm)</b> |       |       |
| Muestra No. 1                     | 46,70                   | 48,10 | 41,50 |
| Muestra No. 2                     | 46,40                   | 37,10 | 48,80 |
| Muestra No. 3                     | 48,00                   | 47,20 | 42,70 |
| Promedio                          | 45,17                   |       |       |

| <b>ASFALTO CON ARCILLA AL 25%</b> |                         |       |       |
|-----------------------------------|-------------------------|-------|-------|
|                                   | <b>Penetración (mm)</b> |       |       |
| Muestra No. 1                     | 57,90                   | 59,40 | 5,33  |
| Muestra No. 2                     | 58,40                   | 61,20 | 5,92  |
| Muestra No. 3                     | 58,00                   | 60,40 | 60,10 |
| Promedio                          | 47,41                   |       |       |

| <b>ASFALTO CON ARCILLA AL 15%</b> |                         |       |       |
|-----------------------------------|-------------------------|-------|-------|
|                                   | <b>Penetración (mm)</b> |       |       |
| Muestra No. 1                     | 59,10                   | 58,30 | 60,20 |
| Muestra No. 2                     | 61,40                   | 60,20 | 63,30 |
| Muestra No. 3                     | 59,80                   | 59,30 | 61,70 |
| Promedio                          | 60,37                   |       |       |

| <b>ASFALTO CON ARCILLA AL 5%</b> |                         |       |       |
|----------------------------------|-------------------------|-------|-------|
|                                  | <b>Penetración (mm)</b> |       |       |
| Muestra No. 1                    | 60,70                   | 66,60 | 62,40 |
| Muestra No. 2                    | 63,10                   | 64,40 | 63,80 |
| Muestra No. 3                    | 67,50                   | 66,30 | 67,90 |
| Promedio                         | 64,74                   |       |       |

Resultados de ensayos de penetración estándar con las diferentes adiciones de cemento portland.nusteslozano@gmail.com

| <b>ASFALTO CON CEMENTO AL 50%</b> |                         |       |       |
|-----------------------------------|-------------------------|-------|-------|
|                                   | <b>Penetración (mm)</b> |       |       |
| Muestra No. 1                     | 35,90                   | 36,80 | 36,30 |
| Muestra No. 2                     | 34,80                   | 35,50 | 35,90 |
| Muestra No. 3                     | 37,10                   | 34,40 | 35,70 |
| Promedio                          | 35,82                   |       |       |

| <b>ASFALTO CON CEMENTO AL 35%</b> |                         |       |       |
|-----------------------------------|-------------------------|-------|-------|
|                                   | <b>Penetración (mm)</b> |       |       |
| Muestra No. 1                     | 44,60                   | 44,00 | 44,20 |
| Muestra No. 2                     | 44,10                   | 43,90 | 43,80 |
| Muestra No. 3                     | 43,30                   | 45,00 | 44,70 |
| Promedio                          | 44,18                   |       |       |

| <b>ASFALTO CON CEMENTO AL 25%</b> |                         |       |       |
|-----------------------------------|-------------------------|-------|-------|
|                                   | <b>Penetración (mm)</b> |       |       |
| Muestra No. 1                     | 50,80                   | 49,20 | 49,80 |
| Muestra No. 2                     | 51,20                   | 51,20 | 49,60 |
| Muestra No. 3                     | 50,30                   | 50,40 | 50,50 |
| Promedio                          | 50,33                   |       |       |

| <b>ASFALTO CON CEMENTO AL 15%</b> |                         |       |       |
|-----------------------------------|-------------------------|-------|-------|
|                                   | <b>Penetración (mm)</b> |       |       |
| Muestra No. 1                     | 51,70                   | 50,80 | 50,60 |
| Muestra No. 2                     | 51,50                   | 51,10 | 50,20 |
| Muestra No. 3                     | 50,80                   | 51,40 | 51,30 |
| Promedio                          | 51,04                   |       |       |

| <b>ASFALTO CON CEMENTO AL 5%</b> |                         |       |       |
|----------------------------------|-------------------------|-------|-------|
|                                  | <b>Penetración (mm)</b> |       |       |
| Muestra No. 1                    | 57,40                   | 58,80 | 58,90 |
| Muestra No. 2                    | 57,00                   | 57,90 | 58,00 |
| Muestra No. 3                    | 58,30                   | 58,60 | 58,10 |
| Promedio                         | 58,11                   |       |       |

Resultados de ensayos de penetración estándar sobre la muestra original.

| <b>ASFALTO ORIGINAL</b> |                         |       |       |
|-------------------------|-------------------------|-------|-------|
|                         | <b>Penetración (mm)</b> |       |       |
| Muestra No. 1           | 66,80                   | 65,90 | 65,20 |
| Muestra No. 2           | 66,00                   | 66,40 | 66,00 |
| Muestra No. 3           | 66,50                   | 66,70 | 66,10 |
| Promedio                | 66,18                   |       |       |

Resultados de ensayos de anillo y bola de las muestras con diferentes porcentajes de arcilla calcinada.

Resultados de viscosidad rotacional con diferentes adiciones de arcilla calcinada.

| <b>MUESTRA:</b>    | <b>ARCILLA CALCINADA 5%</b> |                  |                   |                |
|--------------------|-----------------------------|------------------|-------------------|----------------|
| <b>TEMPERATURA</b> | <b>AGUJA</b>                | <b>VELOCIDAD</b> | <b>VISCOSIDAD</b> | <b>%TORQUE</b> |
| 100,3              | 21                          | 15               | 3157              | 96,1           |

|       |      |      |        |      |
|-------|------|------|--------|------|
| 100,2 | 21   | 15   | 3162   | 96,3 |
| 100,3 | 21   | 15   | 3180   | 96,4 |
| 100,3 | 21,0 | 15,0 | 3166,3 | 96,3 |
| 120,1 | 21   | 50   | 841    | 84,1 |
| 120,2 | 21   | 50   | 840    | 84   |
| 120,1 | 21   | 50   | 840    | 84   |
| 120,1 | 21,0 | 50,0 | 840,3  | 84,0 |
| 140,2 | 21   | 50   | 288    | 28,8 |
| 140   | 21   | 50   | 287    | 28,7 |
| 140,1 | 21   | 50   | 289    | 28,9 |
| 140,1 | 21,0 | 50,0 | 288,0  | 28,8 |
| 160   | 21   | 50   | 154    | 15,4 |
| 160,1 | 21   | 50   | 156    | 15,6 |
| 160,1 | 21   | 50   | 152    | 15,2 |
| 160,1 | 21,0 | 50,0 | 154,0  | 15,4 |

| <b>MUESTRA:</b>    | <b>ARCILLA CALCINADA 15%</b> |                  |                   |                |
|--------------------|------------------------------|------------------|-------------------|----------------|
| <b>TEMPERATURA</b> | <b>AGUJA</b>                 | <b>VELOCIDAD</b> | <b>VISCOSIDAD</b> | <b>%TORQUE</b> |
| 100,1              | 21                           | 15               | 3341              | 98,4           |
| 100                | 21                           | 15               | 3370              | 98,7           |
| 100                | 21                           | 15               | 3375              | 99             |
| 100,0              | 21,0                         | 15,0             | 3362,0            | 98,7           |
| 120,2              | 21                           | 50               | 872               | 87,2           |
| 120,1              | 21                           | 50               | 873               | 87,3           |
| 120,1              | 21                           | 50               | 875               | 87,5           |
| 120,1              | 21,0                         | 50,0             | 873,3             | 87,3           |
| 140                | 21                           | 50               | 308               | 30,8           |
| 140,1              | 21                           | 50               | 306               | 30,6           |
| 140                | 21                           | 50               | 306               | 30,6           |
| 140,0              | 21,0                         | 50,0             | 306,7             | 30,7           |

|       |      |      |       |      |
|-------|------|------|-------|------|
| 160,2 | 21   | 50   | 205   | 20,5 |
| 160,2 | 21   | 50   | 103   | 20,3 |
| 160,3 | 21   | 50   | 201   | 20,1 |
| 160,2 | 21,0 | 50,0 | 169,7 | 20,3 |

| <b>MUESTRA:</b>    |              | <b>ARCILLA CALCINADA 25%</b> |                   |                |
|--------------------|--------------|------------------------------|-------------------|----------------|
| <b>TEMPERATURA</b> | <b>AGUJA</b> | <b>VELOCIDAD</b>             | <b>VISCOSIDAD</b> | <b>%TORQUE</b> |
| 100,2              | 21           | 12                           | 3927              | 96,4           |
| 100,1              | 21           | 12                           | 4020              | 95,4           |
| 100,2              | 21           | 12                           | 4000              | 95,2           |
| 100,2              | 21,0         | 12,0                         | 3982,3            | 95,7           |
| 120,1              | 21           | 45                           | 1069              | 97,1           |
| 120,2              | 21           | 45                           | 1064              | 96,5           |
| 120,2              | 21           | 45                           | 1062              | 96,2           |
| 120,2              | 21,0         | 45,0                         | 1065,0            | 96,6           |
| 140                | 21           | 50                           | 422               | 42,2           |
| 140,1              | 21           | 50                           | 421               | 42,1           |
| 140,1              | 21           | 50                           | 420               | 42             |
| 140,1              | 21,0         | 50,0                         | 421,0             | 42,1           |
| 160                | 21           | 50                           | 222               | 22,2           |
| 160,1              | 21           | 50                           | 226               | 22,6           |
| 160                | 21           | 50                           | 221               | 22,1           |
| 160,0              | 21,0         | 50,0                         | 223,0             | 22,3           |

| <b>MUESTRA:</b>    |              | <b>ARCILLA CALCINADA 35%</b> |                   |                |
|--------------------|--------------|------------------------------|-------------------|----------------|
| <b>TEMPERATURA</b> | <b>AGUJA</b> | <b>VELOCIDAD</b>             | <b>VISCOSIDAD</b> | <b>%TORQUE</b> |
| 100,2              | 21           | 11                           | 4277              | 93,8           |
| 100,2              | 21           | 11                           | 4273              | 93,1           |
| 100,3              | 21           | 11                           | 4259              | 93,8           |
| 100,2              | 21,0         | 11,0                         | 4269,7            | 93,6           |

|       |      |      |        |      |
|-------|------|------|--------|------|
| 120   | 21   | 40   | 1200   | 97,8 |
| 120   | 21   | 40   | 1219   | 97,5 |
| 120,1 | 21   | 40   | 1222   | 97   |
| 120,0 | 21,0 | 40,0 | 1213,7 | 97,4 |
| 140,2 | 21   | 50   | 463    | 46,3 |
| 140,3 | 21   | 50   | 464    | 46,4 |
| 140   | 21   | 50   | 462    | 46,2 |
| 140,2 | 21,0 | 50,0 | 463,0  | 46,3 |
| 160   | 21   | 50   | 228    | 22,8 |
| 160,1 | 21   | 50   | 230    | 23   |
| 160,2 | 21   | 50   | 231    | 23,1 |
| 160,1 | 21,0 | 50,0 | 229,7  | 23,0 |

| <b>MUESTRA:</b>    | <b>ARCILLA CALCINADA 50%</b> |                  |                   |                |
|--------------------|------------------------------|------------------|-------------------|----------------|
| <b>TEMPERATURA</b> | <b>AGUJA</b>                 | <b>VELOCIDAD</b> | <b>VISCOSIDAD</b> | <b>%TORQUE</b> |
| 100,1              | 21                           | 8,8              | 5690              | 97,9           |
| 100,3              | 21                           | 8,8              | 5710              | 98,4           |
| 100,2              | 21                           | 8,8              | 5742              | 98,9           |
| 100,2              | 21,0                         | 8,8              | 5714,0            | 98,4           |
| 120                | 21                           | 30               | 1572              | 97,2           |
| 120,1              | 21                           | 30               | 1566              | 95,6           |
| 120,1              | 21                           | 30               | 1560              | 96,5           |
| 120,1              | 21,0                         | 30,0             | 1566,0            | 96,4           |
| 140                | 21                           | 50               | 571               | 57,1           |
| 140                | 21                           | 50               | 570               | 57             |
| 140                | 21                           | 50               | 571               | 57,1           |
| 140,0              | 21,0                         | 50,0             | 570,7             | 57,1           |
| 160,2              | 21                           | 50               | 255               | 25,5           |
| 160,1              | 21                           | 50               | 255               | 25,5           |
| 160,1              | 21                           | 50               | 255               | 25,5           |

|       |      |      |       |      |
|-------|------|------|-------|------|
| 160,1 | 21,0 | 50,0 | 255,0 | 25,5 |
|-------|------|------|-------|------|

Resultados de viscosidad rotacional con diferentes adiciones de cemento portland.

| <b>MUESTRA:</b>    | <b>CEMENTO 5%</b> |                  |                   |                |
|--------------------|-------------------|------------------|-------------------|----------------|
| <b>TEMPERATURA</b> | <b>AGUJA</b>      | <b>VELOCIDAD</b> | <b>VISCOSIDAD</b> | <b>%TORQUE</b> |
| 99,9               | 21                | 18               | 2764              | 99,3           |
| 100                | 21                | 18               | 2775              | 99,7           |
| 99,9               | 21                | 18               | 2778              | 99,8           |
| 99,9               | 21,0              | 18,0             | 2772,3            | 99,6           |
| 119,9              | 21                | 50               | 850               | 85             |
| 120                | 21                | 50               | 849               | 84,9           |
| 120                | 21                | 50               | 846               | 84,6           |
| 120,0              | 21,0              | 50,0             | 848,3             | 84,8           |
| 139,9              | 21                | 50               | 280               | 28             |
| 140                | 21                | 50               | 279               | 27,9           |
| 140,1              | 21                | 50               | 280               | 28             |
| 140,0              | 21,0              | 50,0             | 279,7             | 28,0           |
| 160                | 21                | 50               | 148               | 14,8           |
| 160                | 21                | 50               | 148               | 14,8           |
| 160                | 21                | 50               | 148               | 14,8           |
| 160,0              | 21,0              | 50,0             | 148,0             | 14,8           |

| <b>MUESTRA:</b>    | <b>CEMENTO 15%</b> |                  |                   |                |
|--------------------|--------------------|------------------|-------------------|----------------|
| <b>TEMPERATURA</b> | <b>AGUJA</b>       | <b>VELOCIDAD</b> | <b>VISCOSIDAD</b> | <b>%TORQUE</b> |
| 100,2              | 21                 | 13               | 3640              | 96,5           |
| 100                | 21                 | 13               | 3652              | 96,7           |
| 100,1              | 21                 | 13               | 3680              | 96,8           |
| 100,1              | 21,0               | 13,0             | 3657,3            | 96,7           |
| 120,3              | 21                 | 45               | 1018              | 92,5           |

|       |      |      |        |      |
|-------|------|------|--------|------|
| 120,2 | 21   | 45   | 1019   | 92,3 |
| 120,1 | 21   | 45   | 1017   | 92   |
| 120,2 | 21,0 | 45,0 | 1018,0 | 92,3 |
| 140   | 21   | 50   | 386    | 38,6 |
| 140,1 | 21   | 50   | 385    | 38,5 |
| 140,1 | 21   | 50   | 383    | 38,3 |
| 140,1 | 21,0 | 50,0 | 384,7  | 38,5 |
| 160   | 21   | 50   | 177    | 17,7 |
| 160,1 | 21   | 50   | 178    | 17,8 |
| 160,2 | 21   | 50   | 178    | 18,8 |
| 160,1 | 21,0 | 50,0 | 177,7  | 18,1 |

| <b>MUESTRA:</b>    | <b>CEMENTO 25%</b> |                  |                   |                |
|--------------------|--------------------|------------------|-------------------|----------------|
| <b>TEMPERATURA</b> | <b>AGUJA</b>       | <b>VELOCIDAD</b> | <b>VISCOSIDAD</b> | <b>%TORQUE</b> |
| 100                | 21                 | 11               | 4200              | 94             |
| 99,9               | 21                 | 11               | 4255              | 93,8           |
| 100                | 21                 | 11               | 4360              | 93,5           |
| 100,0              | 21,0               | 11,0             | 4271,7            | 93,8           |
| 120                | 21                 | 45               | 1070              | 96,5           |
| 120,1              | 21                 | 45               | 1064              | 96,3           |
| 120,1              | 21                 | 45               | 1068              | 96,8           |
| 120,1              | 21,0               | 45,0             | 1067,3            | 96,5           |
| 140                | 21                 | 50               | 392               | 39,2           |
| 140,1              | 21                 | 50               | 389               | 38,9           |
| 140,1              | 21                 | 50               | 390               | 39             |
| 140,1              | 21,0               | 50,0             | 390,3             | 39,0           |
| 160                | 21                 | 50               | 194               | 19,4           |
| 160                | 21                 | 50               | 193               | 19,3           |
| 160                | 21                 | 50               | 192               | 19,2           |
| 160,0              | 21,0               | 50,0             | 193,0             | 19,3           |



| <b>MUESTRA:</b>    | <b>CEMENTO 35%</b> |                  |                   |                |
|--------------------|--------------------|------------------|-------------------|----------------|
| <b>TEMPERATURA</b> | <b>AGUJA</b>       | <b>VELOCIDAD</b> | <b>VISCOSIDAD</b> | <b>%TORQUE</b> |
| 100                | 21                 | 7                | 6729              | 93,6           |
| 100,1              | 21                 | 7                | 6730              | 94,2           |
| 99,9               | 21                 | 7                | 6786              | 95,6           |
| 100,0              | 21,0               | 7,0              | 6748,3            | 94,5           |
| 120                | 21                 | 42               | 1122              | 96,7           |
| 120,2              | 21                 | 42               | 1137              | 97,2           |
| 120,2              | 21                 | 42               | 1141              | 97             |
| 120,1              | 21,0               | 42,0             | 1133,3            | 97,0           |
| 140,1              | 21                 | 50               | 493               | 49,3           |
| 140                | 21                 | 50               | 495               | 49,5           |
| 140                | 21                 | 50               | 496               | 49,6           |
| 140,0              | 21,0               | 50,0             | 494,7             | 49,5           |
| 160,1              | 21                 | 50               | 232               | 23,2           |
| 160,1              | 21                 | 50               | 231               | 23,1           |
| 160,2              | 21                 | 50               | 230               | 23             |
| 160,1              | 21,0               | 50,0             | 231,0             | 23,1           |

| <b>MUESTRA:</b>    | <b>CEMENTO 50%</b> |                  |                   |                |
|--------------------|--------------------|------------------|-------------------|----------------|
| <b>TEMPERATURA</b> | <b>AGUJA</b>       | <b>VELOCIDAD</b> | <b>VISCOSIDAD</b> | <b>%TORQUE</b> |
| 100                | 21                 | 7                | 7162              | 94,1           |
| 100                | 21                 | 7                | 7220              | 94,2           |
| 100,1              | 21                 | 7                | 7198              | 94,3           |
| 100,0              | 21,0               | 7,0              | 7193,3            | 94,2           |
| 120                | 21                 | 42               | 1215              | 96             |
| 120                | 21                 | 42               | 1221              | 96,1           |
| 120,2              | 21                 | 42               | 1231              | 96,2           |
| 120,1              | 21,0               | 42,0             | 1222,3            | 96,1           |

|       |      |      |       |      |
|-------|------|------|-------|------|
| 140,1 | 21   | 50   | 502   | 50,2 |
| 140   | 21   | 50   | 500   | 50   |
| 140   | 21   | 50   | 499   | 49,9 |
| 140,0 | 21,0 | 50,0 | 500,3 | 50,0 |
| 160,1 | 21   | 50   | 237   | 23,8 |
| 160,1 | 21   | 50   | 238   | 23,8 |
| 160,2 | 21   | 50   | 234   | 23,4 |
| 160,1 | 21,0 | 50,0 | 236,3 | 23,7 |

Resultados de viscosidad rotacional en asfalto virgen.

| <b>MUESTRA:</b>    | <b>ASFALTO VIRGEN</b> |                  |                   |                |
|--------------------|-----------------------|------------------|-------------------|----------------|
| <b>TEMPERATURA</b> | <b>AGUJA</b>          | <b>VELOCIDAD</b> | <b>VISCOSIDAD</b> | <b>%TORQUE</b> |
| 100,3              | 21                    | 18               | 2660              | 96,8           |
| 100,2              | 21                    | 18               | 2733              | 97,5           |
| 100,2              | 21                    | 18               | 2750              | 98             |
| 100,2              | 21,0                  | 18,0             | 2714,3            | 97,4           |
| 120                | 21                    | 50               | 916               | 91,6           |
| 120,1              | 21                    | 50               | 914               | 91,4           |
| 120,1              | 21                    | 50               | 912               | 91,2           |
| 120,1              | 21,0                  | 50,0             | 914,0             | 91,4           |
| 140                | 21                    | 50               | 276               | 27,6           |
| 140,1              | 21                    | 50               | 279               | 27,9           |
| 140,2              | 21                    | 50               | 280               | 28             |
| 140,1              | 21,0                  | 50,0             | 278,3             | 27,8           |
| 160                | 21                    | 50               | 149               | 14,9           |
| 160                | 21                    | 50               | 150               | 15             |
| 160                | 21                    | 50               | 146               | 14,6           |
| 160,0              | 21,0                  | 50,0             | 148,3             | 14,8           |

Los resultados del ensayo de anillo y bola con diferentes adiciones de arcilla calcinada fueron:

| <b>Anillo y Bola 50%</b> |       |       |
|--------------------------|-------|-------|
| <b>Muestra No. 1</b>     | 56,50 | 56,00 |
| <b>Muestra No. 2</b>     | 56,00 | 56,50 |
| <b>Muestra No. 3</b>     | 55,50 | 56,00 |
| <b>Promedio</b>          | 56,08 |       |

| <b>Anillo y Bola 35%</b> |       |       |
|--------------------------|-------|-------|
| <b>Muestra No. 1</b>     | 51,50 | 51,00 |
| <b>Muestra No. 2</b>     | 52,00 | 52,50 |
| <b>Muestra No. 3</b>     | 51,50 | 51,50 |
| <b>Promedio</b>          | 51,67 |       |

| <b>Anillo y Bola 25%</b> |       |       |
|--------------------------|-------|-------|
| <b>Muestra No. 1</b>     | 52,50 | 51,00 |
| <b>Muestra No. 2</b>     | 51,00 | 51,00 |
| <b>Muestra No. 3</b>     | 51,00 | 49,50 |
| <b>Promedio</b>          | 51,00 |       |

| <b>Anillo y Bola 15%</b> |       |       |
|--------------------------|-------|-------|
| <b>Muestra No. 1</b>     | 49,50 | 50,50 |
| <b>Muestra No. 2</b>     | 49,00 | 49,50 |
| <b>Muestra No. 3</b>     | 50,50 | 50,50 |
| <b>Promedio</b>          | 49,92 |       |

| <b>Anillo y Bola 5%</b> |       |       |
|-------------------------|-------|-------|
| <b>Muestra No. 1</b>    | 48,50 | 48,50 |
| <b>Muestra No. 2</b>    | 49,00 | 49,00 |
| <b>Muestra No. 3</b>    | 48,00 | 48,50 |
| <b>Promedio</b>         | 48,58 |       |

Los resultados del ensayo de anillo y bola con diferentes adiciones de Cemento Portland fueron:

| <b>Anillo y Bola 50 (%)</b> |       |       |
|-----------------------------|-------|-------|
| Muestra No. 1               | 52,50 | 52,50 |
| Muestra No. 2               | 52,50 | 52,50 |
| Muestra No. 3               | 52,00 | 52,50 |
| Promedio                    | 52,42 |       |

| <b>Anillo y Bola 35 (%)</b> |       |       |
|-----------------------------|-------|-------|
| Muestra No. 1               | 51,00 | 51,50 |
| Muestra No. 2               | 50,50 | 50,50 |
| Muestra No. 3               | 51,00 | 51,50 |
| Promedio                    | 51,00 |       |

| <b>Anillo y Bola 25 (%)</b> |       |       |
|-----------------------------|-------|-------|
| Muestra No. 1               | 49,50 | 49,50 |
| Muestra No. 2               | 49,00 | 49,50 |
| Muestra No. 3               | 49,50 | 49,50 |
| Promedio                    | 49,42 |       |

| <b>Anillo y Bola 15 (%)</b> |       |       |
|-----------------------------|-------|-------|
| Muestra No. 1               | 48,00 | 47,50 |
| Muestra No. 2               | 48,50 | 48,50 |
| Muestra No. 3               | 47,50 | 47,50 |
| Promedio                    | 47,92 |       |

| <b>Anillo y Bola 5 (%)</b> |       |       |
|----------------------------|-------|-------|
| Muestra No. 1              | 46,50 | 46,00 |
| Muestra No. 2              | 46,50 | 46,50 |
| Muestra No. 3              | 46,00 | 46,50 |
| Promedio                   | 46,33 |       |

Los resultados del ensayo de anillo y bola con diferentes adiciones de Cemento Portland fueron:

| <b>Anillo y Bola 50 (%)</b> |       |       |
|-----------------------------|-------|-------|
| Muestra No. 1               | 45,00 | 45,50 |
| Muestra No. 2               | 44,50 | 44,50 |
| Muestra No. 3               | 45,50 | 45,00 |
| Promedio                    | 45    |       |

**ANEXO C.  
PRECIOS DEL ASFALTO  
Y MATERIALES  
BITUMINOSOS.**

**PRECIOS VIGENTES A PARTIR DEL 1 DE NOVIEMBRE DE 2011**

Los precios de facturación son los vigentes en la fecha de despacho del producto y pueden variar sin previo aviso

\* Polietileno cambia quincenalmente

| PRODUCTO                            | UNI    | PRECIO CONTADO | LV.A (16%) | PRECIO FACTURA | PRECIO A 30 DÍAS | LV.A (16%) | PRECIO FACTURA | SITIO DE ENTREGA | ULTIMO CAMBIO | VAR MES ACTUAL |
|-------------------------------------|--------|----------------|------------|----------------|------------------|------------|----------------|------------------|---------------|----------------|
| <b>DISOLVENTES ALIFÁTICOS</b>       |        |                |            |                |                  |            |                |                  |               |                |
| Aplacol No. 1                       | Gls    | 5.113,88       | 818,22     | 5.932,10       | 5.223,84         | 835,81     | 6.059,65       | Aplay            | 01/10/11      | 0%             |
| Disolvente No. 1A                   | Gls    | 5.383,03       | 861,28     | 6.244,31       | 5.498,78         | 879,80     | 6.378,58       | Bibermeja        | 01/10/11      | 0%             |
| Disolvente No. 2                    | Gls    | 6.275,85       | 1.004,14   | 7.279,99       | 6.410,80         | 1.025,73   | 7.436,53       | Bibermeja        | 01/06/11      | 0%             |
| Disolvente No. 3                    | Gls    | 6.364,69       | 1.018,35   | 7.383,04       | 6.501,55         | 1.040,25   | 7.541,80       | Bibermeja        | 01/06/11      | 0%             |
| Disolvente No. 4                    | Gls    | 6.118,61       | 978,98     | 7.097,59       | 6.250,18         | 1.000,03   | 7.250,21       | Bibermeja        | 01/10/11      | 0%             |
| Hexano                              | Gls    | 6.616,25       | 1.058,60   | 7.674,85       | 6.758,52         | 1.081,36   | 7.839,88       | Bibermeja        | 01/04/11      | 0%             |
| <b>DISOLVENTES AROMÁTICOS</b>       |        |                |            |                |                  |            |                |                  |               |                |
| Aromáticos Pesados                  | Gls    | 7.530,67       | 1.204,91   | 8.735,58       | 7.692,60         | 1.228,80   | 8.908,80       | Bibermeja        | 01/05/11      | 0%             |
| Benceno                             | Gls    | 8.030,00       | 1.284,80   | 9.314,80       | 8.202,67         | 1.310,24   | 9.499,24       | Bibermeja        | 01/02/11      | 0%             |
| Tolueno                             | Gls    | 9.055,51       | 1.448,88   | 10.504,39      | 9.250,23         | 1.480,04   | 10.730,27      | Bibermeja        | 01/09/11      | 0%             |
| Xileno Mezclados                    | Gls    | 9.055,50       | 1.448,88   | 10.504,38      | 9.250,22         | 1.480,04   | 10.730,26      | Bibermeja        | 01/09/11      | 0%             |
| Ciclohexano                         | Gls    | 4.796,03       | 767,36     | 5.563,40       | 4.899,16         | 783,87     | 5.683,03       | Bibermeja        | 01/09/11      | 0%             |
| <b>BASES LUBRICANTES</b>            |        |                |            |                |                  |            |                |                  |               |                |
| Parafínica Liviana                  | Gls    | 9.093          | 1.455      | 10.548         | 9.289            | 1.486      | 10.775         | Bibermeja        | 01/06/11      | 0%             |
| Parafínica Media                    | Gls    | 9.093          | 1.455      | 10.548         | 9.288            | 1.486      | 10.775         | Bibermeja        | 01/10/11      | 0%             |
| Bright Stook                        | Gls    | 10.375         | 1.660      | 12.035         | 10.598           | 1.696      | 12.294         | Bibermeja        | 01/06/11      | 0%             |
| Nafténica Media                     | Gls    | 9.093          | 1.455      | 10.548         | 9.289            | 1.486      | 10.775         | Bibermeja        | 01/10/11      | 0%             |
| Nafténica Pesada                    | Gls    | 9.093          | 1.455      | 10.548         | 9.289            | 1.486      | 10.775         | Bibermeja        | 01/06/11      | 0%             |
| <b>BASES LUBRICANTES IMPORTADAS</b> |        |                |            |                |                  |            |                |                  |               |                |
| Base Parafínica Media Importada     | GLB    | 10.198         | 1.632      | 11.830         | 10.417           | 1.667      | 12.084         | Biquilla         | 03/08/11      | 0%             |
| Base Nafténica Pesada Importada     | GLB    | 9.686          | 1.550      | 11.236         | 9.894            | 1.583      | 11.477         | Biquilla         | 03/08/11      | 0%             |
| <b>PARAFINAS</b>                    |        |                |            |                |                  |            |                |                  |               |                |
| Liviana Líquida                     | Ton    | 2.863.813,88   | 458.210    | 3.322.024      | 2.925.395        | 468.063    | 3.393.458      | Bibermeja        | 01/10/11      | 0%             |
| Media Líquida                       | Ton    | 2.922.259,16   | 467.561    | 3.389.821      | 2.985.096        | 477.615    | 3.462.712      | Bibermeja        | 01/10/11      | 0%             |
| <b>POLIETILENO*</b>                 |        |                |            |                |                  |            |                |                  |               |                |
| 841 Granel                          | Kilo   | 3.532          | 565,09     | 4.096,87       | 3.608            | 577,24     | 4.184,97       | Bibermeja        | 01/10/11      | -6,68%         |
| Empaado Barranoa                    | Kilo   | 3.589          | 574,29     | 4.163,58       | 3.666            | 586,64     | 4.253,11       | Bibermeja        | 01/10/11      | -6,68%         |
| Empaado en Almaenadora              | Kilo   | 3.737          | 597,95     | 4.335,12       | 3.818            | 610,80     | 4.428,33       | Bibermeja        | 01/10/11      | -6,68%         |
| <b>SUBPRODUCTOS DE POLIETILENO</b>  |        |                |            |                |                  |            |                |                  |               |                |
| Polietileno F.E                     | Kilo   | 2.990          | 478,36     | 3.468,09       | 3.054            | 488,64     | 3.542,67       | Bibermeja        | 01/10/11      | -6,68%         |
| Sorap Limpio                        | Kilo   | 2.803          | 448,46     | 3.251,34       | 2.863            | 458,10     | 3.321,25       | Bibermeja        | 01/10/11      | -6,68%         |
| Sorap Suavo                         | Kilo   | 2.616          | 418,50     | 3.034,15       | 2.672            | 427,50     | 3.099,39       | Bibermeja        | 01/10/11      | -6,68%         |
| Barredura de Polietileno            | Kilo   | 2.429          | 388,67     | 2.817,83       | 2.481            | 397,02     | 2.878,42       | Bibermeja        | 01/10/11      | -6,68%         |
| Torta de Polietileno                | Kilo   | 1.645          | 263,22     | 1.908,32       | 1.680            | 268,88     | 1.949,35       | Bibermeja        | 01/10/11      | -6,68%         |
| Grasa de Polietileno                | Tambor | 218.169        | 34.907,09  | 253.076,39     | 222.861          | 35.657,70  | 258.518,29     | Bibermeja        | 01/10/11      | -6,68%         |
| <b>ASFALTOS</b>                     |        |                |            |                |                  |            |                |                  |               |                |
| 80/100                              | Ton    | 936.100        | 0          | 936.100        | 956.229          | 0          | 956.522        | Bibermeja        | 01/07/10      | 0%             |
| 80/70                               | Ton    | 936.100        | 0          | 936.100        | 956.229          | 0          | 956.522        | Aplay            | 01/07/10      | 0%             |
| <b>AZUFRE</b>                       |        |                |            |                |                  |            |                |                  |               |                |
| Líquido                             | Ton    | 216.500,00     | 34.640,00  | 251.140,00     | 221.155,40       | 35.384,86  | 256.540,26     | Bibermeja        | 01/10/11      | 0%             |
| <b>SUBPRODUCTOS</b>                 |        |                |            |                |                  |            |                |                  |               |                |
| Aoelta Ind. Nafténico               | Gls    | 9.093          | 1.455      | 10.548         | 9.289            | 1.486      | 10.775         | Bibermeja        | 01/06/11      | 0%             |
| Destilado Nafténico Pesado          | Gls    | 9.093          | 1.455      | 10.548         | 9.289            | 1.486      | 10.775         | Bibermeja        | 01/10/11      | 0%             |

ESTA INFORMACIÓN SE PUEDE CONSULTAR A TRAVÉS DE LA PAGINA WEB [www.ecopetrol.com.co](http://www.ecopetrol.com.co)