

**DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE ENSAYOS DE VISCOSIDAD A CEMENTOS
ASFÁLTICOS SIN MODIFICAR Y MODIFICADOS CON PVC EMPLEANDO EL
VISCOSÍMETRO ROTACIONAL BROCKFIELD**

ANDRÉS FELIPE DÍAZ RUEDA

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2017

**DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE ENSAYOS DE VISCOSIDAD A CEMENTOS
ASFÁLTICOS SIN MODIFICAR Y MODIFICADOS CON PVC EMPLEANDO EL
VISCOSÍMETRO ROTACIONAL BROCKFIELD**

ANDRÉS FELIPE DÍAZ RUEDA

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Civil**

Director:

Ing. JULIÁN ANDRÉ GALVIS FLÓREZ

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2017

NOTA DE ACEPTACIÓN

Jurado

Jurado

Jurado

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mis padres Nepomuceno Díaz y Martha Inés Rueda que sin su cariño, apoyo y calidez no hubiese llegado tan lejos, también quiero agradecer a mis hermanas Diana Marcela Díaz, Adriana Díaz y Carmen Alicia Díaz por estar ahí cuando las necesité y apoyarme incondicionalmente en mis proyectos, Así como a todos mis familiares por su consejo e interés en mi bienestar y en que tenga un proyecto de vida.

A las instituciones en las que me forme dotándome de valores y conocimiento, a mis amigos por ser un apoyo importante.

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 18 |
| 1. GENERALIDADES | 20 |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 20 |
| 1.2 JUSTIFICACIÓN | 21 |
| 2. OBJETIVOS | 22 |
| 2.1 OBJETIVO GENERAL | 22 |
| 2.2 OBJETIVOS SECUNDARIOS | 22 |
| 3. ALCANCE | 23 |
| 4. MARCO TEÓRICO | 24 |
| 4.1 PAVIMENTOS | 24 |
| 4.1.1 Función del pavimento | 24 |
| 4.1.2 Características de un pavimento | 25 |
| 4.1.3 Tipos de pavimentos | 26 |
| 4.1.4 Partes de un pavimento flexible | 27 |
| 4.2 MATERIALES BITUMINOSOS | 29 |
| 4.2.1 Tipos de materiales bituminosos | 30 |
| 4.3 CEMENTO ASFÁLTICO | 33 |
| 4.3.1 Propiedades del cemento asfáltico | 33 |
| 4.3.2 Composición química del cemento asfáltico | 34 |
| 4.4 ASFALTOS MODIFICADOS CON POLÍMEROS | 34 |
| 4.4.1 Ventajas de los cementos asfálticos modificados con polímeros | 35 |
| 4.5 P.V.C. | 37 |
| 4.5.1 Origen del P.V.C | 37 |
| 4.5.2 Propiedades físicas del P.V.C | 38 |

| | |
|--|----|
| 4.5.3 Usos del P.V.C. en la industria de construcción | 40 |
| 4.5.4 El uso del P.V.C. en los asfaltos y cementos asfálticos | 41 |
| 4.6 REOLOGÍA | 41 |
| 4.6.1 ¿Qué es la Reologia? | 41 |
| 4.6.2 Las Propiedades reologicas en los asfaltos. | 42 |
| 4.6.3 Tipos de fluidos | 43 |
| 4.6.4 Curva reologica | 44 |
| 5. METODOLOGÍA | 46 |
| 6. OBTENCIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO Y P.V.C. EN POLVO | 49 |
| 7. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO DE ORIGEN BITUMINOSO | 52 |
| 7.1 PENETRACIÓN DE LOS MATERIALES ASFÁLTICOS (ENSAYO I.N.V. E – 706 – 13)..... | 52 |
| 7.2 PUNTO DE IGNICIÓN Y DE LLAMA MEDIANTE LA COPA ABIERTA CLEVELAND (ENSAYO I.N.V. E – 709 – 13)..... | 55 |
| 7.3 PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE MATERIALES BITUMINOSOS APARATO DE ANILLO Y BOLA (ENSAYO I.N.V. E – 712 – 13)..... | 58 |
| 7.4 DUCTILIDAD DE LOS MATERIALES ASFÁLTICOS (ENSAYO DE INV E – 702 – 13)..... | 60 |
| 7.5 DETERMINAR LA DENSIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO POR MEDIO DEL PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES..... | 63 |
| 8. CARACTERIZACIÓN DEL P.V.C. EN POLVO. | 66 |
| 8.1 ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS FINOS | 66 |
| 8.2 ENSAYO DE DENSIDAD RELATIVA. | 67 |
| 9. DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD EMPLEANDO EL VISCOSÍMETRO ROTACIONAL BROOKFIELD. ENSAYO I.N.V. E – 717 – 13..... | 68 |
| 9.1 ELABORACIÓN DE LAS MUESTRAS NO MODIFICADAS Y MUESTRAS MODIFICADAS CON P.V.C. EN PORCENTAJES DE 5%, 10%, 15% y 20%. | 68 |
| 9.1.1 Muestras no modificadas | 69 |

| | |
|--|-----|
| 9.1.2 Muestras alteradas con P.V.C | 72 |
| 9.2 PROCESO DE DETERMINACIÓN DE VISCOSIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO MEDIANTE EL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD..... | 82 |
| 10. RESULTADOS..... | 100 |
| 10.1 CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO | 100 |
| 10.1.1 Penetración de los materiales asfálticos..... | 100 |
| 10.1.2 Punto de ignición y de llama mediante la copa abierta Cleveland | 100 |
| 10.1.3 Punto de ablandamiento de materiales bituminosos aparato de anillo y bola | 101 |
| 10.1.4 Ductilidad de los materiales asfálticos | 101 |
| 10.1.5 Determinar la densidad del cemento asfáltico. | 101 |
| 10.2 CARACTERIZACIÓN DEL P.V.C. | 102 |
| 10.2.1 Ensayo de Ensayo de análisis granulométrico de los agregados finos..... | 102 |
| 10.2.2 Ensayo de densidad relativa | 103 |
| 10.3 RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS POR EL MÉTODO PARA DETERMINAR LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO EL VISCOSÍMETRO ROTACIONAL. | 103 |
| 10.3.1 Ensayos con cemento asfáltico sin modificar..... | 103 |
| 10.3.2 Ensayos con cemento asfáltico modificado en 5% con P.V.C | 105 |
| 10.3.3 Ensayos con cemento asfáltico modificado en 10% con P.V.C | 107 |
| 10.3.4 Ensayos con cemento asfáltico modificado en un 15% con P.V.C | 109 |
| 10.3.5 Ensayos con cemento asfáltico modificado en un 20% con P.V.C | 111 |
| 11. ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 114 |
| 11.1 CEMENTO ASFÁLTICO. | 114 |
| 11.2 P.V.C..... | 115 |
| 11.3 VISCOSIDAD CEMENTO ASFÁLTICO. | 115 |
| 11.3.1 Viscosidad del cemento asfáltico sin modificar | 115 |
| 11.3.2 Viscosidad del cemento asfáltico modificado con 5% P.V.C..... | 118 |
| 11.3.3 Viscosidad del cemento asfáltico con 10% P.V.C..... | 121 |
| 11.3.4 Viscosidad del cemento asfáltico con 15% P.V.C..... | 124 |

| | |
|---|-----|
| 11.3.5 Viscosidad del cemento asfáltico con 20% de P.V.C..... | 127 |
| 11.3.6 Comparación viscosidad del cemento asfáltico sin modificar y modificado con 5%, 10%, 15% y 20% de P.V.C | 130 |
| 12. CONCLUSIONES | 140 |
| 13. RECOMENDACIONES..... | 141 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 142 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Componentes del pavimento flexible | 29 |
| Figura 2. Clasificación de ligantes bituminosos | 31 |
| Figura 3. Composición química del cemento asfáltico | 34 |
| Figura 4. Asfalto modificado y sin modificar con polímeros y su Consistencia | 35 |
| Figura 5. Tipos de fluidos..... | 43 |
| Figura 6. Ilustración de curva reologica | 44 |
| Figura 7. Diagrama de la metodología del proyecto | 48 |
| Figura 8. Viscosidad vs temperatura con 0% P.V.C. | 117 |
| Figura 9. Viscosidad vs temperatura con 5% P.V.C. | 120 |
| Figura 10. Viscosidad vs temperatura con 10% P.V.C. | 123 |
| Figura 11. Viscosidad Vs. Temperatura con 15% P.V.C..... | 126 |
| Figura 12. Viscosidad Vs Temperatura con 20% P.V.C..... | 129 |
| Figura 13. Comparación de viscosidades 80°C | 130 |
| Figura 14. Comparación de viscosidades 90°C | 131 |
| Figura 15. Comparación de viscosidades a 100°C | 131 |
| Figura 16. Comparación de viscosidades A 110°C..... | 132 |
| Figura 17. Comparación de viscosidades a 120°C | 133 |
| Figura 18. Comparación viscosidad..... | 134 |

LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Fotografía 1. Almacén de materiales | 49 |
| Fotografía 2. Barril de cemento asfáltico almacenado | 50 |
| Fotografía 3. Extracción del cemento asfáltico | 50 |
| Fotografía 4. Cemento asfáltico extraído | 51 |
| Fotografía 5. Almacenaje del cemento asfáltico | 51 |
| Fotografía 6. Muestras caracterización cemento asfáltico | 52 |
| Fotografía 7. Ensayo de penetración | 53 |
| Fotografía 8. Ensayo de penetración | 54 |
| Fotografía 9. MUESTRA ASFÁLTICA..... | 54 |
| Fotografía 10. Ensayo penetración realizado | 54 |
| Fotografía 11. Muestra penetrada..... | 54 |
| Fotografía 12. Punto de ignición y de llama..... | 56 |
| Fotografía 13. Operario verificando temperatura | 57 |
| Fotografía 14. Muestra para el ensayo | 57 |
| Fotografía 15. Verificando el estado del cemento..... | 57 |
| Fotografía 16. Organización termómetro y máquina..... | 57 |
| Fotografía 17. Máquina de temperatura con termómetro..... | 57 |
| Fotografía 18. Punto de llama..... | 57 |
| Fotografía 19. Punto de ablandamiento | 58 |
| Fotografía 20. Operador controlando el ensayo | 59 |
| Fotografía 21. Realización del ensayo..... | 59 |
| Fotografía 22. Inicio del ensayo de ablandamiento..... | 59 |
| Fotografía 23. Muestras preparadas para el ensayo | 59 |
| Fotografía 24. Ductilidad de los materiales asfálticos | 60 |

| | |
|--|----|
| Fotografía 25. Muestra siendo preparada para la colocación | 62 |
| Fotografía 26. Muestra recién elaborada | 62 |
| Fotografía 27. Ensayo en ejecución..... | 62 |
| Fotografía 28. Inicio del ensayo | 62 |
| Fotografía 29. Operario controlando el ensayo..... | 62 |
| Fotografía 30. Finalización del ensayo | 62 |
| Fotografía 31. Densidad relativa | 63 |
| Fotografía 32. Probeta con la muestra de cemento en su interior | 65 |
| Fotografía 33. Probeta antes del inicio del ensayo | 65 |
| Fotografía 34. Muestras utilizadas para el ensayo..... | 65 |
| Fotografía 35. Ensayo de granulometría..... | 66 |
| Fotografía 36. Determinación densidad relativa | 67 |
| Fotografía 37. Capsulas..... | 69 |
| Fotografía 38. Cemento asfáltico mientras es calentado | 70 |
| Fotografía 39. Cemento asfáltico siendo vertido en capsula. | 71 |
| Fotografía 40. Capsula con cantidad correcta de cemento asfáltico..... | 72 |
| Fotografía 41. Recipiente tarado..... | 73 |
| Fotografía 42. Masa del cemento asfáltico. | 73 |
| Fotografía 43. Masa de P.V.C..... | 75 |
| Fotografía 44. Termómetro a 100°C | 75 |
| Fotografía 45. P.V.C siendo agregado al cemento asfáltico | 76 |
| Fotografía 46. Cemento asfáltico modificado con P.V.C siendo mezclado..... | 77 |
| Fotografía 47. Capsula con cemento asfáltico modificado..... | 77 |
| Fotografía 48. Capsulas elaboradas | 78 |
| Fotografía 49. Recipiente de mezcla y recipiente de dosificación..... | 80 |
| Fotografía 50. Muestras del proyecto reposando..... | 80 |
| Fotografía 51. Operario realizando la mezcla del cemento asfáltico..... | 80 |
| Fotografía 52. Controlando el contenido de las capsulas | 80 |
| Fotografía 53. P.V.C. siendo agregado al cemento asfáltico | 80 |
| Fotografía 54. Muestras reposando..... | 80 |

| | |
|---|----|
| Fotografía 55. Operario controlando la mezcla | 81 |
| Fotografía 56. Operario realizando mezcla | 81 |
| Fotografía 57. Controlando la temperatura de la mezcla | 81 |
| Fotografía 58. Mezcla de cemento asfáltico | 81 |
| Fotografía 59. Recipiente de mezcla siendo tarado | 81 |
| Fotografía 60. Cemento asfáltico con P.V.C. recién agregado | 81 |
| Fotografía 61. Paso 1.1. | 82 |
| Fotografía 62. Paso 1.2. | 83 |
| Fotografía 63. Nivelación | 83 |
| Fotografía 64. Autocero completado | 84 |
| Fotografía 65. Muestra en el horno | 84 |
| Fotografía 66. Capsula en termo celda (Paso 4.1.) | 85 |
| Fotografía 67. Paso 5.1. | 86 |
| Fotografía 68. Paso 5.2. | 86 |
| Fotografía 69. Paso 5.3. | 87 |
| Fotografía 70. Paso 5.4. | 87 |
| Fotografía 71. Hombro de la aguja | 88 |
| Fotografía 72. Bajando el hombro | 88 |
| Fotografía 73. Hombro cubierto por cemento asfáltico. | 89 |
| Fotografía 74. Paso 7.1. | 89 |
| Fotografía 75. Paso 8.1. | 90 |
| Fotografía 76. Paso 8.2. | 91 |
| Fotografía 77. Pantalla enlace externo conectado | 91 |
| Fotografía 78. Pasos 9.1,9.2,9.3..... | 92 |
| Fotografía 79. Pasos 10.1,10.2,10.3..... | 93 |
| Fotografía 80. Paso 11.1,11.2..... | 93 |
| Fotografía 81. Pasos 11.3,11.4..... | 94 |
| Fotografía 82. Paso 12.1,12.2..... | 95 |
| Fotografía 83. Pasos 13.1,13.2,13.3,13.4,13.5,13.6 | 96 |
| Fotografía 84. Pasos 14.1,14.2,14.3,14.4..... | 97 |

Fotografía 85. Pasos 15.1,15.2.....98
Fotografía 86. Paso 15.3.98
Fotografía 87. Paso 15.4.99

LISTADO DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Polímeros y características que brindan al cemento asfáltico..... | 36 |
| Tabla 2. Descripción de ensayos realizados..... | 68 |
| Tabla 3. Preparación de la muestra en capsula..... | 70 |
| Tabla 4. Cálculos de P.V.C. a agregar..... | 74 |
| Tabla 5. Resultados ensayo penetración..... | 100 |
| Tabla 6. Resultados punto de ignición y de llama..... | 101 |
| Tabla 7. Resultados ensayo punto de ablandamiento..... | 101 |
| Tabla 8. Resultados ensayos ductilidad..... | 101 |
| Tabla 9. Resultados ensayo densidad..... | 102 |
| Tabla 10. Resultados ensayos de granulometría..... | 102 |
| Tabla 11. Resultados ensayo de densidad relativa..... | 103 |
| Tabla 12. Resultados ensayo 1 viscosidad 0% P.V.C. | 103 |
| Tabla 13. Resultados ensayo 2. Viscosidad 0% P.V.C..... | 104 |
| Tabla 14. Resultados ensayo 3. Viscosidad 0% P.V.C..... | 105 |
| Tabla 15. Resultados ensayo 1. Viscosidad 5% P.V.C..... | 106 |
| Tabla 16. Resultado ensayo 2. Viscosidad 5% P.V.C..... | 106 |
| Tabla 17. Resultado ensayo 3. Viscosidad 5% P.V.C..... | 107 |
| Tabla 18. Resultado ensayo 1. Viscosidad 10% P.V.C..... | 108 |
| Tabla 19. Resultado ensayo 2. Viscosidad 10% P.V.C..... | 108 |
| Tabla 20. Resultado ensayo 3. Viscosidad 10% P.V.C..... | 109 |
| Tabla 21. Resultado ensayo 1. Viscosidad 15% P.V.C..... | 110 |
| Tabla 22. Resultado ensayo 2. Viscosidad 15% P.V.C..... | 110 |
| Tabla 23. Resultado ensayo 3. Viscosidad 15% P.V.C..... | 111 |
| Tabla 24. Resultado ensayo 1. Viscosidad 20% P.V.C..... | 112 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 25. Resultado ensayo 2. Viscosidad 20% P.V.C..... | 112 |
| Tabla 26. Resultado ensayo 3. Viscosidad 20% P.V.C..... | 113 |
| Tabla 27. Clasificación del cemento asfáltico | 114 |
| Tabla 28. Resultados Granulometría | 115 |
| Tabla 29. Datos viscosidad cemento asfáltico sin modificar. | 116 |
| Tabla 30. Datos viscosidad cemento asfáltico con 5% P.V.C..... | 118 |
| Tabla 31. Datos viscosidad cemento asfáltico con 10% P.V.C..... | 121 |
| Tabla 32. Datos viscosidad cemento asfáltico con 15% P.V.C..... | 124 |
| Tabla 33. Datos viscosidad cemento asfáltico con 20% P.V.C..... | 127 |
| Tabla 34. Viscosidades a 80°C | 137 |
| Tabla 35. Viscosidades a 90°C | 137 |
| Tabla 36. Viscosidades a 100°C | 138 |
| Tabla 37. Viscosidades a 110°C | 138 |
| Tabla 38. Viscosidades a 120°C | 139 |

LISTA DE ANEXOS

Los anexos que se relacionan a continuación van adjuntos en un cd.

- ANEXO A. 0% P.V.C. ensayo 1
- ANEXO B. 0% P.V.C. ensayo 2
- ANEXO C. 0% P.V.C. ensayo 3
- ANEXO D. 5% P.V.C. ensayo 1
- ANEXO E. 5% P.V.C. ensayo 2
- ANEXO F. 5% P.V.C. ensayo 3
- ANEXO G. 10% P.V.C. ensayo 1
- ANEXO H. 10% P.V.C. ensayo 2
- ANEXO I. 10% P.V.C. ensayo 3
- ANEXO J. 15% P.V.C. ensayo 1
- ANEXO K. 15% P.V.C. ensayo 2
- ANEXO L. 15% P.V.C. ensayo 3
- ANEXO M. 20% P.V.C. ensayo 1
- ANEXO N. 20% P.V.C. ensayo 2
- ANEXO P. 20% P.V.C. ensayo 3

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE ENSAYOS DE VISCOSIDAD A CEMENTOS ASFÁLTICOS SIN MODIFICAR Y MODIFICADOS CON PVC EMPLEANDO EL VISCOSÍMETRO ROTACIONAL BROCKFIELD

AUTOR(ES): ANDRÉS FELIPE DÍAZ RUEDA

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Ing. JULIÁN ANDRÉ GALVIS FLÓREZ

RESUMEN

El cemento asfáltico es el material más utilizado para la elaboración de vías terrestres, este material se puede modificar con polímeros entre estos polímeros encontramos el P.V.C. en este trabajo de grado se modificó cemento asfáltico con P.V.C. para determinar en qué manera afecta este polímero la viscosidad del cemento asfáltico. La forma en la que se desarrolló el trabajo de grado fue primero caracterizando el cemento asfáltico utilizado, así como también se caracterizó el P.V.C. con el que se modificó el cemento asfáltico, mediante los ensayos de viscosidad realizados se logró determinar la curva reológica del cemento asfáltico sin modificar y modificado con P.V.C. en porcentajes de 5%, 10%, 15% Y 20%, a las temperaturas de 80°C, 90°C, 100°C 110°C y 120°C.

PALABRAS CLAVES:

Viscosidad, Cemento asfáltico, P.V.C., Curva reológica.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DETERMINATION AND ANALYSIS OF VISCOSITY TESTS TO UNCODIFIED AND MODIFIED ASPHALTIC CEMENTS WITH PVC USING THE BROCKFIELD ROTATIONAL VISCOSIMETER

AUTHOR(S): ANDRÉS FELIPE DÍAZ RUEDA

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Ing. JULIAN ANDRÉ GALVIS FLOREZ

ABSTRACT

Asphalt cement is the most used material for the development of land routes, this material can be modified with polymers among these polymers we find the P.V.C. In this work of degree modified asphaltic cement with P.V.C. To determine how the viscosity of the asphalt cement affects this polymer. The way in which grade work was developed was first characterizing the asphalt cement used, as well as the P.V.C. With which the asphaltic cement was modified, by means of the realized tests of viscosity it was possible to determine the rheological curve of the asphalt cement unmodified and modified with P.V.C. In percentages of 5%, 10%, 15% and 20%, at temperatures of 80 ° C, 90 ° C, 100 ° C 110 ° C and 120 ° C.

KEYWORDS:

Viscosity, Asphalt cement, P.V.C., Rheological curve

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

En la elaboración de vías terrestres el material utilizado principalmente es el asfalto el cual se encuentra compuesto por cemento asfáltico y material mineral, el cemento asfáltico tiene propiedades las cuales los ingenieros civiles cuantifican mediante ensayos de laboratorio permitiéndoles así determinar cuál será el comportamiento de determinado cemento asfáltico cuando sea utilizado en una vía, así como se determinan estas propiedades también se pueden agregar elementos para modificar estas propiedades entre estos modificadores se encuentra el P.V.C. el cual es un polímero muy resistente a solventes y utilizado muy común mente en estaciones de servicio y aeropuertos, el principal interés de este trabajo de grado es determinar la manera en que la viscosidad del cemento asfáltico se ve afectada por el P.V.C. determinando la curva reológica de varios tipos de cementos asfálticos modificados con P.V.C.

En este trabajo de grado se estudió el comportamiento del cemento asfáltico, para esto se caracterizaron las anteriores propiedades permitiendo clasificarlo. Así como también se caracterizó el P.V.C. Una vez conocido el tipo de cemento asfáltico, este se modificó con varios porcentajes de P.V.C. para posteriormente iniciar la realización de los ensayos de viscosidad con diferentes temperaturas con el fin de determinar de qué manera la influencia de la temperatura y porcentaje de P.V.C. altera la propiedad de viscosidad en el cemento asfáltico. Obteniéndose así la curva reológica de cada uno de los tipos de cemento asfáltico del trabajo de grado.

1. GENERALIDADES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad los proyectos viales están en una constante búsqueda de materiales nuevos o la forma de modificar materiales convencionales, con el objetivo de mejorar sus propiedades como las propiedades de resistencia y durabilidad. Este proceso investigativo repercute en la calidad de la infraestructura vial producida debido a que una vía con mayor resistencia, durabilidad y menor desgaste se traduce en una vía más segura con menos accidentes viales, menores costos de mantenimiento y periodos de diseño mayores o iguales a los periodos de servicio.

En la industria de la construcción vial en Colombia se está utilizando cemento asfáltico modificado, principalmente con polímeros, estos se utilizan ya que le confieren una serie de ventajas a comparación del cemento asfáltico convencional. La capacidad de producir cemento asfáltico modificado en una de las principales empresas del país es de 420 toneladas por día con lo que se puede llegar a la conclusión que es una tecnología que tiene un nivel de desarrollo avanzando en la región.¹

Al modificar un cemento asfáltico dependiendo del material con el que se modifique cambiaran sus propiedades. Actualmente existen 12 tipos diferentes de polímeros entre estos el P.V.C. El P.V.C. es un material el cual $\frac{3}{4}$ de su producción mundial es destinada a la industria de la construcción y también representa el 1% del desecho global de los hogares.

¹ DINERO.COM COPYRIGHT©2010 PUBLICACIONES SEMANA S.A. Nuevas tecnologías para los asfaltos del país. DINERO. 2013

Teniendo en cuenta que la modificación con polímeros es una tecnología utilizada actualmente en Colombia el objetivo de este trabajo de grado es profundizar en la propiedad de viscosidad que este material modifica al cemento asfáltico mediante ensayos del laboratorio.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El progreso de la industria de construcción vial trae consigo el cambio en los materiales utilizados y algunas modificaciones en estos, como por ejemplo los cementos asfálticos, los cuales pueden ser modificados dependiendo de qué comportamiento desea que tenga el asfalto.

Los polímeros como el P.V.C. son ampliamente utilizados para la modificación del cemento asfáltico entre las características que se pueden ver alteradas en un cemento asfáltico modificado es la viscosidad por lo que se desea conocer si este polímero modifica esta característica y determinar la manera en que esta se ve afectada.

La realización de este trabajo de grado es importante por su valor teórico ya que generará conocimiento y se podrá verificar la teoría planteada en los textos de Ingeniería de pavimentos para carreteras, en cuanto a que el cemento asfáltico aumenta su viscosidad con relación al porcentaje de P.V.C.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL.

- Caracterizar la propiedad de viscosidad que tiene un asfalto inalterado y comparar dicha propiedad con un asfalto modificado con P.V.C.

2.2 OBJETIVOS SECUNDARIOS:

- Realizar la caracterización del cemento asfáltico inalterado a utilizar mediante la aplicación de ensayos de penetración, punto de chispa, punto de llama, ductilidad y peso unitario.
- Realizar la caracterización del P.V.C en polvo mediante ensayos de granulometría y peso específico.
- Lograr determinar la viscosidad de este cemento asfáltico modificado y sin modificar con diferentes temperaturas.
- Modificar un cemento asfáltico adicionándole Policloruro de vinilo en polvo y caracterizar el material con el que se planea trabajar con ensayos de granulometría, peso unitario e información sobre su procedencia.
- Realizar un análisis de los resultados y comparación de la viscosidad a diferentes temperaturas.

3. ALCANCE

En la elaboración de este trabajo de grado se realizaron un total de 15 muestras de cemento asfáltico, tres (3) de estas muestras fueron elaboradas con cemento asfáltico sin modificar, los porcentajes con los que se modificaron las demás muestras son 5%, 10%, 15% y 20% de P.V.C. con lo que para cada porcentaje se realizaron tres (3) muestras de cemento asfáltico.

Se realizó la caracterización de los materiales con los que se trabajó, entre estos el cemento asfáltico al que se le realizaron ensayos de penetración, punto de ignición y de llama, punto de ablandamiento, ductilidad y determinación de la densidad. Una vez caracterizado el cemento asfáltico se realizó la caracterización del P.V.C. al que se le realizaron ensayos de granulometría y peso específico.

Se realizaron 15 ensayos de viscosidad mediante el viscosímetro rotacional Brookfield, en cada uno de estos ensayos se determinó la viscosidad del cemento asfáltico a diferentes temperaturas, las temperaturas utilizadas en el proyecto fueron de 80°C, 90°C, 100°C, 110°C y 120°C, en cada temperatura se tomaron tres (3) datos y teniendo en cuenta la cantidad de ensayos realizados se obtuvieron 15 datos. Un total de 45 datos para cada tipo de muestra y un total de 225 datos para la elaboración del trabajo de grado estos datos se graficaron elaborándose así un total de cinco (5) curvas reológicas y se compararon para determinar cómo influye el P.V.C. en polvo en la viscosidad del cemento asfáltico a diferentes temperaturas.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 PAVIMENTOS

Un pavimento es una estructura que está conformada por un conjunto de capas que se encuentran superpuestas y son colocadas de forma relativamente horizontal, estas capas son diseñadas y construidas de manera técnica con materiales debidamente seleccionados y compactados, estas estructuras estratificadas son apoyadas en la subrasante de la vía.

La subrasante es obtenida gracias al movimiento de tierra por un proceso de exploración, la finalidad de estas estructuras es que resistan adecuadamente los esfuerzos aplicados por los vehículos que transitan y transmiten cargas repetidamente en el periodo para el que fue diseñada.²

4.1.1 Función del pavimento. El pavimento es una estructura que se encuentra apoyada sobre una fundación apropiada y tiene una finalidad principal de poder proveer de una superficie donde se permita el rodamiento, esta infraestructura debe permitir un tráfico seguro y cómodo de vehículos, con velocidades de operación debidamente diseñadas para permitir su uso en cualquier condición meteorológica, en la actualidad existen varios tipos de pavimentos que pueden ser provechosos dependiendo el tipo de tráfico que se espera que transite y el volumen de tráfico.

En un proyecto vial la construcción, el mantenimiento y la gerencia son los objetivos de la ingeniería de pavimentos de tal forma que estas funciones sean desarrolladas

² Fonseca, A. M. Ingeniería de pavimentos fundamentos, estudios basicos y diseño. Bogota: Universidad catolica de Colombia ediciones y publicaciones. 2002

con un costo inferior para la comunidad que la utilizara mejore así su calidad de vida.

Las desventajas de tener una vía o camino sin pavimentar son que aumentan las condiciones de funcionamiento precario en la vía, esto genera una limitación en las velocidades con las que se puede utilizar la vía y también genera limitaciones en las cargas de los vehículos que la transitan lo cual eleva los costos operacionales de mantenimiento y combustible en los vehículos que son usuarios.³

4.1.2 Características de un pavimento. Para que un pavimento sea considerado funcional debe cumplir con las siguientes características.

- Tener la capacidad de resistir la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- Tener la capacidad de resistir a los agentes de meteorización (procesos climáticos, biológicos, etc.).
- Tener un índice IRI (índice de rugosidad internacional) adaptado a las velocidades de circulación de los vehículos, lo cual tiene una influencia muy importante en la seguridad vial, esta rugosidad debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de llantas de vehículos con la misma vía.
- Se debe presentar una regularidad superficial en dirección tanto como longitudinal y transversal para tener confort en función de la longitud de onda de las deformaciones y de la velocidad con la que circulan los vehículos.
- Debe tener una durabilidad considerable.
- Tener un diseño de drenaje que no permita empozoamiento de aguas lluvias en la vía.
- Tener en cuenta que la contaminación auditiva tanto en el interior del vehículo como a su exterior debe ser moderada.

³Universidad Mayor de San Simón facultad de ciencia y tecnología. Pavimentos texto guía. Cochabamba: Universidad Mayor de San Simón. 2004

- El proyecto debe ser económico.
- El color del asfalto debe ser el correcto para evitar deslumbramientos y reflejos lo que puede llevar a disminuir la seguridad en la vía.

4.1.3 Tipos de pavimentos

Pavimentos asfálticos

- Flexible:

Es un pavimento que se encuentra constituido por una capa de rodadura que debe ser consistente y en un tratamiento o mezcla de materiales asfálticos y granulares los cuales construyen sobre una capa de base granular y una capa de subbase.

- Semirrígidos:

Si la capa que normalmente es de tipo granular se reemplaza por una de un material estabilizado se denomina pavimento semirrígido.

Pavimentos rígidos

- Concreto simple con juntas:

Es un pavimento en el que las juntas se utilizan para controlar las grietas previsibles, este pavimento no contiene acero de refuerzo, pero puede llevar varillas lisas en las juntas transversales y varillas corrugadas en las juntas longitudinales, su espaciamiento entre juntas oscila entre 4.5m y 7.5m.

- Concreto reforzado con juntas:

La longitud de las losas es entre 7.5m y 15m por esta razón necesitan acero de refuerzo y normalmente la cantidad de acero utilizado es de 0.1% y 0.2% en relación al concreto.

- Concreto con refuerzo continuo:

Este pavimento no utiliza juntas transversales de contracción y contiene cuantías de acero generalmente entre un 0.5% y 0.8% del área transversal de pavimento.

- Concreto con refuerzo estructural:

En estos pavimentos el acero asume las tensiones de tracción y compresión de manera que se puede llegar a reducir el espesor de las losas, se utiliza en pisos industriales donde las losas deben resistir cargas de mayor magnitud y las dimensiones de las losas son similares a las de los pavimentos en concreto simple y el acero no debe atravesar la junta transversal para evitar la aparición de fisuras.

Pavimentos articulados

Estos son pavimentos cuya capa de rodadura es un conjunto de bloques pequeños que se ensamblan de manera que logren formar una superficie continua, los cuales se apoyan en una capa de arena la cual se encuentra apoyada sobre una capa de base granular o estabilizada y sobre una capa de sub-base, el nombre de estos pavimentos articulados está condicionado por el material que se va a usar para su fabricación como adoquines de concreto o de arcilla.⁴

- Adoquines de concreto
- Adoquines de arcilla
- Otros

4.1.4 Partes de un pavimento flexible. La capa superior de los pavimentos flexibles se le conoce como carpeta de rodadura, apoyada sobre dos capas llamadas base y sub-base. Estas se apoyan sobre un terreno conocido como la sub-rasante a la cual llega una mínima parte de la carga vehicular.

⁴Sabogal, F. S. Introducción al diseño de pavimentos. Obtenido de copernico escuelaing: Disponible en: http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/CONTENIDO%20CURSO.pdf

- Carpeta de rodadura

Esta proporciona una superficie estable antideslizante y uniforme esto se puede traducir en confort para los usuarios de la vía. Esta capa soporta la mayor parte de las cargas vehiculares y efectos meteorológicos como las lluvias y exceso de radiación solar funciona también como capa impermeabilizante.

- Base

La función principal de la base es resistir los esfuerzos inducidos por vehículos y poder dar soporte homogéneo a la carpeta de rodadura, permitiendo transferir a las capas inferiores que la soportan (sub-base y sub-rasante) una mínima porción de la carga.

- Sub-base granular

Esta capa es construida con materiales más económicos que los de la base o carpeta de rodadura, es común que los espesores de las capas anteriores sean menores y también homogeniza la transferencia de la carga a la subrasante.

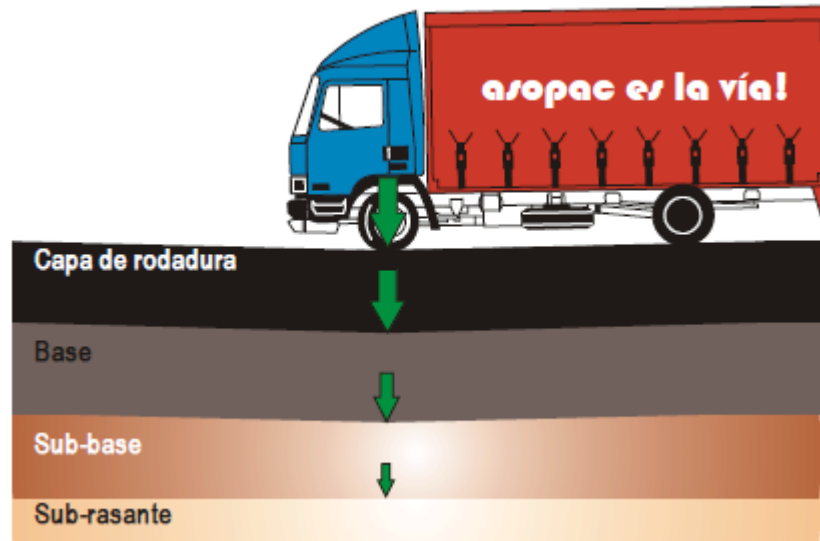
- Subrasante

Esta es la capa que soporta el pavimento. Las técnicas de estabilización del suelo buscan mejorar las características del terreno pues de estas características dependerá en gran parte el espesor total del pavimento. Un suelo se puede mejorar por medios mecánicos gracias a la compactación o con productos químicos diseñados para ese fin como la cal o el cemento.⁵

⁵ Asopac. Cartilla del pavimento asfáltico. Asociación de productores y pavimentadores asfálticos de Colombia, 8-9. 2004

En la Figura 1. Se muestra las partes del pavimento flexible trabajando en conjunto.

Figura 1. Componentes del pavimento flexible



Fuente: Asopac. Cartilla del pavimento asfáltico. Asociación de productores y pavimentadores asfálticos de Colombia.2004. Pág. 8-9

4.2 MATERIALES BITUMINOSOS

Los materiales bituminosos son de color negro y comúnmente se encuentran en un estado entre sólido y líquido viscoso, son dúctiles y la temperatura afecta su dureza de tal forma que el mismo material bituminoso será más duro en un ambiente con una temperatura más baja, el origen de este material es en los crudos petrolíferos y también pueden obtenerse gracias a la destilación de sustancias de origen carbonoso.

El betún se considera uno de los materiales más antiguos utilizados por los humanos para la construcción, sus primeros usos fueron en la antigua Mesopotamia

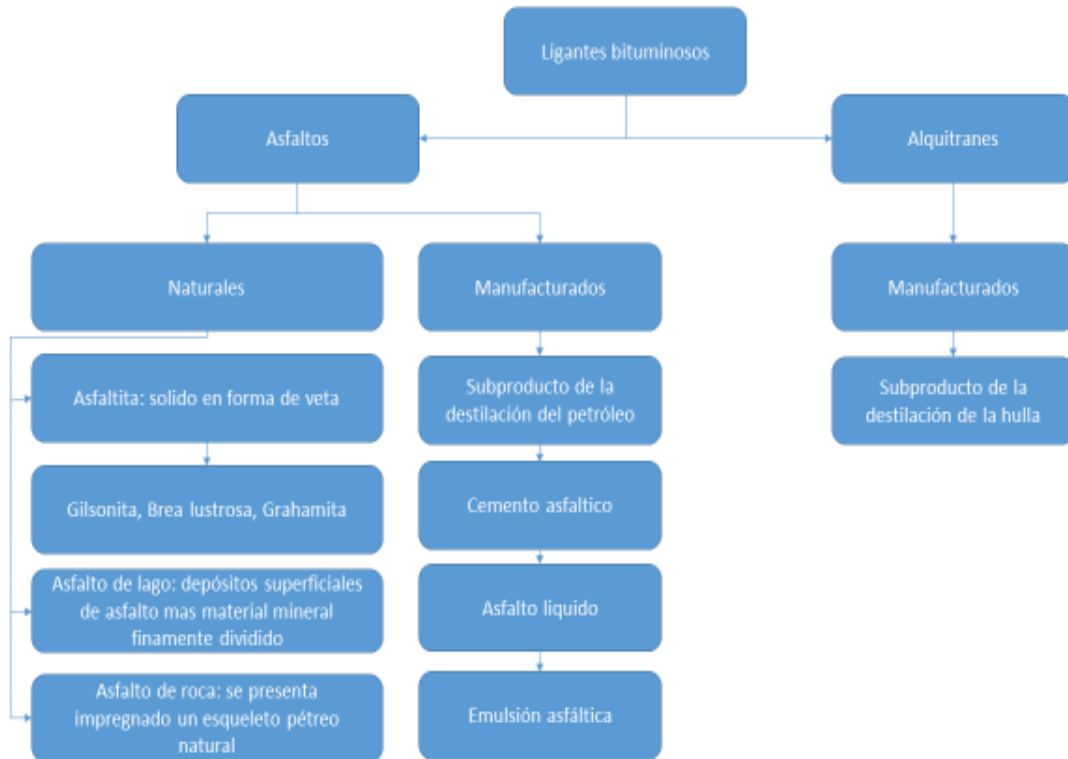
y en el valle del Indo (3.800 a. de c.) se utilizaba como material aglomerante en la construcción de viviendas, de caminos, impermeabilización de estanques y también en depósitos de agua.

Cuando se empezó con el uso de estos materiales el más común era el betún natural pero actualmente esto se ha visto reducido a tal punto que hoy en día casi la totalidad de los productos bituminosos utilizados en construcción vienen de la destilación del petróleo.⁶

4.2.1 Tipos de materiales bituminosos. En la Figura 2. se puede observar la organización de los materiales bituminosos utilizados como ligantes.

⁶ Otero, A. V. Universidad de Salamanca. Obtenido de Escuela Politecnica Superior de Ávila: Disponible en: <http://ocw.usal.es/enseñanzas-tecnicas/ciencia-y-tecnologia-de-los-materiales/contenido/TEMA%207-%20MATERIALES%20BITUMINOSOS.pdf>

Figura 2. Clasificación de ligantes bituminosos



Fuente: Sabogal, F. S. Pavimentos, Tomo 1 Fundamentos teóricos guías para el diseño. Bogotá: Universidad La Gran Colombia, Universidad Javeriana. 1984

4.2.1.1 Alquitrán: El alquitrán es un producto líquido o semisólido el cual se obtiene por destilación, en ausencia de aire y en ausencia de sustancias orgánicas que puedan poseer materias volátiles. El alquitrán más utilizado en los procesos de construcción es el de hulla obtenido como sub-producto de las fábricas de gas. El alquitrán debe ser clasificado también del material del que procede como por ejemplo la hulla, esquistos, madera, etc. Se denomina brea al residuo fusible de consistencia sólida o semisólida y un color entre negro y marrón oscuro la brea queda después de la destilación fraccionada de los derivados del alquitrán o del alquitrán puro.

El alquitrán es obtenido como un sub-producto normalmente de calentar carbón vegetal lo cual hace que se desprendan los hidrocarburos obteniendo así gas. El gas es transportado por unas tuberías en las cuales se acumula un residuo conocido como alquitrán bruto el cual es sometido a un proceso de destilación para separar algunos aceites de una finura variable lo cual al final deja como resultado brea.⁷

4.2.1.2 Betún: Es el resultado de la mezcla de hidrocarburos naturales también conocidos como pirogenados los cuales han sido sometidos a tratamientos de calor. Pueden ser gaseosos sólidos, semi-sólidos y líquidos, son solubles en sulfuro de carbono. Existen de procedencia natural y artificial, los betunes de origen natural son líquidos viscosos o compuestos sólidos que se encuentran constituidos por una mezcla entre los hidrocarburos y sus derivados que no sean de origen metálico, los betunes naturales también se conocen por el nombre de betunes nativos. Los betunes artificiales se obtienen por medio de procesos como la oxidación, cracking o destilación.

Betún Artificial

Es obtenido a partir del petróleo después de un proceso de destilación fraccionada a temperatura ambiente, donde se recogen aceites ligeros y éteres, donde luego se pasa a otro proceso de destilación fraccionada en caliente y con vacío para poder obtener así los aceites pesados y las grasas sin que se produzca cracking el cual se origina en temperaturas más altas.

Betún Natural

Se encuentra en la naturaleza en algunos casos hasta formando lagos y mezclados con arenas o arcillas y también impregnado en las rocas son poco abundantes y la extracción de estos no es de interés. El origen de este tipo de betún es cuando el petróleo sube a la superficie por medio de fisuras y se ha depositado allí, con el

⁷Ibid.

pasar del tiempo los componentes más ligeros se evaporan quedando solo componentes de alta viscosidad. Si se produce una mezcla entre betunes artificiales y naturales se confiere una mejora en las características de resistencia y durabilidad. Cuando este material impregna rocas se les conoce como rocas asfálticas y fue el primer material bituminoso que ha sido usado en pavimentación.⁸

4.3 CEMENTO ASFÁLTICO

Los materiales bituminosos como el betún poseen unas características que lo convierten en el material ideal para su uso en la pavimentación por su cohesión y adhesión con materiales de tipo granular, también el hecho de que a temperaturas altas sea líquido brinda un mayor manejo del material para poder recubrir el agregado durante la fabricación de la mezcla asfáltica en caliente. El comportamiento del asfalto se ve modificado por la temperatura y el tiempo en el que se le aplica una carga, por esto se debe seleccionar el tipo de asfalto más conveniente dependiendo del clima de la zona donde se colocara.⁹

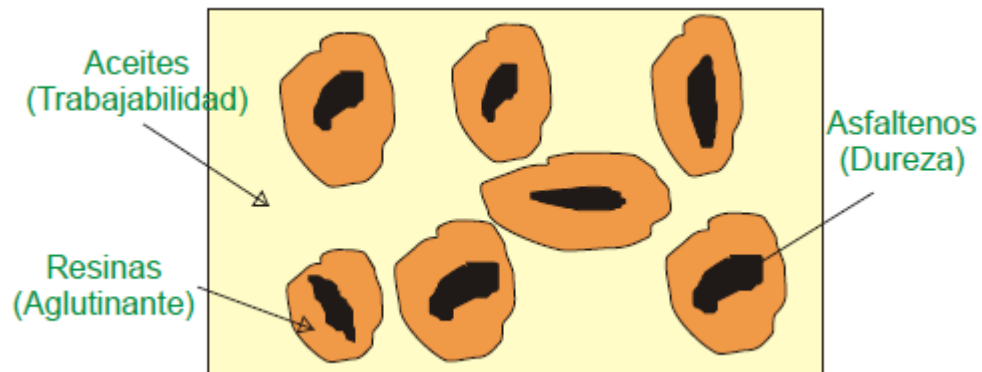
4.3.1 Propiedades del cemento asfáltico. El cemento asfáltico es un material con el que se tiene un interés por sus características aglomerantes y resistencia, es altamente impermeable, duradero y adhesivo. Es una sustancia de consistencia plástica que le otorga una flexibilidad controlable a las mezclas con las que se combina normalmente. Es altamente resistente a la mayor parte de ácidos, alcalinos y sales. Aunque es una sustancia semi-sólida es posible licuarla por aplicación de calor o por acción de disolventes o también por medio de la emulsificación.

⁸ Ibid.

⁹ Asopac. Op. Cit.

4.3.2 Composición química del cemento asfáltico. El asfalto se encuentra compuesto por resinas, aromáticos, asfáltenos y saturados. Los asfáltenos son los que le proporcionan la dureza al asfalto, los aromáticos y saturados son aceites que se encargan de darle consistencia para que sean trabajables y las resinas son las que aglutinan a los asfáltenos. A continuación, en la Figura 3. se ilustrará una imagen de la composición química del asfalto.¹⁰

Figura 3. Composición química del cemento asfáltico



Fuente: Asopac. Cartilla del pavimento asfáltico. Asociación de productores y pavimentadores asfálticos de Colombia.2004. Pág. 11

4.4 ASFALTOS MODIFICADOS CON POLÍMEROS.

Existen factores que van gastando el pavimento como el clima, tránsito, aumento de las cargas por eje, presión de inflado de las llantas, mayores velocidades y otros factores, estos en conjunto en algunas ocasiones hacen necesario que los pavimentos se comporten de una forma diferente modificando las características mecánicas del asfalto como la reducción de susceptibilidad térmica, en algunos

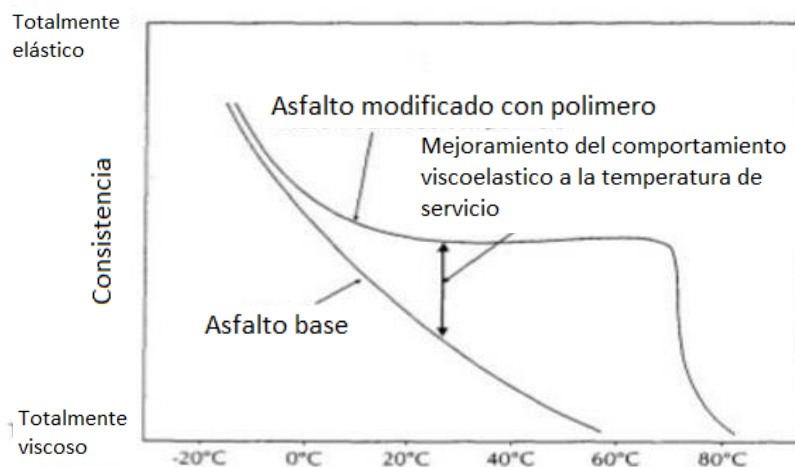
¹⁰ Ibid.

casos disminuir la rigidez (clima frío, inferior a 15°C) o aumentarla (clima cálido, Superior a 15°C).

4.4.1 Ventajas de los cementos asfálticos modificados con polímeros. El cemento asfáltico modificado con polímeros tiene una serie de ventajas entre las cuales está el que se reduzca la cantidad de ruido producida entre la carpeta de rodadura y el vehículo, tiene una alta resistencia al envejecimiento y a los cambios de temperatura, es altamente impermeable y flexible además aumenta la vida útil del pavimento y la inversión en mantenimiento es relativamente menor.¹¹

A continuación, se mostrará una gráfica, la Figura 4. de cómo se comporta un asfalto sin modificar comparando su consistencia con la de uno modificado con polímeros y variando la temperatura.¹²

Figura 4. Asfalto modificado y sin modificar con polímeros y su Consistencia



Fuente: Figura tomada del libro Ingeniería DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS, Alfonso Montejo Fonseca Bogotá Colombia, segunda edición 2002, capítulo 12 asfaltos modificados, figura 12.1.

¹¹ Palencia, V. Nuevas tecnologías para los asfaltos del país. Dinero. 2013

¹² Fonseca, Op. Cit.

Las mejoras obtenidas al modificar los asfaltos con diferentes clases de polímeros: En la Tabla 1. Se encuentran las ventajas que brindan los polímeros al cemento asfáltico

Tabla 1. Polímeros y características que brindan al cemento asfáltico.

| Tabla 12.2. | | | | | |
|------------------------|------------------------|---------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------|
| Polímero | Resistencia | | Adhesión de los agregados | Resistencia al envejecimiento | Incremento del costo |
| | Deformación permanente | Agrietamiento | | | |
| Termoendurecibles | +++ | ++ | + | + | Muy alto |
| Blastómeros | ++ | ++ | + | + | Medio alto |
| Plastómeros | + | 0 | 0 | 0 | Medio |
| Caucho de llanta usada | 0/1 | + | 0 | 0 | Medio |
| +++ | Muy efectivo | | | | |
| ++ | Mejora sustancial | | | | |
| + | Mejora significativa | | | | |
| 0 | Poca o ninguna mejora | | | | |

Fuente: Ingeniería de pavimentos para carreteras, Alfonso Montejó Fonseca, 2002, capítulo 12, tabla 12.2.

Para la caracterización de los asfaltos modificados con polímeros existen los siguientes ensayos: ensayos de identificación y composición, ensayos de compatibilidad, ensayos para la determinación de la estabilidad al almacenamiento, ensayo de comportamiento reológico y susceptibilidad a la temperatura.

La viscosidad del asfalto se puede caracterizar empleando un viscosímetro rotacional: es un método para medir la viscosidad de un asfalto donde se utiliza una temperatura constante y es aplicado un par de torsión el cual es el requerido para mantener rotando a velocidad constante un vástago cilíndrico el cual se encuentra

sumergido en la muestra esto permite conocer la resistencia relativa a la rotación y la viscosidad se calcula mediante los valores de torque y velocidad de rotación.¹³

4.5 P.V.C.

El polivinilo de cloruro o mejor conocido como P.V.C. es un material comúnmente blanco que empieza a ablandecerse a los 80°C y a la temperatura de 140°C se descompone, este material es un polímero por adición y también es una resina resultante del proceso de polimerización del cloruro de vinilo o cloroetano, de una resistencia buena a la llama y electricidad.¹⁴

4.5.1 Origen del P.V.C. El P.V.C. es uno de los materiales sintéticos con mayor antigüedad y una larga historia de producción industrial. El P.V.C. fue descubierto al menos en dos ocasiones en el siglo XIX la primera en 1838, por el físico y químico Henri Víctor Regnault y la segunda vez en 1872 por el científico de origen alemán Eugene Baumann, en las dos ocasiones fue producido en frascos con gas de cloruro de vinilo exponiéndolo a luz solar. El inventor alemán Friedrich Heinrich August Klatte fue el primer científico en patentar un método para la producción de P.V.C. utilizando la polimerización de cloruro de vinilo.

Un avance significativo fue gracias al científico industrial Waldo Seamon por desarrollar un sustituto sintético para el caucho natural que cada vez era más costoso. Durante la recesión este material estuvo a punto de ser abandonado hasta que Waldo Seamon lo promociono como un revestimiento resistente al agua y posteriormente fue utilizado en la segunda guerra mundial como aislante para el cableado de instalaciones militares.

¹³ Ibid

¹⁴ Titow, M. PVC Technology. Elsevier applied science publishers. 2011

En la década de 1950 la producción de P.V.C. aumento en todo el mundo y con ella las investigaciones para mejorarlo en características como su durabilidad, a mediados del siglo XX los productos hechos en P.V.C. se volvieron esenciales para la industria de construcción, la resistencia de este plástico a la luz del sol, productos químicos y corrosión lo convirtieron en la mejor opción.

Hoy en día es el tercer plástico que más se vende por sus características de durabilidad, capacidad y procesamiento lo convierten en un material muy usado en industrias como la salud, Transporte y construcción.¹⁵

4.5.2 Propiedades físicas del P.V.C. El P.V.C. tiene una estructura amorfa con átomos de cloro polares en la estructura de la molécula. Aun cuando parece un plástico ordinario este material tiene características muy diferentes en cuanto a rendimiento y funciones.

El P.V.C. cuenta con una estabilidad química alta y propiedades retardantes de fuego, durabilidad y resistencia química. La temperatura de ignición del P.V.C. es de 455°C lo que lo convierte en un material con menor riesgo de incidentes relacionados con el fuego porque este no se enciende fácilmente, adicionalmente el calor liberado en un incendio es considerablemente más bajo si hay P.V.C en comparación al Polietileno y Polipropileno Lo cual lo hace un material idóneo para estar cerca de la vida cotidiana de la gente.

Para la durabilidad uno de los factores que más influyen es la oxidación por oxígeno atmosférico. Donde el P.V.C. es altamente resistente y mantiene su rendimiento por un largo tiempo, estudios de tuberías de P.V.C. en subterráneos con 35 años de uso en Japón demostraron que el material no mostraba deterioro y tenía la misma resistencia que una tubería nueva. El científico Jahre Erfahrungen demostró en

¹⁵ The European Council of Vinyl Manufacturers. PVC. 14 de 08 de 2014

1995 que una tubería enterrada por 60 años y con un uso activo aún se encontraba en perfectas condiciones calculando una vida útil de al menos 50 años para este material. La forma para disminuir el tiempo de descomposición química es aplicándole más calor a el material.

El P.V.C. tiene la capacidad de resistir ácidos, álcalis y sales de origen inorgánico, aunque el P.V.C. se disuelve en hidrocarburos aromáticos, cetona y éteres cíclicos. Es difícil disolver en otros disolventes orgánicos, utilizando esta ventaja es fabricado para conductos de gases de escape, planchas de construcción, botellas tubos y mangueras.

Por ser el P.V.C un material químicamente estable muestra poco cambio en su estructura molecular y en su resistencia mecánica. Aun así, es un material visco elásticos lo que quiere decir que puede llegar a deformarse por la aplicación de fuerza exterior incluso si esta fuerza es por debajo de su límite de su punto de fluencia, a esto se le conoce como deformación progresiva. En la década de 1930 se pensaba que la vida útil del P.V.C podría ser de hasta 50 años, pero con las técnicas modernas de fabricación pueda llegar a durar hasta 100 años.¹⁶

El P.V.C. tiene grupos polares (cloro), y es amorfo por lo que se mezcla bien con otras sustancias en búsqueda de propiedades como la flexibilidad, elasticidad, resistencia al impacto, prevención del crecimiento microbiano, anti-niebla y retardantes de fuego. Se utiliza en aplicaciones decorativas, revestimiento de paredes, suelos, material de construcción, etc.¹⁷

¹⁶ Makino, T. PVC and environmental issues. journal of the Japan Society of Polymer Processing. 1998

¹⁷ The European Council of Vinyl Manufacturers. PVC. Vinylplus. Agosto 14 de 2014. Disponible en: <http://www.pvc.org/en/p/history>

4.5.3 Usos del P.V.C. en la industria de construcción. Hoy en día en la industria en la que más se utiliza el P.V.C. es en la industria de la construcción se calcula que $\frac{3}{4}$ del total de P.V.C. producido en el mundo es destinado para ser utilizado en la industria de la construcción. Por sus características de fuerza, resistencia a la humedad y a la abrasión es un material ideal para utilizar en revestimientos, ventanas, vallas, revestimientos de paredes, cubiertas y pisos.

El P.V.C. es usado en la producción de revestimiento de marcos de ventana y es extremadamente duradero y económico, permite conservar la energía cuando se calientan los hogares, al punto de que las ventanas de P.V.C. tienen tres (3) veces más aislamiento térmico que las ventanas de materiales metálicos como el aluminio.

El P.V.C se considera capaz de soportar las peores condiciones en la parte interna de una pared como la exposición a cambios de temperatura y de humedad permitiendo así una mayor vida útil para el edificio. Por esta razón es uno de los materiales más comunes y de mayor confiabilidad que se utiliza en el cableado eléctrico y cables en general.

El P.V.C. es capaz de conservar la energía y el agua mediante creación de tuberías sin fugas que no son propensas a la corrosión y son resistentes a la tensión medioambiental. Los estudios realizados revelan que los índices de rotura del P.V.C. son bajos, cerca del 1% en comparación con los índices de rotura de sistemas de metal fundido. La menor cantidad acumulada de sedimentos mejora su funcionalidad y aumenta la eficiencia de energía.¹⁸

¹⁸ American Chemistry Council. Disponible en: www.chemicalsafetyfacts.org. Obtenido de www.chemicalsafetyfacts.org/es/cloruro-de-polivinilo

4.5.4 El uso del P.V.C. en los asfaltos y cementos asfálticos. Los polímeros son sustancias que son formadas por la unión de miles de moléculas conocidas como monómeros. Entre los monómeros se encuentran los termo-plásticos y existe otra clasificación conocida como plastómeros, en esta clasificación se encuentra el P.V.C.

Al ser estirado se sobrepasa la tensión de fluencia, lo que no le permite regresar a su longitud original. Este material cuenta con deformaciones pseudoplásticas con una elasticidad baja, la actividad química del P.V.C. es baja pero cuando es mezclado con asfalto a 130°C este se gelifica obteniendo un ligante más viscoso que el original. Es una sustancia muy resistente a solventes y comúnmente utilizado para estaciones de servicio y aeropuertos, la recomendación de porcentaje a utilizar se encuentra entre el 2% y 6% y se considera un modificador de bajo costo.¹⁹

4.6 REOLOGÍA

4.6.1 ¿Qué es la Reología? Un fluido es aquella sustancia que no le es posible soportar un esfuerzo sin que esta se ponga en movimiento, con lo que se puede afirmar que la Reología es “la ciencia del flujo y la deformación” lo que quiere decir que es la rama de la física que estudia el comportamiento de los fluidos que están sometidos a diferentes tipos de esfuerzos, la reología y su campo de estudio se extiende por la mecánica de fluidos newtonianos y llega hasta el concepto de elasticidad de Hooke.

¹⁹ Sabogal, F. S. Introducción al diseño de pavimentos. Obtenido de copernico. Disponible en: [escuelaing:http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/CONTENIDO%20CURSO.pdf](http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/CONTENIDO%20CURSO.pdf)

Para los estudios se utilizan aparatos llamados reómetros, los cuales permiten cuantificar los parámetros inherentes al proceso y así obtener mediante graficas la relación entre el esfuerzo y el cizallamiento.²⁰

4.6.2 Las Propiedades reologicas en los asfaltos. Dos de los principales problemas que se presentan en los pavimentos asfálticos en servicio son la deformación permanente y la resistencia a la fatiga, consecuencia de la inadecuada dosificación ligante-agregado, sus interacciones, el método y la temperatura de colocación, mezclado y compactación.

Las propiedades más deseadas en los cementos asfálticos son la resistencia al desplazamiento, a la fatiga, al deslizamiento, a la deformación plástica, que sean impermeables, durables y resistencia de la mezcla asfáltica.

Los cementos asfálticos modificados son el producto concebido para superar las propiedades del asfalto original (las cuales depende de su contenido de asfáltenos, resinas y aceites) logrando mejorar el desempeño del pavimento a largo plazo, las principales propiedades que se busca modificar son la dependencia de la temperatura, endurecimiento por oxidación y la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica.

El asfalto se clasifica como un material visco elástico por que posee características tanto viscosas como elásticas, es decir el asfalto tiene un comportamiento intermedio entre los sólidos de Hooke(elástico) y el líquido de newton(viscoso). Si supera los 100 °C el elemento asfáltico se comporta como un fluido viscoso, pero si el asfalto es expuesto a temperaturas inferiores a 0 °C se comporta como un sólido elástico (un ejemplo sería una banda de goma) en su forma original lo que quiere

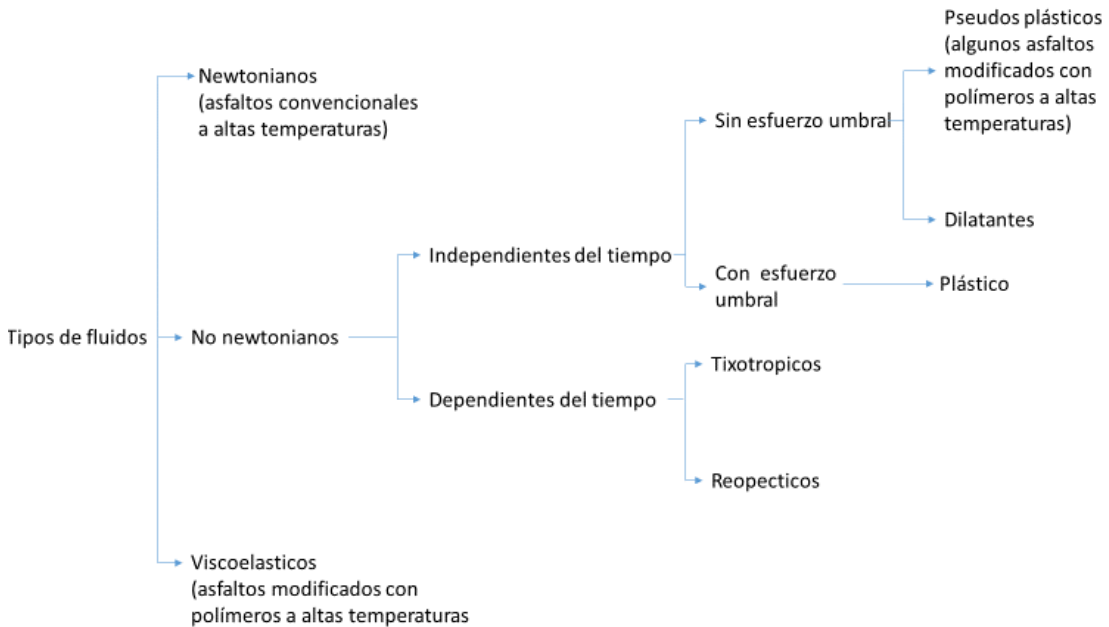
²⁰ G., O. R. Introduccion a la reologia. En O. R. G., Cuaderno Firp s520-b Merida: Universidad de los andes. Pág. 21. 1999

decir que en una temperatura intermedia el cemento asfáltico tiene características de fluido viscoso y solido elástico (asfalto instituto, 1995).

El viscosímetro rotacional consiste en un cilindro rotacional coaxial que tiene como función medir por medio de un torque requerido para hacer rotar un eje, este es sumergido en la muestra de asfalto permitiendo así determinar la curva geológica del asfalto y caracterizar así las propiedades visco elásticas de los cementos asfálticos.²¹

4.6.3 Tipos de fluidos. En la Figura 5. Se pueden observar los tipos de fluidos que existen y como es su categorización.

Figura 5. Tipos de fluidos.



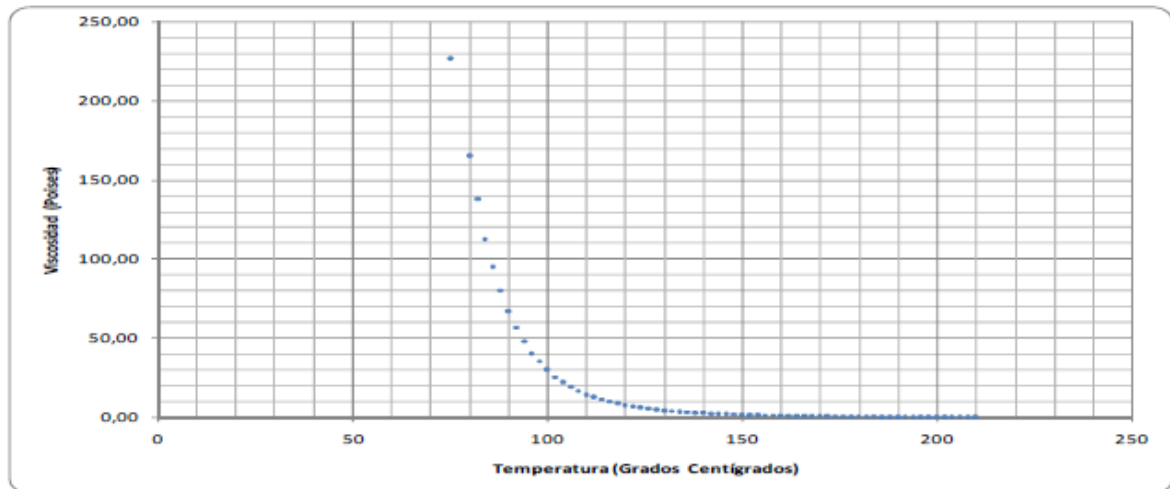
Fuente: Martina, G. E. *Reología de ligantes asfálticos mediante el viscosímetro Brookfield*. LEMac Centro de investigaciones viales. 2009

²¹ Cardenas, Jaleidy. E. F. Modelación del comportamiento reológico del asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura. EIA, 127. 2009

4.6.4 Curva reológica. La curva reológica es una gráfica que nos permite ver la relación entre la viscosidad de un fluido con la temperatura de este, este tipo de ensayos son realizados en el cemento asfáltico, para realizar esta medición se puede utilizar el viscosímetro rotacional brookfield el cual mediante un vástago mide el torque y de esta forma permite conocer la viscosidad a determinada temperatura, al realizarse a varias temperaturas, este ensayo permite elaborar la gráfica para poder tener una idea del comportamiento viscoso de dicho cemento asfáltico en un determinado rango de temperaturas.

A continuación se mostrará una gráfica para ilustrar como se ve una curva reológica en la Figura 6. elaborada con un cemento asfáltico sin alterar por la escuela de ingeniería de Antioquia.

Figura 6. Ilustración de curva reológica



Fuente: Cardenas, Jaleydy. E. F. Modelación del comportamiento reológico del asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura. *EIA*, 127. 2009

En la figura 6. Se puede observar los resultados de un ensayo de laboratorio real, donde realizaron varias medidas de viscosidad, se observa que utilizan Poises para medir la viscosidad lo cual equivale a uno (1) poise ($P \equiv 1 \cdot \text{g} \cdot (\text{s} \cdot \text{cm})^{-1}$) y para la medición de la temperatura se utilizaron grados centígrados, entre mayor sea la cantidad de datos utilizados para la elaboración de la curva reológica más fiable será. En el caso de la figura 6. Se midió la viscosidad cada variación de 2 °C entre el valor mínimo que fue 80 °C y el máximo que fue 200 °C. observando esta gráfica se puede comprender el comportamiento de la viscosidad la cual es mayor en la temperatura de 80 °C alcanzando aproximadamente 225 poises y su viscosidad mínima alcanzada a 200 °C donde su viscosidad de aproxima a 0 poises.

Los cementos asfálticos pueden pertenecer a tres (3) de los siete (7) tipos de fluidos existentes ver Figura 5. estos tipos de fluidos son Newtonianos para asfaltos convencionales a altas temperaturas, Visco elásticos para asfaltos modificados con polímeros a altas temperaturas y pseudoplasticas para algunos asfaltos modificados con polímeros a altas temperaturas. Dependiendo del tipo de fluido este tendrá un tipo diferente de curva reológica.²²

²² Cardenas. Op. Cit.

5. METODOLOGÍA

La metodología descrita a continuación se encuentra basada principalmente en las Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras del Invias 2013, así como también recomendaciones del director de proyecto.

Para la elaboración de este proyecto fue necesario seguir la metodología descrita a continuación:

1. Obtención de las materias primas para la realización del proyecto.
 - 1.1. Obtención del cemento asfáltico utilizado, este cemento asfáltico fue suministrado por la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.
 - 1.2. Obtención del material con el cual se modificó el cemento asfáltico, Policloruro de vinilo en polvo, este material fue suministrado por la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.
2. Para el inicio el proyecto fue necesario realizar una serie de ensayos de laboratorio descritos en el Manual del Invias para caracterización y determinación qué tipo de asfalto se utilizó. Los ensayos a realizados son los siguientes:
 - 2.1. Penetración de los materiales asfálticos (ensayo I.N.V. E – 706 – 13).
 - 2.2. Punto de ignición y de llama mediante la copa abierta Cleveland (ensayo I.N.V. E – 709 – 13).
 - 2.3. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos aparato de anillo y bola (ensayo I.N.V. E – 712 – 13).
 - 2.4. Ductilidad de los materiales asfálticos (ensayo de INV E – 702 – 13).
 - 2.5. Determinación de la densidad del cemento asfáltico.

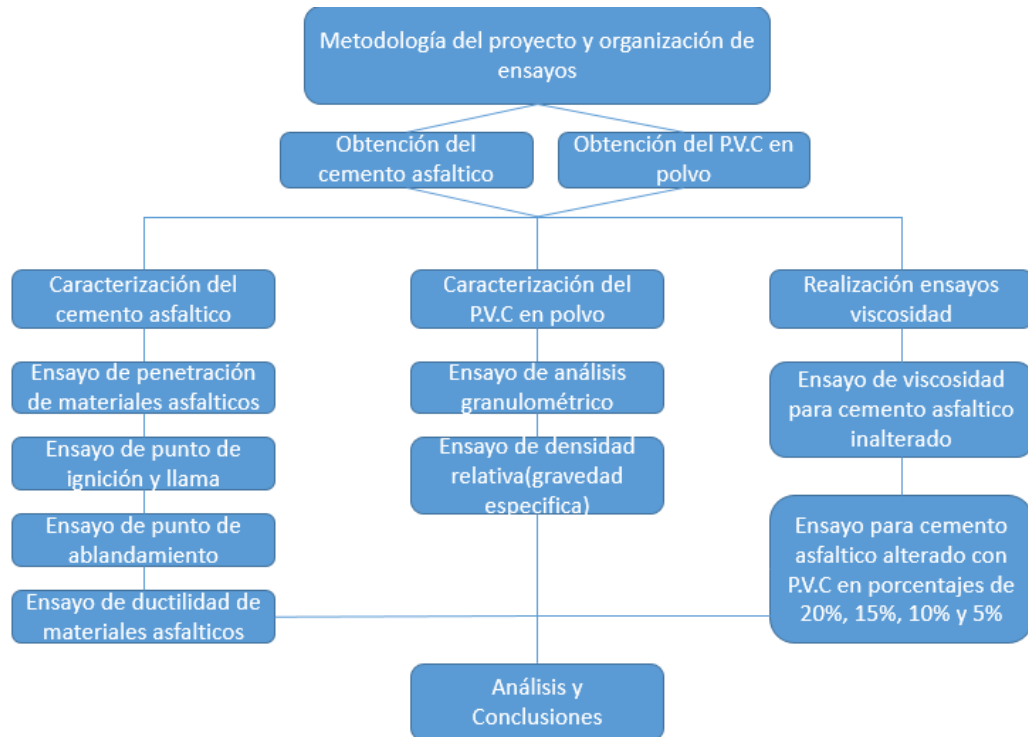
3. Una vez caracterizado el material asfáltico utilizado, se procedió a caracterizar el material con el que se modificó el cemento asfáltico en nuestro caso fue P.V.C en polvo.
 - 3.1. Se realizó el ensayo de análisis granulométrico de los agregados finos.
 - 3.2. Se realizó el ensayo de densidad relativa.

4. Una vez realizada la caracterización del material bituminoso y P.V.C con el que se trabajó se procedió a realizar los ensayos de viscosidad descritos a continuación:
 - 4.1. Se realizaron varios ensayos del Método para determinar la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional (ensayo I.N.V. E – 717 – 13), estos ensayos se realizaron con los porcentajes de P.V.C. de 20%, 15%, 10%, 5% y una muestra sin modificar para control, a cada una de las cinco muestras se realizaron los ensayos a temperaturas de 80°C, 90°C, 100°C, 110°C y 120 °C.

5. Una vez obtenidos los resultados de los ensayos de los ítems (4.) se analizaron los resultados obtenidos de la viscosidad de las muestras.

6. Para finalizar una vez obtenidos los datos de laboratorio y ya hayan sido analizados se podrá concluir cual fue el resultado del proyecto.

Figura 7. Diagrama de la metodología del proyecto



Fuente: Elaboración propia.

6. OBTENCIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO Y P.V.C. EN POLVO

El cemento asfáltico y el P.V.C. en polvo utilizado en este trabajo de grado fue suministrado por la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.

La ubicación del cemento asfáltico y P.V.C. en polvo era el almacén de materiales del laboratorio de pavimentos K-106 de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. El P.V.C. en polvo es distribuido por Mexichem Resinas Colombiana S.A. En la Fotografía 1. se puede observar el almacén de materiales y en la Fotografía 2. Se puede observar el barril del cemento asfáltico almacenado y en la Fotografía 3. Se observa la extracción del cemento asfáltico, en la Fotografía 4. Se observa el cemento asfáltico extraído.

FOTOGRAFÍA 1. ALMACÉN DE MATERIALES



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 2. BARRIL DE CEMENTO ASFÁLTICO ALMACENADO



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 3. EXTRACCIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO



Fuente: Elaboración propia

FOTOGRAFÍA 4. CEMENTO ASFÁLTICO EXTRAÍDO



Fuente: Elaboración propia.

El cemento asfáltico utilizado para el trabajo de grado se almacenó en un recipiente de aluminio como se puede observar en la Fotografía 5.

FOTOGRAFÍA 5. ALMACENAJE DEL CEMENTO ASFÁLTICO



Fuente: Elaboración propia.

7. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO DE ORIGEN BITUMINOSO

En la Fotografía 6. se encuentra una imagen de las muestras utilizadas para los cinco (5) ensayos de caracterización realizados al cemento asfáltico.

FOTOGRAFÍA 6. MUESTRAS CARACTERIZACIÓN CEMENTO ASFÁLTICO



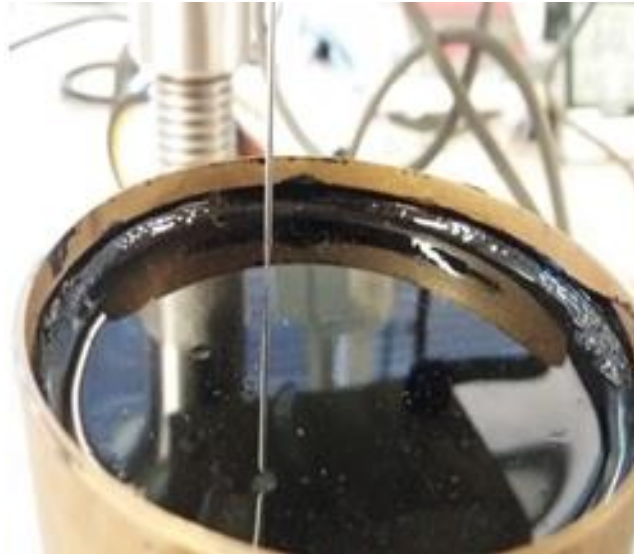
Fuente: Elaboración propia.

7.1 PENETRACIÓN DE LOS MATERIALES ASFÁLTICOS (ENSAYO I.N.V. E – 706 – 13).

La finalidad de este ensayo es la de medir la consistencia del cemento asfáltico. Esta propiedad del cemento asfáltico se mide en función de la distancia en decimas de milímetro que penetra verticalmente una aguja la cual debe cumplir una serie de normas contempladas en el manual del Invias ensayo I.N.V. E – 706 – 13 donde factores como la carga es de 100gr incluido el peso de la aguja, el tiempo que es de cinco (5) segundos y la temperatura de 25°C también son normalizados.

Para este ensayo se realizaron cinco (5) penetraciones con un tiempo de cinco (5) segundos en lugares diferentes de la muestra, en la Fotografía 7. se puede observar una penetración del cemento asfáltico durante el ensayo Invias 2013.

FOTOGRAFÍA 7. ENSAYO DE PENETRACIÓN



Fuente: Elaboración propia.

En la Fotografía 8. Se encuentra la máquina utilizada para el ensayo en medio de la realización de un ensayo, en la fotografía 9. se puede observar la muestra utilizada en la realización del ensayo, en la Fotografía 10. se observa el momento en el que la aguja penetra el cemento asfáltico, en la Fotografía 11. se visualiza el momento en el que se termina un ensayo.

FOTOGRAFÍA 8. ENSAYO DE PENETRACIÓN



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 9. MUESTRA ASFÁLTICA



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 10. ENSAYO PENETRACIÓN REALIZADO



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 11. MUESTRA PENETRADA



Fuente: Elaboración propia.

7.2 PUNTO DE IGNICIÓN Y DE LLAMA MEDIANTE LA COPA ABIERTA CLEVELAND (ENSAYO I.N.V. E – 709 – 13).

Una de las características del cemento asfáltico es que a partir de cierta temperatura empieza a despedir unos vapores inflamables los cuales aumentan en relación a la temperatura, a mayor temperatura mayor la cantidad de gases. En este ensayo se busca medir a que temperatura empieza a despedir suficientes vapores como para que una fuente de ignición los haga reaccionar y se observe una pequeña llama sobre toda la muestra. A esto se le conoce como punto de inflamación. Después de determinar el punto de inflamación se le aumentará la temperatura a la muestra de forma constante para poder determinar el punto de combustión, este punto es cuando la cantidad de gases liberada es suficiente como para que la muestra mantenga una llama en su área superficial y esta llama se mantenga un tiempo de 5 segundos mínimo. La importancia de este ensayo es la de caracterizar el cemento asfáltico y también la de tener presente el comportamiento del cemento asfáltico ya que este se llevará hasta temperaturas de 120°C durante los ensayos de viscosidad.

El ensayo se realizó según las normas Invias teniendo en cuenta las recomendaciones del aumento de temperatura empezando con un aumento precipitado y luego un aumento constante y lento. En la Fotografía 12. se puede observar el ensayo en ejecución.

FOTOGRAFÍA 12. PUNTO DE IGNICIÓN Y DE LLAMA.



Fuente: Elaboración propia.

En la fotografía 13. Se muestra al operario controlando la temperatura, en la Fotografía 14. Se observa la muestra utilizada durante el ensayo, En la Fotografía 15. Se puede ver cómo se aproximaba la llama para la realización del ensayo, En la Fotografía 16. Se puede observar la forma en la que se organizó el ensayo y como se colocó el termómetro para poder controlar la temperatura, en la Fotografía 17. Se detalla como termino la muestra una vez realizado en ensayo, en la Fotografía 18. Se observa el momento en el que la muestra de cemento asfáltico llega al punto de llama.

FOTOGRAFÍA 13. OPERARIO VERIFICANDO TEMPERATURA



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 14. MUESTRA PARA EL ENSAYO



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 15. VERIFICANDO EL ESTADO DEL CEMENTO



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 16. ORGANIZACIÓN TERMÓMETRO Y MÁQUINA



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 18. MÁQUINA DE TEMPERATURA CON TERMÓMETRO



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 17. PUNTO DE LLAMA



Fuente: Elaboración propia.

7.3 PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE MATERIALES BITUMINOSOS APARATO DE ANILLO Y BOLA (ENSAYO I.N.V. E – 712 – 13).

Este ensayo tiene como finalidad determinar a qué temperatura el cemento asfáltico se considera que fluye, esta información es útil ya que sirve para caracterizar el cemento asfáltico y también para tener una idea de a que temperatura el cemento asfáltico es maleable para tener en cuenta en el trabajo de grado.

La realización de este ensayo se hizo según la norma Invias, en un baño de agua. En el ensayo se utilizaron dos muestras, en una de estas la bola de bronce quedó obstaculizada por un tornillo lo cual no le permitió al cemento asfáltico bajar hasta la platina, pero con la información de una muestra fue suficiente para determinar el punto de ablandamiento. En la Fotografía 19 se puede observar el ensayo en desarrollo.

FOTOGRAFÍA 19. PUNTO DE ABLANDAMIENTO



Fuente: Elaboración propia.

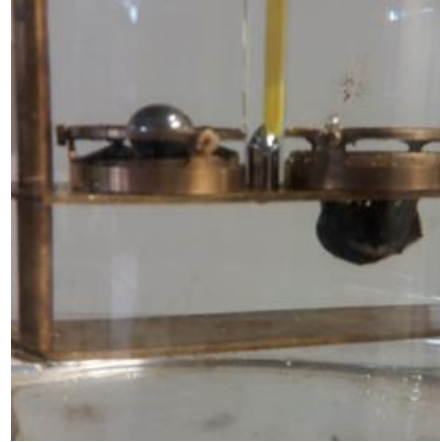
En la Fotografía 20. Se observa al operario controlando la caída de las bolas durante el ensayo, en la Fotografía 21. Se observa la caída de las bolas durante el ensayo, En la Fotografía 22. Se observa el inicio del ensayo y la posición inicial de las bolas, en la Fotografía 23. Se observa las muestras elaboradas para el ensayo.

FOTOGRAFÍA 20. OPERADOR CONTROLANDO EL ENSAYO



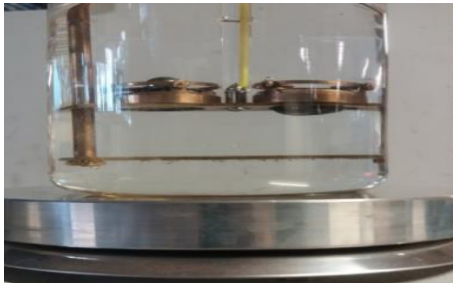
Fuente: Elaboración propia

FOTOGRAFÍA 21. REALIZACIÓN DEL ENSAYO



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 22. INICIO DEL ENSAYO DE ABLANDAMIENTO



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 23.. MUESTRAS PREPARADAS PARA EL ENSAYO



Fuente: Elaboración propia.

7.4 DUCTILIDAD DE LOS MATERIALES ASFÁLTICOS (ENSAYO DE INV E – 702 – 13)

En este ensayo la finalidad es medir la ductilidad del cemento asfáltico mediante la elongación de una muestra a una velocidad específica, en el momento en el que se rompe la probeta se detiene la elongación y se mide en cm la distancia.

El ensayo se realizó según la norma Invias con la muestra de las dimensiones especificadas y con una elongación a una velocidad de 50 mm por minuto con un error admisible de 2.5 mm y una temperatura de 25°C, en la Fotografía 24. se puede observar el ensayo en ejecución.

FOTOGRAFÍA 24. DUCTILIDAD DE LOS MATERIALES ASFÁLTICOS



Fuente: Elaboración propia.

En la Fotografía 25. Se puede observar la muestra siendo preparada para colocarse en la máquina y retirándose los moldes, en la Fotografía 26. Se puede observar la muestra para el ensayo recién vertida en el molde, en la Fotografía 27. Se encuentra la muestra en medio del ensayo por lo que en ese momento ya tiene una elongación considerable, en la Fotografía 28. Se observa el inicio del ensayo donde la muestra aún no se ha deformado, en la Fotografía 29. Se puede observar al operario controlando la elongación de la muestra, en la Fotografía 30. Se observa el final del ensayo por que la muestra se elongo lo suficiente como para separar sus dos extremos.

FOTOGRAFÍA 26. MUESTRA SIENDO PREPARADA PARA LA COLOCACIÓN



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 25. MUESTRA RECIÉN ELABORADA



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 27. ENSAYO EN EJECUCIÓN



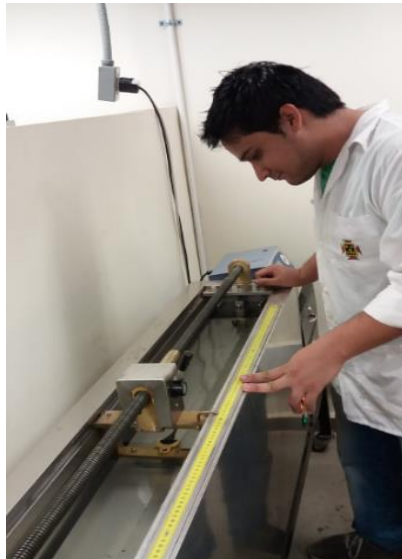
Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 28. INICIO DEL ENSAYO



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 29. OPERARIO CONTROLANDO EL ENSAYO



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 30. FINALIZACIÓN DEL ENSAYO



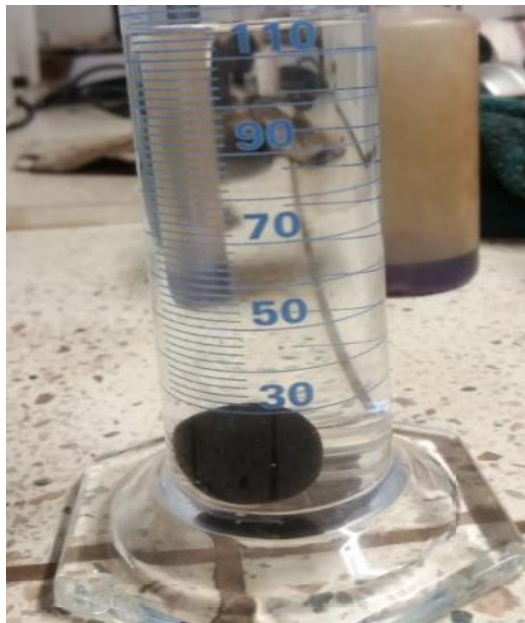
Fuente: Elaboración propia.

7.5 DETERMINAR LA DENSIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO POR MEDIO DEL PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES.

La densidad es la relación de masa sobre el volumen que para la realización del ensayo se medirá en Gramos sobre centímetros cúbicos. El ensayo consiste en realizar dos esferas de cemento asfáltico, las cuales se pesan por separado.

Se deben dejar reposar hasta temperatura ambiente, luego en una probeta milimetrada con una cantidad conocida de agua se pone una bola y se mide cual fue la diferencia de nivel de agua, la diferencia de este será el volumen de la esfera. Conociendo su peso y su volumen se puede determinar experimentalmente su densidad. En la Fotografía 31. se puede observar el ensayo en ejecución.

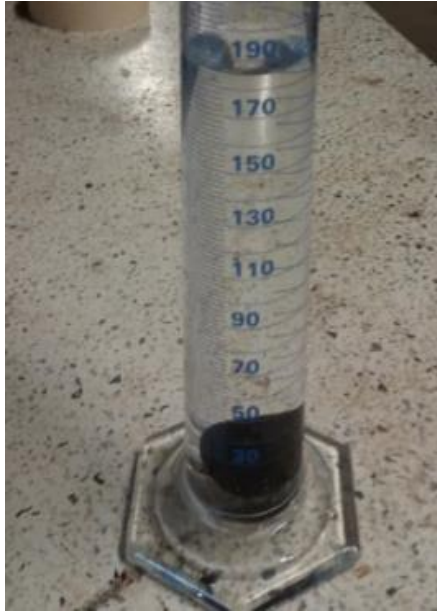
FOTOGRAFÍA 31. DENSIDAD RELATIVA



Fuente: Elaboración propia.

En la Fotografía 32. Se puede ver la probeta milimetrada llena con agua y la muestra de cemento asfáltico en su interior. En la fotografía 33. Se puede ver la probeta milimetrada antes de que se le agregue el cemento asfáltico pero con agua en su interior, en la Fotografía 34. se puede observar las dos muestras de cemento asfáltico utilizadas para la realización del ensayo.

FOTOGRAFÍA 33. PROBETA CON LA MUESTRA DE CEMENTO EN SU INTERIOR



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 32. PROBETA ANTES DEL INICIO DEL ENSAYO



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 34. MUESTRAS UTILIZADAS PARA EL ENSAYO



Fuente: Elaboración propia.

8. CARACTERIZACIÓN DEL P.V.C. EN POLVO.

8.1 ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS FINOS

En la Fotografía 35. Se observa los tamices utilizados para la realización del análisis granulométrico.

FOTOGRAFÍA 35. ENSAYO DE GRANULOMETRÍA



Fuente: Elaboración propia.

Este ensayo se realizó tomando como guía la norma Invias, pero algunos pasos no se pudieron realizar ya que la norma exige que la muestra debe ser puesta a 120°C lo que si se le aplica a el P.V.C. se produciría un cambio de estado de solido a líquido.

8.2 ENSAYO DE DENSIDAD RELATIVA.

Este ensayo se realizó utilizando el principio de Arquímedes donde se pesa el material al cual se le determinó la densidad relativa, y luego en una probeta milimetrada la cual debe tener una cantidad de agua conocida se pone la muestra, una vez realizado esto se determinó cuál es la diferencia de nivel y realizando una resta de el volumen final de la probeta menos el inicial se conocerá el volumen del material al que se le desea conocer la densidad relativa. Conociendo el peso del material y el volumen que tiene se pudo determinar la densidad ya que esta es peso sobre volumen en unidades de (gramos/cm³). Teniendo en cuenta que el P.V.C. es un material fino y menos denso que el agua si se realiza el ensayo solo este material flotaría impidiendo así determinar su densidad por lo que se decidió envolver el P.V.C. en nitrilo para poder realizar el ensayo.

En la Fotografía 36. se observa el proceso descrito anteriormente para la determinación de la densidad relativa.

FOTOGRAFÍA 36. DETERMINACIÓN DENSIDAD RELATIVA



Fuente: Elaboración propia.

9. DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD EMPLEANDO EL VISCOSÍMETRO ROTACIONAL BROOKFIELD. ENSAYO I.N.V. E – 717 – 13.

Para la determinación de la viscosidad se utilizó la norma Invias. La cantidad total de ensayos realizados fue de 15 ensayos distribuidos como se puede ver en la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción de ensayos realizados

| Porcentaje de P.V.C | Numero de datos obtenidos en un ensayo por temperatura | Numero de ensayos realizados | Temperaturas de ensayo | Norma utilizada | Cantidad de datos recolectados |
|---------------------|--|------------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| 0% | 3 | 3 | 80°C,90°C,100°C,110°C y 120°C. | I.N.V. E – 717 – 13 | 45 |
| 5% | 3 | 3 | 80°C,90°C,100°C,110°C y 120°C. | I.N.V. E – 717 – 13 | 45 |
| 10% | 3 | 3 | 80°C,90°C,100°C,110°C y 120°C. | I.N.V. E – 717 – 13 | 45 |
| 15% | 3 | 3 | 80°C,90°C,100°C,110°C y 120°C. | I.N.V. E – 717 – 13 | 45 |
| 20% | 3 | 3 | 80°C,90°C,100°C,110°C y 120°C. | I.N.V. E – 717 – 13 | 45 |

Fuente: Elaboración propia.

9.1 ELABORACIÓN DE LAS MUESTRAS NO MODIFICADAS Y MUESTRAS MODIFICADAS CON P.V.C. EN PORCENTAJES DE 5%, 10%, 15% y 20%.

Para el desarrollo del proyecto se realizaron cinco (5) tipos diferentes de muestras cuatro (4) de estas estaban modificadas con porcentajes diferentes de P.V.C los

cuales son 5%, 10%,15%, 20% y el quinto tipo de muestra fue un cemento asfáltico sin modificar. Por cada tipo de muestra se prepararon tres (3) capsulas las capsulas se pueden ver en la Fotografía 19. en total fueron 15 las capsulas necesarias para el proyecto, a continuación, se detallará la metodología utilizada para la elaboración de las muestras.

9.1.1 Muestras no modificadas. Primero se detallará como se realizaron las muestras inalteradas, lo primero es fue preparar las tres (3) capsulas a utilizar verificando que estas se encontraran limpias en el interior y exterior. Las capsulas se pueden observar en la Fotografía 37.

FOTOGRAFÍA 37. CAPSULAS



Fuente: Elaboración propia.

El siguiente paso fue calentar el cemento asfáltico en una estufa eléctrica hasta que se encuentre lo suficientemente fluido como para ser vertido aproximadamente entre 80°C a 100°. En la Fotografía 38. se observa el proceso.

FOTOGRAFÍA 38. CEMENTO ASFÁLTICO MIENTRAS ES CALENTADO



Fuente: Elaboración propia.

Para conocer la cantidad de cemento asfáltico con la que se debían llenar las capsulas se debe remitir al manual de usuario equipo viscosímetro Brookfield, donde se puede encontrar la tabla de preparación de la muestra en capsula. Se puede observar en la Tabla 3.

Tabla 3. Preparación de la muestra en capsula

| Vástago | Gramos de asfalto(g) |
|---------|----------------------|
| 21 | 8 |
| 27 | 10,5 |
| 28 | 11,5 |
| 29 | 13 |

Fuente: Guitierrez, Steffany. R. G. Manual de usuario equipo viscosimetro de brookfield. Bucaramanga. 2016

Teniendo en cuenta que el viscosímetro con el que cuenta la universidad pontificia bolivariana seccional Bucaramanga tiene el vástago numero 27 la cantidad de asfalto para todas las capsulas será de 10,5 gramos. Se toma una capsula y se pone en el porta-capsulas y esta a su vez es colocada en una balanza y se tara, luego de esto se tomó el recipiente donde está el cemento asfáltico caliente y con delicadeza se vertió en la capsula hasta que llego a 10,5 gramos, este procedimiento se debe realizar con tres (3) capsulas, se puede observar en las Fotografía 39. Y Fotografía 40.

FOTOGRAFÍA 39. CEMENTO ASFÁLTICO SIENDO VERTIDO EN CAPSULA.



Fuente: Elaboración Propia.

FOTOGRAFÍA 40. CAPSULA CON CANTIDAD CORRECTA DE CEMENTO ASFÁLTICO



Fuente: Elaboración propia.

Una vez terminado este proceso se tendrán las muestras no modificadas para el proyecto.

9.1.2 Muestras alteradas con P.V.C. Para la explicación de este proceso se tomará como ejemplo los datos del cemento asfáltico modificado con 10% de P.V.C, lo primero es tomar el recipiente donde se va a realizar la mezcla y se pone en una balanza donde se tara Fotografía 41.

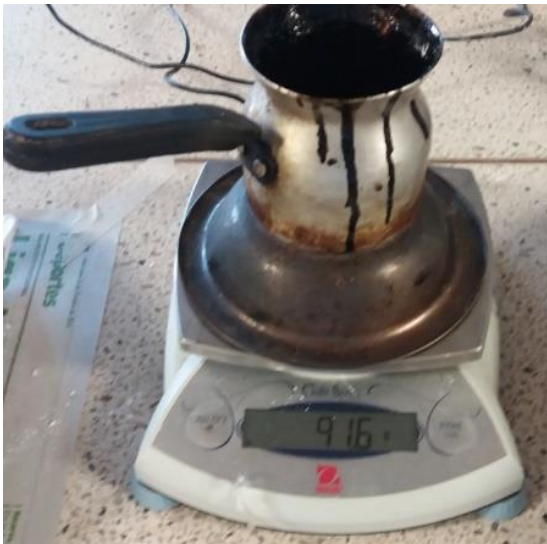
FOTOGRAFÍA 41. RECIPIENTE TARADO



Fuente: Elaboración propia.

En otro recipiente se calentó el cemento asfáltico hasta que se encontró fluido entre 80°C y 100°C luego se vertió en el recipiente de mezcla y este fue pesado para conocer la masa de cemento asfáltico como se observa en la Fotografía 42.

FOTOGRAFÍA 42. MASA DEL CEMENTO ASFÁLTICO.



Fuente: Elaboración propia.

Dependiendo del porcentaje de P.V.C se realizaron los respectivos cálculos para ver cuantos gramos de P.V.C se deben añadir al cemento asfáltico la ecuación utilizada fue la siguiente:

$$\frac{(masa\ de\ cemento\ asfáltico(g)) * (porcentaje\ de\ P.V.C)}{(porcentaje\ de\ cemento\ asfáltico)} = Masa\ de\ P.V.C(g)$$

En la Tabla 4. se puede observar los cálculos para cada uno de los respectivos porcentajes de P.V.C.

Tabla 4. Cálculos de P.V.C. a agregar

| Porcentaje de P.V.C | Masa de cemento asfáltico (g) | Cálculos | Masa de P.V.C (g) |
|---------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------|
| 20% | 80,2 | $\frac{80,2 * 0,2}{0,8}$ | 20,1 |
| 15% | 101,7 | $\frac{101,7 * 0,15}{0,85}$ | 17,9 |
| 10% | 91,6 | $\frac{91,6 * 0,1}{0,9}$ | 10,2 |
| 5% | 161,4 | $\frac{161,4 * 0,05}{0,95}$ | 8,5 |

Fuente: Elaboración propia.

Una vez conocida la masa de P.V.C que se debe agregar al cemento asfáltico se tara un recipiente y se procede a llenar con P.V.C hasta la cantidad calculada en la Tabla 4. como se puede detallar en la Fotografía 43.

FOTOGRAFÍA 43. MASA DE P.V.C



Fuente: Elaboración propia.

luego se controló la temperatura del cemento asfáltico para que sea de aproximadamente 100°C que es la temperatura de mezcla para el proyecto observable en la Fotografía 44.

FOTOGRAFÍA 44. TERMÓMETRO A 100°C



Fuente: Elaboración propia.

Cuando el pavimento se encuentra a la temperatura de mezcla se procedió a ir agregando el P.V.C lentamente mientras es mezclado como se ve en la Fotografía 45.

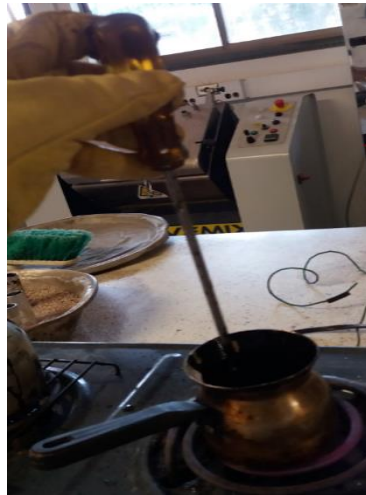
FOTOGRAFÍA 45. P.V.C SIENDO AGREGADO AL CEMENTO ASFÁLTICO



Fuente: Elaboración propia.

Una vez agregado el P.V.C este se mezcló por media hora para asegurarse de que las partículas de P.V.C estaban bien distribuidas en el cemento asfáltico y no se formen aglomeración de P.V.C. esto se observa en la Fotografía 46.

FOTOGRAFÍA 46. CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON P.V.C SIENDO MEZCLADO



Fuente: Elaboración propia.

Una vez que el cemento asfáltico modificado con P.V.C termino el tiempo de mezcla se procedió a tomar una capsula y ponerla en el porta-capsulas y está en una balanza la cual fue talada y luego se agregaron 10,5 gramos de cemento asfáltico modificado, se realizó este procedimiento tres (3) veces. Fotografía 47.

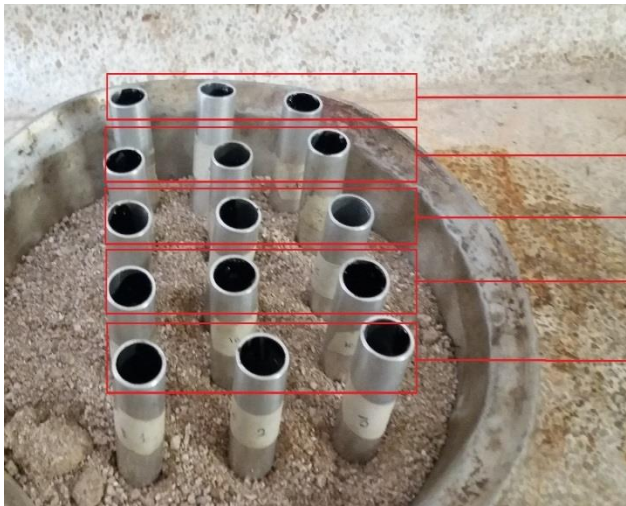
FOTOGRAFÍA 47. CAPSULA CON CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO.



Fuente: Elaboración propia.

Una vez terminado el proceso se contó con un total de 15 capsulas las cuales debían permanecer verticales para que el cemento asfáltico se asiente por lo que una vez terminada la preparación de las muestras estas se dejaron en un platón con arena ya que el porta-capsulas solo puede tener cinco (5) capsulas a la vez. En la Fotografía 48. Se puede observar las 15 capsulas elaboradas en el trabajo de grado.

FOTOGRAFÍA 48. CAPSULAS ELABORADAS



Muestras modificadas con 20% de P.V.C

Muestras modificadas con 15% de P.V.C

Muestras modificadas con 10% de P.V.C

Muestras modificadas con 5% de P.V.C

Muestras sin modificar.

Fuente: Elaboración propia.

En la Fotografía 49. Se observa el recipiente de mezcla y el recipiente de dosificación siendo calentados en una estufa eléctrica, En la fotografía 50. Se encuentran todas las capsulas realizadas para el desarrollo del trabajo de grado reposando en un platón de arena, en la Fotografía 51. Se encuentra el operario realizando la mezcla del cemento asfáltico, en la Fotografía 52. Se encuentra una capsula con el contenido correcto de cemento asfáltico para la realización de los ensayos de viscosidad, en la Fotografía 53. Se observa el recipiente de mezcla en el momento en el que se le agrega el P.V.C., en la Fotografía 54. Se encuentra las capsulas de cemento asfáltico sin modificar y las del cemento asfáltico modificado en un 5% recién elaboradas, en la fotografía 55. Se puede ver al operario realizando control del cemento asfáltico mientras este es mezclado, en la fotografía 56. Se puede ver al operario realizando la mezcla del cemento asfáltico y el P.V.C. en la máquina extractora de vapores, en la Fotografía 57. Se puede ver el momento en el que se realiza el control de temperatura para asegurarse de que no se exceda la temperatura, en la Fotografía 58. Se puede ver el recipiente de mezcla con cemento

asfáltico mientras es mezclado, en la Fotografía 59. Se observa el recipiente de mezcla mientras es tarado para asegurarse de que tenga el contenido exacto de cemento asfáltico. Y P.V.C., en la fotografía 60. Se observa el recipiente de mezcla con cemento asfáltico y con P.V.C. recién agregado.

FOTOGRAFÍA 50. RECIPIENTE DE MEZCLA Y RECIPIENTE DE DOSIFICACIÓN



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 49. MUESTRAS DEL PROYECTO REPOSANDO



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 51. OPERARIO REALIZANDO LA MEZCLA DEL CEMENTO ASFÁLTICO



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 52. CONTROLANDO EL CONTENIDO DE LAS CAPSULAS



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 53. P.V.C. SIENDO AGREGADO AL CEMENTO ASFÁLTICO



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 54. MUESTRAS REPOSANDO.



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 55. OPERARIO CONTROLANDO LA MEZCLA



Fuente: Elaboracion propia

FOTOGRAFÍA 56. OPERARIO REALIZANDO MEZCLA



Fuente: Elaboracion propia.

FOTOGRAFÍA 57. CONTROLANDO LA TEMPERATURA DE LA MEZCLA



Fuente: Elaboracion propia.

FOTOGRAFÍA 58. MEZCLA DE CEMENTO ASFÁLTICO



Fuente: Elaboracion propia.

FOTOGRAFÍA 59. RECIPIENTE DE MEZCLA SIENDO TARADO



Fuente: Elaboracion propia.

FOTOGRAFÍA 60. CEMENTO ASFÁLTICO CON P.V.C. RECIÉN AGREGADO



Fuente: Elaboracion propia.

9.2 PROCESO DE DETERMINACIÓN DE VISCOSIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO MEDIANTE EL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD.

El proceso descrito a continuación fue el proceso usado para determinar las viscosidades del cemento asfáltico en el proyecto.

1. Se enciende el viscosímetro (**Paso 1.1**) ver en Fotografía 61. y el controlador (**Paso 1.2**) ver en Fotografía 62. ambos en la parte trasera de los equipos.

FOTOGRAFÍA 61. PASO 1.1.



Paso 1.1.

Fuente: Elaboración propia.

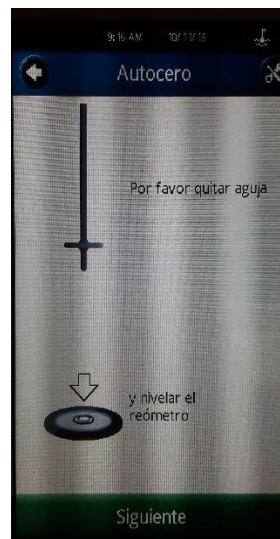
FOTOGRAFÍA 62. PASO 1.2.



Fuente: Elaboración propia.

2. Una vez encendido el viscosímetro este solicita una nivelación o autocero. Se oprime siguiente para que se realice automáticamente. Se puede ver en las Fotografía 63 y Fotografía 64.

FOTOGRAFÍA 63. NIVELACIÓN



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 64. AUTOCERO COMPLETADO



Fuente: Elaboración propia.

3. Se colocó la muestra a utilizar en el horno a 110 grados centígrados por 10 minutos para que se encontrara fluida. Se observa en Fotografía 65.

FOTOGRAFÍA 65. MUESTRA EN EL HORNO



Fuente: Elaboración propia.

4. Se colocó la capsula en la termocelda verificando que la parte inferior de la capsula encaje con la unión de la termocelda (**Paso 4.1.**), en otras palabras, que la capsula no rotara en la termocelda, se recomienda usar las pinzas incluidas en el viscosímetro observadas en la imagen de la Fotografía 66.

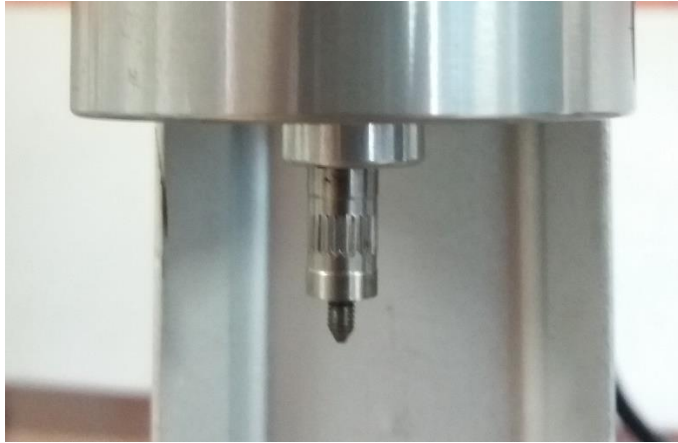
FOTOGRAFÍA 66. CAPSULA EN TERMO CELDA (PASO 4.1.)



Fuente: Elaboración propia.

5. Se retiró la tapa de plástico (**Paso 5.1.**) y se colocó la rosca de acoplamiento en sentido horario sujetando la parte superior para no aplicar torque al motor del viscosímetro (**Paso 5.2.**), una vez realizado se pone el alambre (**Paso 5.3.**) y finalmente se colocó la aguja en el extremo libre del alambre (**Paso 5.4.**). este proceso se puede observar en Fotografía 67, Fotografía 68, Fotografía 69 y Fotografía 70.

FOTOGRAFÍA 67. PASO 5.1.



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 68. PASO 5.2.



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 69. PASO 5.3.



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 70. PASO 5.4.



Fuente: Elaboración propia.

6. Se bajó el motor del viscosímetro hasta que el cemento asfáltico cubrió el hombro de la aguja. Fotografía 71, Fotografía 72 y Fotografía 73.

FOTOGRAFÍA 71. HOMBRO DE LA AGUJA

Hombro de la aguja (se delimita por una muesca)



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 72. BAJANDO EL HOMBRO.



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 73. HOMBRO CUBIERTO POR CEMENTO ASFÁLTICO.



Fuente: Elaboración propia.

7. Para conservar la temperatura se colocó la tapa de cerámica sobre la capsula ubicada en la termocelda (**Paso 7.1.**). Fotografía 74.

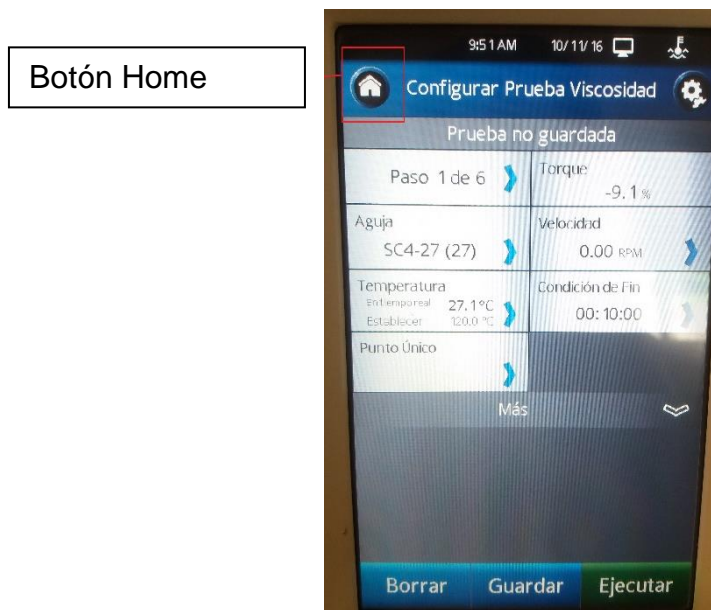
FOTOGRAFÍA 74. PASO 7.1.



Fuente: Elaboración propia.

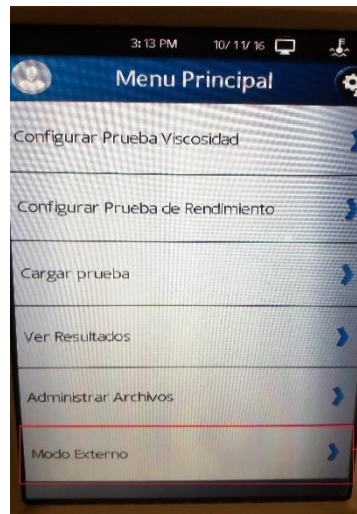
8. Se retoma el viscosímetro donde se encuentra la pantalla de verificación del autocero donde se selecciono siguiente, y posteriormente se abre el icono de home(casa) (**Paso 8.1.**),una vez realizado se debe ubicar en enlace externo (**Paso 8.2.**). Fotografía 75, Fotografía 76 y Fotografía 77.

FOTOGRAFÍA 75. PASO 8.1.



Fuente: Elaboración propia.

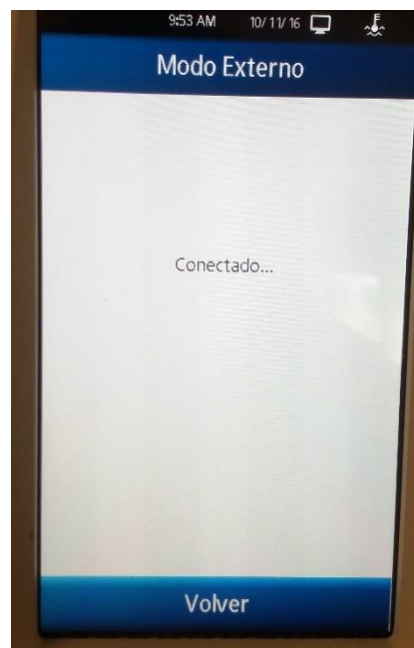
FOTOGRAFÍA 76. PASO 8.2.



Botón modo externo
(Paso 2)

Fuente: Elaboración propia

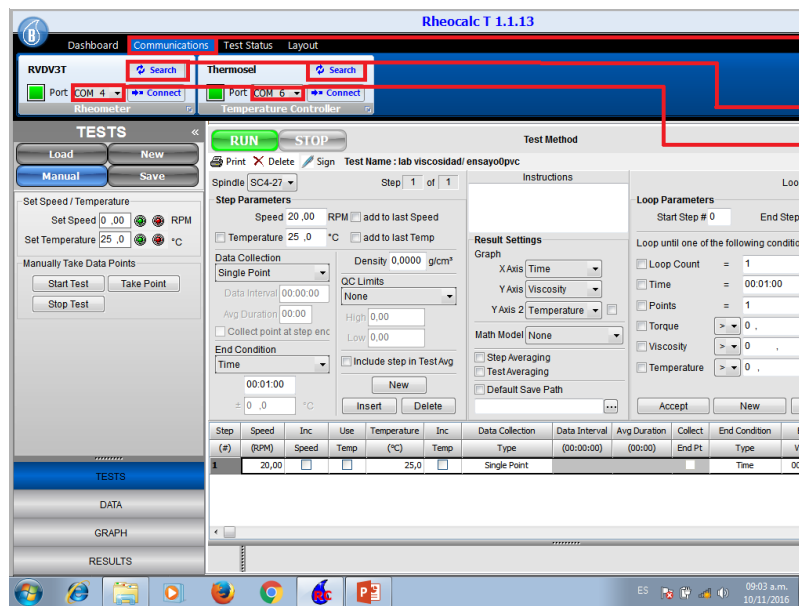
FOTOGRAFÍA 77. PANTALLA ENLACE EXTERNO CONECTADO



Fuente: Elaboración propia.

9. Se abre el software rheocalc t, se ubican en la pestaña communications (**Paso 9.1.**), en esta ventana aparecerán dos cuadros en la parte superior izquierda uno con título RVDV3T y la segunda con título thermosel se le dará en serch a los dos cuadros para que busque que dispositivos hay conectados al computador del viscosímetro(**Paso 9.2.**) y posteriormente se verificara que para el título RVDV3T en la parte donde dice port diga COM 4 y para el título thermosel en la parte port este seleccionada la opción COM 6(**Paso 9.3.**). se puede ver en Fotografía 78.

FOTOGRAFÍA 78. PASOS 9.1,9.2,9.3



Paso 9.1.

Paso 9.2.

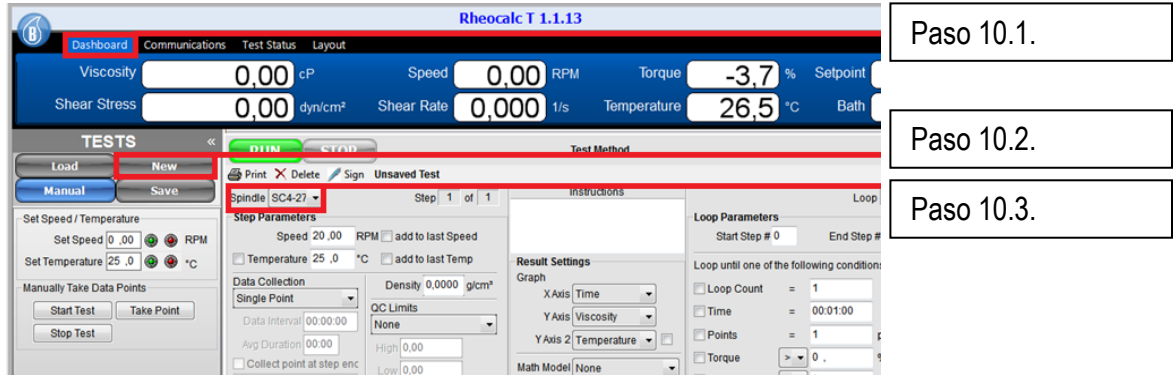
Paso 9.3.

Fuente: Elaboración propia.

10. Posteriormente se ubica en la pestaña DASHBOARD(**Paso 10.1.**), en la parte superior izquierda aparecerán varias opciones, se escoge new(**Paso 10.2.**) con lo que se volverá a cargar la pantalla, después de eso en la opción Spindle se

selecciona la opción SC4-27(**Paso 10.3.**) (opción única ya que la universidad solo cuenta con esa aguja). Como se observa en Fotografía 79.

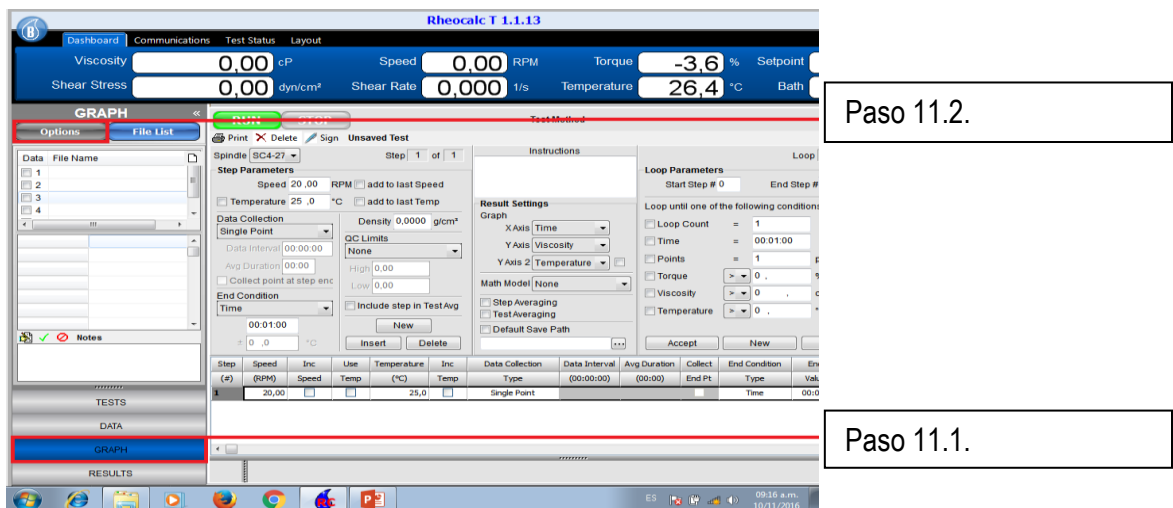
FOTOGRAFÍA 79. PASOS 10.1,10.2,10.3.



Fuente: Elaboración propia.

11. En la parte inferior izquierda hay una opción GRAPH (**Paso 11.1.**), se de click y se desplegara un cuadro nuevo donde en la parte superior izquierda saldrá options, se le da click (**Paso 11.2.**) se desplegaran 3 opciones una X Axis donde se pone la temperatura (**Paso 11.3.**) y sé asegura que en Y Axis este la opción de viscosidad (**Paso 11.4.**). como se observa en Fotografía 80 y Fotografía 81.

FOTOGRAFÍA 80. PASO 11.1,11.2



Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 81. PASOS 11.3,11.4



Paso 11.3.

Paso 11.4.

Fuente: Elaboración propia.

- Se dirige a la opción ubicada en la esquina inferior izquierda en DATA(**Paso 12.1.**) y se seleccionaron las opciones en include in the report entre estas se encuentran Data, test, results y graphs. Se selecciona solo las opciones que se desean ver en el reporte final (**Paso 12.2.**). como se visualiza en Fotografía 82.

FOTOGRAFÍA 82. PASO 12.1,12.2

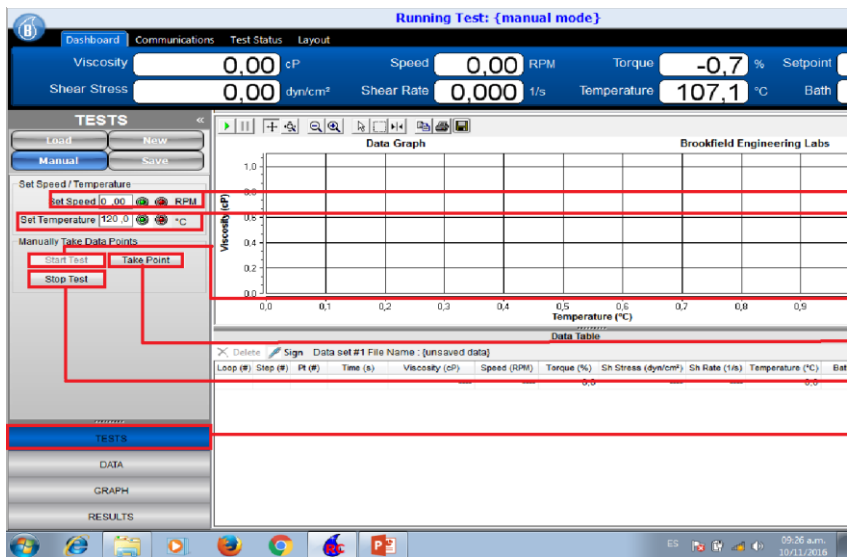
The screenshot displays a software interface for a viscosity test. At the top, it shows 'Test Stopped By User'. Below this, there are several input fields for Viscosity (0.00 cP), Speed (0.00 RPM), Torque (---- %), Shear Stress (0.00 dyn/cm²), Shear Rate (0.000 1/s), and Temperature (162.5 °C). The interface is divided into several sections: 'DATA' (with 'Load', 'Save', 'Report', and 'Details' buttons), 'Test Method' (with 'RUN' and 'STOP' buttons), and 'Result Settings'. The 'DATA' section includes a 'Report' area with 'Include in the report' checkboxes for Data, Test, Results, and Graphs. The 'Test Method' section includes 'Step Parameters' (Speed 20.00 RPM, Temperature 25.0 °C) and 'Data Collection' (Single Point, Data Interval 00:00:00). The 'Result Settings' section includes 'Graph' (X Axis Time, Y Axis Viscosity, Y Axis 2 Temperature) and 'Loop Parameters' (Loop Count = 1, Time = 00:01:00). A table at the bottom shows test parameters for Step 1: Speed 20.00 RPM, Temperature 25.0 °C, Data Collection Single Point, Data Interval 00:00:00, Avg Duration 00:00, Collect End Pt, End Condition Time, and End Val 00:00. Two callout boxes are present: 'Paso 12.1.' pointing to the 'DATA' section and 'Paso 12.2.' pointing to the 'Result Settings' section.

Fuente: Elaboración propia.

13. luego se ubica en la opción test(**Paso 13.1.**) en la parte inferior izquierda lo cual se desplegara un cuadro nuevo en este cuadro se puede modificar la temperatura de la termocelda y las revoluciones del viscosímetro, en la opción set speed(**Paso 13.2.**) es donde se ponen las rpm y se da en el botón verde para que inicie el giro, y en el botón rojo para finalizar, de la misma forma funciona la opción set temperatura(**Paso 13.3.**) una vez colocados los datos se le dara start test(**Paso 13.4.**), se recomienda estar pendiente de que el pavimento tenga cierta fluidez al empezar a girar la aguja. Una vez alcanzada la temperatura deseada para el ensayo se esperan 15 min para que sea homogénea la temperatura, para tomar los datos de viscosidad se selecciona la opción take point(**Paso 13.5.**) (se recomienda tomar 3 datos por temperatura distanciados mínimo de 60 segundos cada uno), se pueden realizar ensayos a diferentes

temperaturas, una vez terminado el ensayo se da en la opción Stop Test(**Paso 13.6.**). Fotografía 83.

FOTOGRAFÍA 83. PASOS 13.1,13.2,13.3,13.4,13.5,13.6



- Paso 13.2.
- Paso 13.3.
- Paso 13.4.
- Paso 13.5.
- Paso 13.6.
- Paso 13.1.

Fuente: Elaboración propia.

14. Para guardar los resultados en la parte inferior izquierda se selecciona test (**Paso 14.1.**) y en el nuevo cuadro la opción save(**Paso 14.2.**) y le sé da un nombre al ensayo(**Paso 14.3.**) y una ubicación (**Paso 14.4.**). como se observa en Fotografía 84.

FOTOGRAFÍA 84. PASOS 14.1,14.2,14.3,14.4

Test Stopped By User

Dashboard Communications Test Status Layout

Viscosity cP Speed RPM Torque % Setpoint

Shear Stress dyn/cm² Shear Rate 1/s Temperature °C Bath

TESTS

Load New

Manual **Save**

Save Test

File Name

Folder to Save to

Save

| File Path / File Name | Spindle | Speed | Date & Time Saved |
|----------------------------|---------|-------|--------------------------|
| asfalto convencional | SC4-27 | 20 | 10/02/2016 10:00 p.m. |
| ensayo 1 | SC4-27 | 20 | 09/11/2016 10:26:00 a.m. |
| kas | SC4-27 | 20 | 17/03/2016 04:33:00 p.m. |
| prebba 2 | SC4-27 | 20 | 09/11/2016 02:20:00 p.m. |
| prorij | SC4-27 | 20 | 18/05/2016 10:46:00 a.m. |
| -VICENTE 1 OCT 2015 | SC4-27 | 20 | 15/03/2016 05:40:00 p.m. |
| dsctfad | | | |
| hggpvglyygg | | | |
| lujft | | | |
| lab viscosidad | | | |
| 3 | SC4-27 | 20 | 12/02/2016 08:45:00 a.m. |
| Andrespvc0 | SC4-27 | 20 | 10/11/2016 03:18:00 p.m. |
| Andrespvc0ensayo2 | SC4-27 | 20 | 10/11/2016 04:17:00 p.m. |
| asfalto con ceniza 10% | SC4-27 | 20 | 11/02/2016 02:59:00 p.m. |
| asfalto con ceniza 5% | SC4-27 | 20 | 11/02/2016 01:09:00 p.m. |
| asfalto con pvc 15% | SC4-27 | 20 | 15/02/2016 05:29:00 p.m. |
| asfalto convencional final | ULA | 20 | 15/02/2016 04:10:00 p.m. |
| ensayo 1 | SC4-27 | 20 | 09/11/2016 10:27:00 a.m. |
| ensayo asfalto con pvc 5% | SC4-27 | 20 | 12/02/2016 04:30:00 p.m. |
| ensayo0pvc | SC4-27 | 20 | 09/11/2016 04:31:00 p.m. |
| practica | SC4-27 | 20 | 09/02/2016 02:53:00 p.m. |
| prebba 2 | SC4-27 | 20 | 09/11/2016 02:22:00 p.m. |
| prueba 1 | ULA | 20 | 26/01/2016 02:44:00 p.m. |
| prueba numero 1 | SC4-27 | 20 | 18/05/2016 10:51:00 a.m. |

TESTS DATA GRAPH RESULTS

ES 08:01 a.m. 11/11/2016

Paso 14.2.

Paso 14.3.

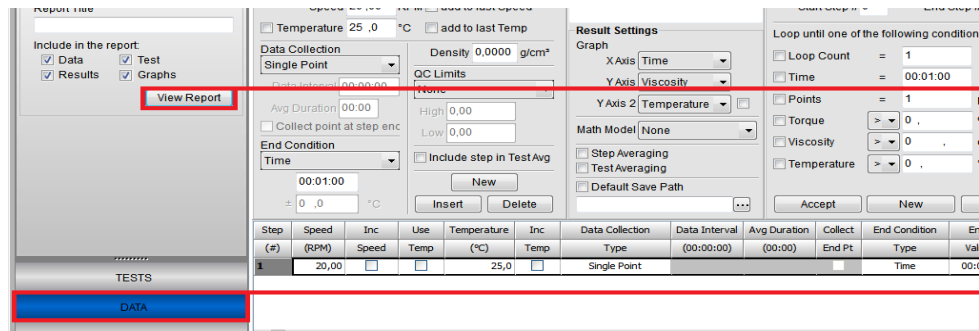
Paso 14.4.

Paso 14.1.

Fuente: Elaboración propia.

15. Para poder exportar los resultados del ensayo a un PDF es necesario ingresar a Data (**Paso 15.1.**) y se cargara un cuadro en el que le se debe ubicar en view report (**Paso 15.2.**), esto abrirá los resultados del ensayo, los cuales se encuentran en el formato de trabajo del software rehocalc t en la barra superior de herramientas el quinto botón de izquierda a derecha con el logo de PDF (**Paso 15.3.**) donde permite exportar el archivo y para finalizar se escoge donde se desea guardarlo y con qué nombre en versión PDF (**Paso 15.4.**). Fotografía 85, Fotografía 86 y Fotografía 87.

FOTOGRAFÍA 85. PASOS 15.1,15.2

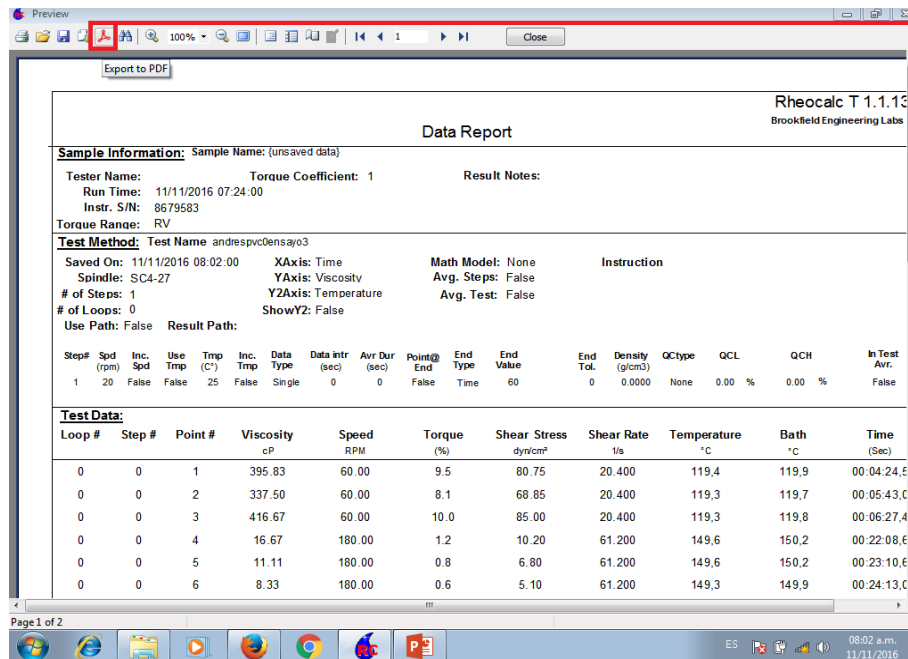


Paso 15.2.

Paso 15.1.

Fuente: Elaboración propia.

FOTOGRAFÍA 86. PASO 15.3.



Paso 15.3.

FOTOGRAFÍA 87. PASO 15.4.

Nombre: andres0pvcensayo3
Tipo: andres0pvcensayo3.PDF

| Loop # | Step # | Point # | Viscosity cP | Speed RPM | Torque (%) | Shear Stress dy/cm ² | Shear Rate 1/s | Temperature °C | Bath °C | Time (Sec) |
|--------|--------|---------|-----------------|--------------|---------------|------------------------------------|-------------------|-------------------|------------|---------------|
| 0 | 0 | 1 | 395.83 | 60.00 | 9.5 | 80.75 | 20.400 | 119.4 | 119.9 | 00:04:24.5 |
| 0 | 0 | 2 | 337.50 | 60.00 | 8.1 | 68.85 | 20.400 | 119.3 | 119.7 | 00:05:43.0 |
| 0 | 0 | 3 | 416.67 | 60.00 | 10.0 | 85.00 | 20.400 | 119.3 | 119.8 | 00:06:27.4 |
| 0 | 0 | 4 | 16.67 | 180.00 | 1.2 | 10.20 | 61.200 | 149.6 | 150.2 | 00:22:08.6 |
| 0 | 0 | 5 | 11.11 | 180.00 | 0.8 | 6.80 | 61.200 | 149.6 | 150.2 | 00:23:10.6 |
| 0 | 0 | 6 | 8.33 | 180.00 | 0.6 | 5.10 | 61.200 | 149.3 | 149.9 | 00:24:13.0 |

Paso 15.4.

10. RESULTADOS

10.1 CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

10.1.1 Penetración de los materiales asfálticos

Norma utilizada es la I.N.V. E – 706 – 13, En la Tabla 5. se puede observar los resultados del ensayo de penetración de los materiales asfálticos.

Tabla 5. Resultados ensayo penetración

| Muestra. | Penetración (1/10)mm |
|------------------|----------------------|
| 1 | 66 |
| 2 | 60 |
| 3 | 64 |
| 4 | 62 |
| 5 | 65 |
| Promedio. | 63,4 |

Fuente: Elaboración propia.

10.1.2 Punto de ignición y de llama mediante la copa abierta Cleveland.

La norma Utilizada es la I.N.V. E – 709 – 13. En la Tabla 6. se encuentra los resultados del ensayo de punto de ignición y de llama mediante la copa de Cleveland.

Tabla 6. Resultados punto de ignición y de llama

| Estado de la muestra | Temperatura °C(°F) |
|----------------------|--------------------|
| Punto de inflamación | 265,5°C(510°F) |
| Punto de combustión. | 337,7°C(640°F) |

Fuente: Elaboración propia..

10.1.3 Punto de ablandamiento de materiales bituminosos aparato de anillo y bola. La norma utilizada es la I.N.V. E – 712 – 13, En la Tabla 7 se puede observar los resultados del ensayo de punto de ablandamiento de materiales bituminosos.

Tabla 7. Resultados ensayo punto de ablandamiento

| Muestra | Punto de ablandamiento °C(°F) |
|---------|-------------------------------|
| 1 | 46.2°C(115,2°F) |

Fuente: Elaboración propia.

10.1.4 Ductilidad de los materiales asfálticos. La norma utilizada es la INV E – 702 – 13, En la Tabla 8 se puede observar los resultados del ensayo de ductilidad de los materiales asfálticos.

Tabla 8. Resultados ensayos ductilidad

| Muestra | Temperatura(°C) | Ductilidad(cm) |
|---------|-----------------|----------------|
| 1 | 23,6 | 115,6 |

Fuente: Elaboración propia.

10.1.5 Determinar la densidad del cemento asfáltico. El principio utilizado para este ensayo es el de Arquímedes el cual dice que un cuerpo sumergido en un líquido en reposo recibe un empuje hacia arriba el cual es igual al del peso del volumen de agua que desalojo. En la Tabla 9 están los resultados del ensayo.

Tabla 9. Resultados ensayo densidad

| Muestra | Masa(gr) | Volumen(cm3) | Densidad(gr/cm3) |
|---------|----------|--------------|------------------|
| 1 | 13,2 | 12 | 1,1 |
| 2 | 9,2 | 8 | 1,15 |

Fuente: Elaboración propia.

10.2 CARACTERIZACIÓN DEL P.V.C.

10.2.1 Ensayo de Ensayo de análisis granulométrico de los agregados finos.

En la Tabla 10 se pueden observar los resultados del ensayo de granulometría realizado al P.V.C.

Tabla 10. Resultados ensayos de granulometría

| Malla | Abertura(mm) | Peso retenido(gr) | % retenido parcial | % que pasa |
|-------|--------------|-------------------|--------------------|------------|
| N. 4 | 4,75 | 0 | 0 | 100 |
| 10 | 2 | 0 | 0 | 100 |
| 40 | 0,425 | 0 | 0 | 100 |
| 80 | 0,18 | 0,2 | 0,3 | 99,7 |
| 100 | 0,149 | 13,7 | 20,1 | 79,6 |
| 200 | 0,074 | 16,3 | 23,9 | 55,7 |
| Fondo | | 37,9 | 55,7 | 0 |

Fuente: Elaboración propia.

10.2.2 Ensayo de densidad relativa.

En la Tabla 11. Se puede observar los resultados del ensayo de densidad relativa realizado al P.V.C.

Tabla 11. Resultados ensayo de densidad relativa

| Ensayo | Masa(gr) | Volumen(cm3) | Densidad (gr/cm3) |
|--------|----------|--------------|-------------------|
| 1 | 14,9 | 18 | 0,83 |

Fuente: elaboración propia.

10.3 RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS POR EL MÉTODO PARA DETERMINAR LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO EL VISCOSÍMETRO ROTACIONAL.

Los ensayos de viscosidad realizados en este trabajo de grado se realizaron según la norma I.N.V. E – 717 – 13.

10.3.1 Ensayos con cemento asfáltico sin modificar. Se realizaron tres (3) ensayos los resultados del primer ensayo se encuentran en la tabla 12. los resultados del segundo ensayo se encuentran en la tabla 13. y los resultados del tres (3) ensayo se encuentran en la Tabla 14.

Tabla 12. Resultados ensayo 1 viscosidad 0% P.V.C.

| Viscosidad(cP) | Velocidad(RPM) | Torque (%) | Temperatura(°C) |
|----------------|----------------|------------|-----------------|
| 27083,3 | 9 | 97,5 | 79,7 |
| 25710,5 | 9,5 | 97,7 | 79,7 |
| 24325 | 10 | 97,3 | 79,5 |

| Viscosidad(cP) | Velocidad(RPM) | Torque (%) | Temperatura(°C) |
|----------------|----------------|------------|-----------------|
| 8150,00 | 30 | 97,8 | 89,7 |
| 8158,33 | 30 | 97,9 | 89,6 |
| 8091,67 | 30 | 97,1 | 89,6 |
| 3426,06 | 71 | 97,3 | 99,6 |
| 3440,14 | 71 | 97,7 | 99,4 |
| 3440,14 | 71 | 97,7 | 99,7 |
| 1660,96 | 146 | 97 | 109,7 |
| 1650,34 | 146 | 97,7 | 109,4 |
| 1643,58 | 148 | 97,3 | 109,5 |
| 870,51 | 195 | 67,9 | 119,9 |
| 866,67 | 195 | 67,6 | 119,9 |
| 867,95 | 195 | 67,7 | 119,6 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 13. Resultados ensayo 2. Viscosidad 0% P.V.C.

| Viscosidad(cP) | Velocidad(RPM) | Torque(%) | Temperatura(°C) |
|----------------|----------------|-----------|-----------------|
| 27083,3 | 9 | 97,5 | 79,8 |
| 25763,2 | 9,5 | 97,9 | 79,6 |
| 24400 | 10 | 97,6 | 79,7 |
| 9064,81 | 27 | 97,9 | 89,6 |
| 8863,64 | 27 | 97,5 | 89,6 |
| 8818,18 | 27 | 97 | 89,6 |
| 3786,82 | 64,5 | 97,7 | 100 |
| 3759,69 | 64,5 | 97 | 99,9 |
| 3759,69 | 64,5 | 97 | 99,5 |
| 1800 | 135 | 97,2 | 109,3 |
| 1798,15 | 135 | 97,1 | 109,5 |
| 1783,09 | 136 | 97 | 109,7 |
| 928,21 | 195 | 72,4 | 119,9 |
| 920,51 | 195 | 71,8 | 119,8 |
| 920,51 | 195 | 71,8 | 120,1 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Resultados ensayo 3. Viscosidad 0% P.V.C.

| Viscosidad(cP) | Velocidad(RPM) | Torque(%) | Temperatura(°C) |
|----------------|----------------|-----------|-----------------|
| 23238,1 | 10,5 | 97,6 | 79,7 |
| 22638,9 | 10,8 | 97,8 | 79,5 |
| 22453,7 | 10,8 | 97 | 79,5 |
| 8150 | 30 | 97,8 | 89,6 |
| 8158,33 | 30 | 97,9 | 89,7 |
| 8133,33 | 30 | 97,6 | 89,7 |
| 3492,86 | 70 | 97,8 | 99,6 |
| 3492,86 | 70 | 97,8 | 99,4 |
| 3485,71 | 70 | 97,6 | 99,5 |
| 1674,14 | 145 | 97,1 | 109,4 |
| 1677,59 | 145 | 97,3 | 109,6 |
| 1666,1 | 145 | 97,3 | 109,3 |
| 907,69 | 195 | 70,8 | 120,1 |
| 897,44 | 195 | 70 | 119,4 |
| 892,31 | 195 | 69,6 | 119,3 |

Fuente: elaboración propia.

10.3.2 Ensayos con cemento asfáltico modificado en 5% con P.V.C. Se realizaron tras (3) ensayos los resultados del primer ensayo se encuentran en la tabla 15. los resultados del segundo ensayo se encuentran en la tabla 16. y los resultados del tres (3) ensayo se encuentran en la Tabla 17.

Tabla 15. Resultados ensayo 1. Viscosidad 5% P.V.C.

| Viscosidad(cP) | Velocidad(RPM) | Torque(%) | Temperatura(°C) |
|----------------|----------------|-----------|-----------------|
| 23689,3 | 10,3 | 97,6 | 79,6 |
| 24475 | 10 | 97,9 | 79,6 |
| 25051 | 9,7 | 97,2 | 79,5 |
| 10565,2 | 23 | 97,2 | 89,4 |
| 10482,8 | 23,3 | 97,7 | 89,7 |
| 10439,9 | 23,3 | 97,3 | 89,5 |
| 4450 | 55 | 97,9 | 99,7 |
| 4427,27 | 55 | 97,4 | 99,7 |
| 4413,64 | 55 | 97,1 | 99,6 |
| 2119,57 | 115 | 97,5 | 109,5 |
| 2108,7 | 115 | 97,0 | 109,4 |
| 2087,61 | 117 | 97,7 | 109,5 |
| 1092,32 | 195 | 85,2 | 119,7 |
| 1082,05 | 195 | 84,4 | 119,6 |
| 1076,92 | 195 | 84,0 | 119,3 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Resultado ensayo 2. Viscosidad 5% P.V.C.

| Viscosidad(cP) | Velocidad(RPM) | Torque (%) | Temperatura(°C) |
|----------------|----------------|------------|-----------------|
| 31753,2 | 7,7 | 97,8 | 79,6 |
| 31907,9 | 7,6 | 97,0 | 79,5 |
| 32006,6 | 7,6 | 97,3 | 79,8 |
| 11571,4 | 21 | 97,2 | 89,5 |
| 11547,6 | 21 | 97,0 | 89,7 |
| 11438,7 | 21 | 97,3 | 89,6 |
| 4617,92 | 53 | 97,9 | 99,5 |
| 4589,62 | 53 | 97,3 | 99,4 |
| 4580,19 | 53 | 97,1 | 99,5 |
| 2121,74 | 115 | 97,6 | 109,7 |
| 2113,04 | 115 | 97,2 | 109,8 |
| 2092,67 | 115 | 97,1 | 109,6 |

| Viscosidad(cP) | Velocidad(RPM) | Torque (%) | Temperatura(°C) |
|----------------|----------------|------------|-----------------|
| 1085,9 | 195 | 84,7 | 119,3 |
| 1078,21 | 195 | 84,1 | 119,9 |
| 1071,79 | 195 | 83,6 | 120,2 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Resultado ensayo 3. Viscosidad 5% P.V.C.

| Viscosidad(cP) | Velocidad(RPM) | Torque (%) | Temperatura(°C) |
|----------------|----------------|------------|-----------------|
| 29397,6 | 8,3 | 97,6 | 79,7 |
| 29337,4 | 8,3 | 97,4 | 79,7 |
| 29307,2 | 8,3 | 97,3 | 79,6 |
| 10641,3 | 23 | 97,9 | 90,1 |
| 10630,4 | 23 | 97,8 | 90 |
| 10608,7 | 23 | 97,6 | 89,9 |
| 4385,1 | 55,7 | 97,7 | 100,1 |
| 4362,66 | 55,7 | 97,2 | 100,1 |
| 4330,36 | 56 | 97,0 | 99,9 |
| 2004,1 | 122 | 97,8 | 109,5 |
| 1989,75 | 122 | 97,1 | 109,7 |
| 1971,54 | 123 | 97,0 | 109,6 |
| 1025,64 | 195 | 80,0 | 119,3 |
| 1020,51 | 195 | 79,6 | 119,2 |
| 1011,54 | 195 | 78,9 | 119,3 |

Fuente: Elaboración propia.

10.3.3 Ensayos con cemento asfáltico modificado en 10% con P.V.C. Se realizaron tres (3) ensayos los resultados del primer ensayo se encuentran en la tabla 18. los resultados del segundo ensayo se encuentran en la tabla 19. y los resultados del tres (3) ensayo se encuentran en la Tabla 20.

Tabla 18. Resultado ensayo 1. Viscosidad 10% P.V.C.

| Viscosidad(cP) | Velocidad(RPM) | Torque (%) | Temperatura(°C) |
|----------------|----------------|------------|-----------------|
| 34436,6 | 7,1 | 97,8 | 79,5 |
| 34401,4 | 7,1 | 97,7 | 79,7 |
| 34366,2 | 7,1 | 97,6 | 79,7 |
| 12868,4 | 19 | 97,8 | 89,6 |
| 12789,5 | 19 | 97,2 | 89,7 |
| 12789,5 | 19 | 97,2 | 89,6 |
| 5369,76 | 45,3 | 97,3 | 100,1 |
| 5340,66 | 45,5 | 97,2 | 99,9 |
| 5338,43 | 45,8 | 97,8 | 99,9 |
| 2434,87 | 99,8 | 97,2 | 109,4 |
| 2439,88 | 99,8 | 97,4 | 109,4 |
| 2429,86 | 99,8 | 97 | 109,5 |
| 1228,21 | 195 | 95,8 | 119,6 |
| 1219,23 | 195 | 95,1 | 119,7 |
| 1212,82 | 195 | 94,6 | 119,6 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Resultado ensayo 2. Viscosidad 10% P.V.C.

| Viscosidad(cP) | Velocidad(RPM) | Torque (%) | Temperatura(°C) |
|----------------|----------------|------------|-----------------|
| 33958,3 | 7,2 | 97,8 | 79,6 |
| 33527,4 | 7,3 | 97,9 | 79,6 |
| 33321,9 | 7,3 | 97,3 | 79,9 |
| 12285,4 | 19,8 | 97,3 | 90,1 |
| 12225 | 20 | 97,8 | 89,9 |
| 12137,5 | 20 | 97,1 | 89,9 |
| 5088,54 | 48 | 97,7 | 99,6 |
| 5030,93 | 48,5 | 97,6 | 99,5 |
| 5015,46 | 48,5 | 97,3 | 99,6 |
| 2261,57 | 108 | 97,7 | 110,2 |
| 2250 | 108 | 97,2 | 110,1 |

| Viscosidad(cP) | Velocidad(RPM) | Torque (%) | Temperatura(°C) |
|----------------|----------------|------------|-----------------|
| 2245,41 | 108 | 97,9 | 109,4 |
| 1125,64 | 195 | 87,8 | 119,7 |
| 1121,79 | 195 | 87,5 | 119,7 |
| 1117,95 | 195 | 87,2 | 119,4 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Resultado ensayo 3. Viscosidad 10% P.V.C.

| Viscosidad(cP) | Velocidad(RPM) | Torque (%) | Temperatura(°C) |
|----------------|----------------|------------|-----------------|
| 32500 | 7,5 | 97,5 | 79,6 |
| 32500 | 7,5 | 97,5 | 79,5 |
| 32600 | 7,5 | 97,8 | 79,5 |
| 12512,9 | 19,4 | 97,1 | 89,7 |
| 12423,9 | 19,7 | 97,9 | 89,6 |
| 12360,4 | 19,7 | 97,4 | 89,6 |
| 5142,71 | 47,3 | 97,3 | 99,4 |
| 5098,96 | 48 | 97,9 | 99,6 |
| 5067,71 | 48 | 97,3 | 99,7 |
| 2271,03 | 107 | 97,2 | 109,4 |
| 2275,7 | 107 | 97,4 | 109,3 |
| 2250 | 108 | 97,2 | 109,7 |
| 1100 | 195 | 85,8 | 119,9 |
| 1091,03 | 195 | 85,1 | 119,6 |
| 1076,92 | 195 | 84 | 119,7 |

Fuente: Elaboración propia.

10.3.4 Ensayos con cemento asfáltico modificado en un 15% con P.V.C. Se realizaron tres (3) ensayos los resultados del primer ensayo se encuentran en la tabla 21. los resultados del segundo ensayo se encuentran en la tabla 22. y los resultados del tres (3) ensayo se encuentran en la Tabla 23.

Tabla 21. Resultado ensayo 1. Viscosidad 15% P.V.C.

| Viscosidad(cP) | Velocidad(RPM) | Torque (%) | Temperatura(°C) |
|----------------|----------------|------------|-----------------|
| 41144,1 | 5,9 | 97,1 | 79,6 |
| 40416,7 | 6 | 97 | 79,7 |
| 40625 | 6 | 97,5 | 79,6 |
| 15693,5 | 15,5 | 97,3 | 89,7 |
| 15461,8 | 15,7 | 97,1 | 89,4 |
| 15445,9 | 15,7 | 97 | 89,5 |
| 6506,67 | 37,5 | 97,6 | 99,6 |
| 6473,33 | 37,5 | 97,1 | 99,6 |
| 6486,67 | 37,5 | 97,3 | 99,5 |
| 3178,57 | 77 | 97,9 | 109,4 |
| 3118,59 | 78 | 97,3 | 109,5 |
| 3092,36 | 78,5 | 97,1 | 109,5 |
| 1679,31 | 145 | 97,4 | 119,3 |
| 1653,06 | 145 | 97,2 | 119,8 |
| 1650,34 | 145 | 97,7 | 119,5 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Resultado ensayo 2. Viscosidad 15% P.V.C.

| Viscosidad(cP) | Velocidad(RPM) | Torque (%) | Temperatura(°C) |
|----------------|----------------|------------|-----------------|
| 56802,3 | 4,3 | 97,7 | 79,8 |
| 56569,8 | 4,3 | 97,3 | 79,7 |
| 56395,3 | 4,3 | 97 | 79,7 |
| 20354,2 | 12 | 97,7 | 89,7 |
| 20250 | 12 | 97,2 | 89,5 |
| 20354,2 | 12 | 97,7 | 89,7 |
| 8083,33 | 30 | 97 | 99,6 |
| 7959,02 | 30,5 | 97,1 | 99,5 |
| 7967,21 | 30,5 | 97,2 | 99,3 |
| 3514,39 | 69,5 | 97,7 | 109,3 |
| 3478,57 | 70 | 97,4 | 109,6 |

| Viscosidad(cP) | Velocidad(RPM) | Torque (%) | Temperatura(°C) |
|----------------|----------------|------------|-----------------|
| 3464,54 | 70 | 97,7 | 109,5 |
| 1721,83 | 142 | 97,8 | 119,3 |
| 1713,03 | 142 | 97,3 | 119,4 |
| 1697,55 | 143 | 97,1 | 119,3 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23. Resultado ensayo 3. Viscosidad 15% P.V.C.

| Viscosidad(cP) | Velocidad(RPM) | Torque (%) | Temperatura(°C) |
|----------------|----------------|------------|-----------------|
| 50989,6 | 4,8 | 97,9 | 79,7 |
| 50781,2 | 4,8 | 97,5 | 79,6 |
| 50833,3 | 4,8 | 97,6 | 79,7 |
| 19232,3 | 12,7 | 97,7 | 89,6 |
| 18934,1 | 12,9 | 97,7 | 89,7 |
| 18914,7 | 12,9 | 97,6 | 89,6 |
| 7283,58 | 33,5 | 97,6 | 99,7 |
| 7261,19 | 33,5 | 97,3 | 99,4 |
| 7169,12 | 34 | 97,5 | 99,6 |
| 3165,58 | 77 | 97,5 | 109,8 |
| 3141,11 | 77,6 | 97,5 | 109,7 |
| 3099,49 | 78,4 | 97,2 | 109,7 |
| 1509,26 | 162 | 97,8 | 119,7 |
| 1498,46 | 162 | 97,1 | 119,4 |
| 1492,33 | 163 | 97,3 | 119,7 |

Fuente: Elaboración propia.

10.3.5 Ensayos con cemento asfáltico modificado en un 20% con P.V.C. Se realizaron tres (3) ensayos los resultados del primer ensayo se encuentran en la tabla 24. los resultados del segundo ensayo se encuentran en la tabla 25. y los resultados del tres (3) ensayo se encuentran en la Tabla 26.

Tabla 24. Resultado ensayo 1. Viscosidad 20% P.V.C.

| Viscosidad(cP) | Velocidad(RPM) | Torque (%) | Temperatura(°C) |
|----------------|----------------|------------|-----------------|
| 81500 | 3 | 97,8 | 79,8 |
| 81500 | 3 | 97,8 | 79,5 |
| 81250 | 3 | 97,5 | 79,6 |
| 30854,4 | 7,9 | 97,5 | 89,8 |
| 30216 | 8,1 | 97,9 | 89,7 |
| 30185,2 | 8,1 | 97,8 | 89,6 |
| 12776,3 | 19 | 97,1 | 99,8 |
| 12272,7 | 19,8 | 97,2 | 99,5 |
| 12150 | 20 | 97,2 | 99,5 |
| 5304,35 | 46 | 97,6 | 109,3 |
| 5225,81 | 46,5 | 97,2 | 109,6 |
| 5164,89 | 47 | 97,1 | 109,6 |
| 2571,05 | 95 | 97,7 | 119,4 |
| 2523,2 | 97 | 97,9 | 119,3 |
| 2507,73 | 97 | 97,3 | 119,5 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25. Resultado ensayo 2. Viscosidad 20% P.V.C.

| Viscosidad(cP) | Velocidad(RPM) | Torque (%) | Temperatura(°C) |
|----------------|----------------|------------|-----------------|
| 80833,3 | 3 | 97 | 79,5 |
| 81083,3 | 3 | 97,3 | 79,5 |
| 81250 | 3 | 97,5 | 79,6 |
| 30312,5 | 8 | 97 | 89,7 |
| 29603,7 | 8,2 | 97,1 | 89,5 |
| 29307,2 | 8,3 | 97,3 | 89,4 |
| 11631 | 21 | 97,7 | 99,5 |
| 11654,8 | 21 | 97,9 | 99,5 |
| 11337,2 | 21 | 97,5 | 99,4 |
| 5093,75 | 48 | 97,8 | 109,3 |
| 4994,9 | 49 | 97,9 | 109,7 |
| 4984,69 | 49 | 97,7 | 109,7 |

| Viscosidad(cP) | Velocidad(RPM) | Torque (%) | Temperatura(°C) |
|----------------|----------------|------------|-----------------|
| 2520,62 | 97 | 97,8 | 119,6 |
| 2510,31 | 97 | 97,4 | 119,4 |
| 2489,8 | 98 | 97,6 | 119,4 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Resultado ensayo 3. Viscosidad 20% P.V.C.

| Viscosidad(cP) | Velocidad(RPM) | Torque (%) | Temperatura(°C) |
|----------------|----------------|------------|-----------------|
| 78629 | 3,1 | 97,5 | 79,7 |
| 78548,4 | 3,1 | 97,4 | 79,7 |
| 78629 | 3,1 | 97,5 | 79,7 |
| 28459,3 | 8,6 | 97,9 | 89,5 |
| 28459,3 | 8,6 | 97,9 | 89,5 |
| 28343 | 8,6 | 97,5 | 89,4 |
| 11302,3 | 21,5 | 97,2 | 99,7 |
| 11068,2 | 22 | 97,4 | 99,4 |
| 11068,2 | 22 | 97,4 | 99,6 |
| 4789,22 | 51 | 97,7 | 109,4 |
| 4799,02 | 51 | 97,9 | 109,3 |
| 4682,69 | 52 | 97,2 | 109,3 |
| 2250 | 108 | 97,2 | 119,6 |
| 2261,57 | 108 | 97,7 | 119,7 |
| 2238,53 | 109 | 97,6 | 119,3 |

Fuente: Elaboración propia.

11. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo del trabajo de grado se analizaron los datos recolectados durante los ensayos realizados en el laboratorio de pavimentos, en el ítem 12.1. se detallaron los resultados de la caracterización del cemento asfáltico y a que clasificación pertenece, en el ítem 12.2., se detallaron de los resultados de la caracterización del P.V.C. y en el ítem 12.3., se detalló el resultado de los datos, se analizó y se compararon entre ellos.

11.1 CEMENTO ASFÁLTICO.

El cemento asfáltico utilizado en este proyecto de grado tiene las características descritas en la Tabla 27.

Tabla 27. Clasificación del cemento asfáltico

| Características | Norma de ensayo Invias | Grado de penetración | | | | | |
|--|---------------------------|----------------------|-----|-------|-----|--------|-----|
| | | 40-50 | | 60-70 | | 80-100 | |
| | | Min | Max | Min | Max | Min | Max |
| Asfalto original | | | | | | | |
| Penetración (25°C, 100gr, 5s) 0.1 mm | E-706 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 100 |
| Punto de ablandamiento, °C | E-712 | 52 | 58 | 48 | 54 | 45 | 52 |
| Ductilidad(25°C,5 cm/min), cm | E-702 | 80 | - | 100 | - | 100 | - |
| Punto de inflación mediante copa abierta Cleveland °C | E-709 | 240 | - | 230 | - | 230 | - |

Fuente: Artículo 410 Invias 2013, Pág. 44

El asfalto utilizado para el trabajo de grado clasifica como 60-70 ya que los ensayos realizados coinciden más con los rangos de esta clasificación.

11.2 P.V.C.

Resultados ensayos densidad: 0,83(gr/cm³)

Resultados del ensayo granulométrico del P.V.C. se encuentran en la Tabla 28.

Tabla 28. Resultados Granulometría

| Malla | Abertura(mm) | Peso retenido(gr) | % retenido parcial | % que pasa |
|-------|--------------|-------------------|--------------------|------------|
| N. 4 | 4,75 | 0 | 0 | 100 |
| 10 | 2 | 0 | 0 | 100 |
| 40 | 0,425 | 0 | 0 | 100 |
| 80 | 0,18 | 0,2 | 0,3 | 99,7 |
| 100 | 0,149 | 13,7 | 20,1 | 79,6 |
| 200 | 0,074 | 16,3 | 23,9 | 55,7 |
| Fondo | | 37,9 | 55,7 | 0 |

Fuente: Elaboración propia.

11.3 VISCOSIDAD CEMENTO ASFÁLTICO.

11.3.1 Viscosidad del cemento asfáltico sin modificar. En la Tabla 29. se puede encontrar los datos la viscosidad con respecto a la temperatura en un cemento asfáltico sin modificar y en la Figura 8. se encuentra la gráfica de viscosidad (cP) y temperatura (°C).

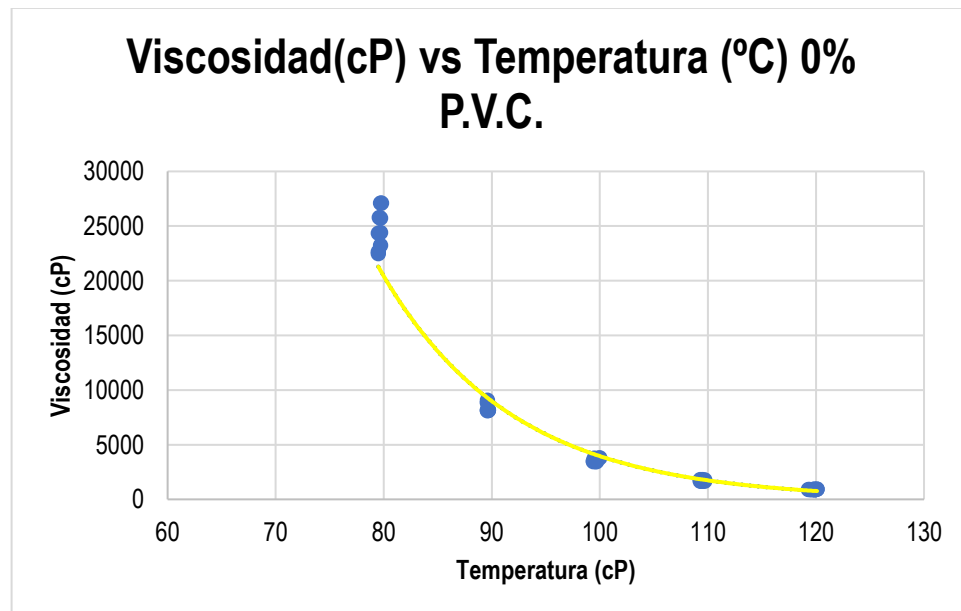
Tabla 29. Datos viscosidad cemento asfáltico sin modificar.

| Temperatura(°C) | Viscosidad(cP) |
|-----------------|----------------|
| 79,7 | 27083,3 |
| 79,7 | 25710,5 |
| 79,5 | 24325,0 |
| 79,8 | 27083,3 |
| 79,6 | 25763,2 |
| 79,7 | 24400,0 |
| 79,7 | 23238,1 |
| 79,5 | 22638,9 |
| 79,5 | 22453,7 |
| 89,7 | 8150,0 |
| 89,6 | 8158,3 |
| 89,6 | 8091,7 |
| 89,6 | 9064,8 |
| 89,6 | 8863,6 |
| 89,6 | 8818,2 |
| 89,6 | 8150,0 |
| 89,7 | 8158,3 |
| 89,7 | 8133,3 |
| 99,6 | 3426,1 |
| 99,4 | 3440,1 |
| 99,7 | 3440,1 |
| 100,0 | 3786,8 |
| 99,9 | 3759,7 |
| 99,5 | 3759,7 |
| 99,6 | 3492,9 |
| 99,4 | 3492,9 |
| 99,5 | 3485,7 |
| 109,7 | 1661,0 |
| 109,4 | 1650,3 |
| 109,5 | 1643,6 |
| 109,3 | 1800,0 |
| 109,5 | 1798,2 |

| Temperatura(°C) | Viscosidad(cP) |
|-----------------|----------------|
| 109,7 | 1783,1 |
| 109,4 | 1674,1 |
| 109,6 | 1677,6 |
| 109,3 | 1666,1 |
| 119,9 | 870,5 |
| 119,9 | 866,7 |
| 119,6 | 868,0 |
| 119,9 | 928,2 |
| 119,8 | 920,5 |
| 120,1 | 920,5 |
| 120,1 | 907,7 |
| 119,4 | 897,4 |
| 119,3 | 892,3 |

Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Viscosidad vs temperatura con 0% P.V.C.



Fuente: Elaboración propia.

Para la realización de la Figura 8 se utilizaron 45 datos de viscosidad, se trazó una línea de tendencia donde se determinó que el tipo de línea de tendencia que mejor se adaptaba a los resultados es el de tipo exponencial. Los datos de viscosidad se encuentran de color azul y la línea de tendencia es de color amarillo.

Para la determinación de la temperatura de mezcla y de compactación en función de la viscosidad se utilizó la ecuación de la curva reológica y la información encontrada en la norma invias donde dice que la viscosidad de mezcla debe ser de 170 ± 20 (cP) y la viscosidad de compactación debe ser de 280 ± 30 (cP).

$$\text{Viscosidad(cP)} = 1E+07e^{-0,082*\text{Temperatura}(\text{°C})}$$

$$170(\text{cP}) = 1E+07e^{-0,082*\text{Temperatura}(\text{°C})} \rightarrow \text{Temperatura}(\text{°C}) \text{ de mezcla} = 133.93 (\text{°C})$$

$$\text{Temperatura}(\text{°C}) \text{ de mezcla} \approx 134 (\text{°C})$$

$$280(\text{cP}) = 1E+07e^{-0,082*\text{Temperatura}(\text{°C})} \rightarrow \text{Temperatura}(\text{°C}) \text{ de compactación} = 127.8 (\text{°C})$$

$$\text{Temperatura}(\text{°C}) \text{ de compactación} \approx 128 (\text{°C})$$

11.3.2 Viscosidad del cemento asfáltico modificado con 5% P.V.C. En la Tabla 30 se puede encontrar los datos la viscosidad con respecto a la temperatura en un cemento asfáltico modificado con 5% de P.V.C. y en la Figura 9 se encuentra la gráfica de viscosidad (cP) y temperatura (°C) con una línea de tendencia exponencial de color verde.

Tabla 30. Datos viscosidad cemento asfáltico con 5% P.V.C.

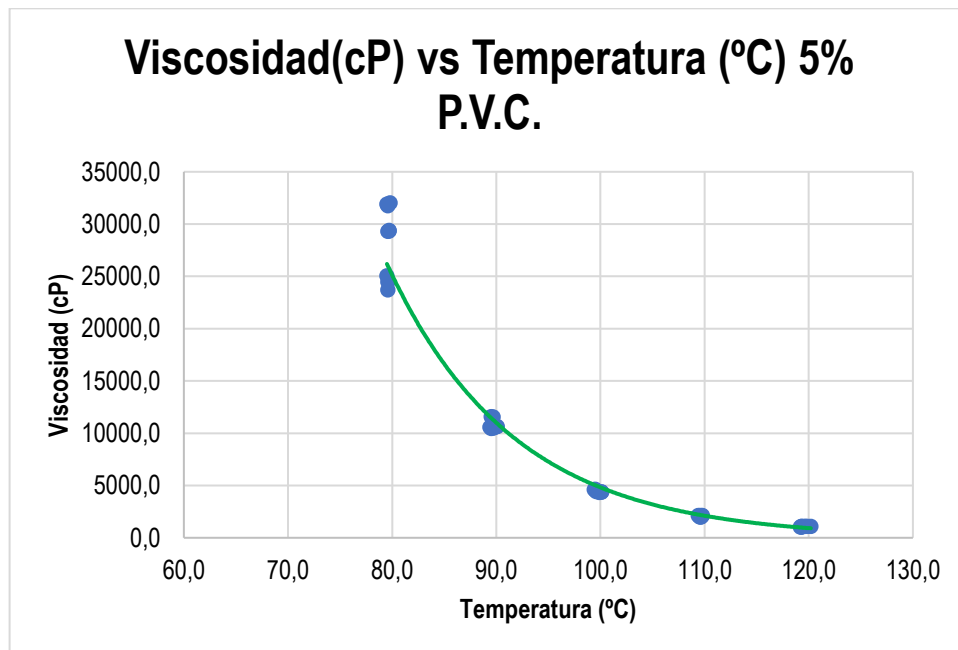
| Temperatura(°C) | Viscosidad(cP) |
|-----------------|----------------|
| 79,6 | 23689,3 |
| 79,6 | 24475,0 |
| 79,5 | 25051,0 |

| Temperatura(°C) | Viscosidad(cP) |
|-----------------|----------------|
| 79,6 | 31753,2 |
| 79,5 | 31907,9 |
| 79,8 | 32006,6 |
| 79,7 | 29397,6 |
| 79,7 | 29337,4 |
| 79,6 | 29307,2 |
| 89,4 | 10565,2 |
| 89,7 | 10482,8 |
| 89,5 | 10439,9 |
| 89,5 | 11571,4 |
| 89,7 | 11547,6 |
| 89,6 | 11438,7 |
| 90,1 | 10641,3 |
| 90,0 | 10630,4 |
| 89,9 | 10608,7 |
| 99,7 | 4450,0 |
| 99,7 | 4427,3 |
| 99,6 | 4413,6 |
| 99,5 | 4617,9 |
| 99,4 | 4589,6 |
| 99,5 | 4580,2 |
| 100,1 | 4385,1 |
| 100,1 | 4362,7 |
| 99,9 | 4330,4 |
| 109,5 | 2119,6 |
| 109,4 | 2108,7 |
| 109,5 | 2087,6 |
| 109,5 | 2004,1 |
| 109,7 | 1989,8 |
| 109,6 | 1971,5 |
| 109,7 | 2121,7 |
| 109,8 | 2113,0 |
| 109,6 | 2092,7 |

| Temperatura(°C) | Viscosidad(cP) |
|-----------------|----------------|
| 119,3 | 1085,9 |
| 119,9 | 1078,2 |
| 120,2 | 1071,8 |
| 119,7 | 1092,3 |
| 119,6 | 1082,1 |
| 119,3 | 1076,9 |
| 119,3 | 1025,6 |
| 119,2 | 1020,5 |
| 119,3 | 1011,5 |

Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Viscosidad vs temperatura con 5% P.V.C.



Fuente: Elaboración propia.

Para la realización de la Figura 9. se utilizaron 45 datos de viscosidad, se trazó una línea de tendencia donde se determinó que el tipo de línea de tendencia que mejor se adaptaba a los resultados es el de tipo exponencial. Los datos de viscosidad se encuentran de color azul y la línea de tendencia es de color verde.

Para la determinación de la temperatura de mezcla y de compactación en función de la viscosidad se utilizó la ecuación de la curva reológica y la información encontrada en la norma invias donde dice que la viscosidad de mezcla debe ser de 170 ± 20 (cP) y la viscosidad de compactación debe ser de 280 ± 30 (cP).

$$\text{Viscosidad(cP)} = 2E+07e^{-0,083*\text{Temperatura}(\text{°C})}$$

$$170(\text{cP}) = 2E+07e^{-0,083*\text{Temperatura}(\text{°C})} \rightarrow \text{Temperatura}(\text{°C}) \text{ de mezcla} = 140.7 (\text{°C})$$

$$\text{Temperatura}(\text{°C}) \text{ de mezcla} \simeq 141 (\text{°C})$$

$$280(\text{cP}) = 2E+07e^{-0,083*\text{Temperatura}(\text{°C})} \rightarrow \text{Temperatura}(\text{°C}) \text{ de compactación} = 134.6(\text{°C})$$

$$\text{Temperatura}(\text{°C}) \text{ de compactación} \simeq 135 (\text{°C})$$

11.3.3 Viscosidad del cemento asfáltico con 10% P.V.C.

Tabla 31. se puede observar los datos la viscosidad con respecto a la temperatura en un cemento asfáltico modificado con 10% de P.V.C. y en la Figura 10. se encuentra la gráfica de viscosidad (cP) y temperatura (°C).

Tabla 31. Datos viscosidad cemento asfáltico con 10% P.V.C.

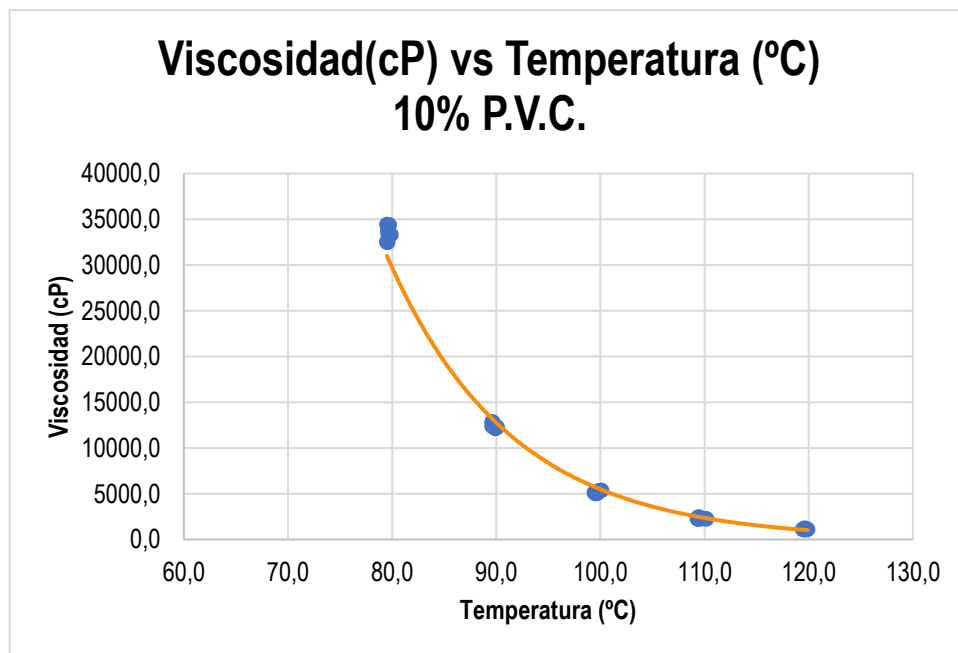
| Temperatura(°C) | Viscosidad(cP) |
|-----------------|----------------|
| 79,5 | 34436,6 |
| 79,7 | 34401,4 |
| 79,7 | 34366,2 |
| 79,6 | 33958,3 |
| 79,6 | 33527,4 |
| 79,9 | 33321,9 |

| Temperatura(°C) | Viscosidad(cP) |
|-----------------|----------------|
| 79,6 | 32500,0 |
| 79,5 | 32500,0 |
| 79,5 | 32600,0 |
| 89,6 | 12868,4 |
| 89,7 | 12789,5 |
| 89,6 | 12789,5 |
| 90,1 | 12285,4 |
| 89,9 | 12225,0 |
| 89,9 | 12137,5 |
| 89,7 | 12512,9 |
| 89,6 | 12423,9 |
| 89,6 | 12360,4 |
| 100,1 | 5369,8 |
| 99,9 | 5340,7 |
| 99,9 | 5338,4 |
| 99,6 | 5088,5 |
| 99,5 | 5030,9 |
| 99,6 | 5015,5 |
| 99,4 | 5142,7 |
| 99,6 | 5099,0 |
| 99,7 | 5067,7 |
| 109,4 | 2434,9 |
| 109,4 | 2439,9 |
| 109,5 | 2429,9 |
| 110,2 | 2261,6 |
| 110,1 | 2250,0 |
| 109,4 | 2245,4 |
| 109,4 | 2271,0 |
| 109,3 | 2275,7 |
| 109,7 | 2250,0 |
| 119,6 | 1228,2 |
| 119,7 | 1219,2 |
| 119,6 | 1212,8 |

| Temperatura(°C) | Viscosidad(cP) |
|-----------------|----------------|
| 119,7 | 1125,6 |
| 119,7 | 1121,8 |
| 119,4 | 1118,0 |
| 119,9 | 1100,0 |
| 119,6 | 1091,0 |
| 119,7 | 1076,9 |

Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Viscosidad vs temperatura con 10% P.V.C.



Fuente: Elaboración propia.

Para la realización de Figura 10. se utilizaron 45 datos de viscosidad, se trazó una línea de tendencia donde se determinó que el tipo de línea de tendencia que mejor se adaptaba a los resultados es el de tipo exponencial. Los datos de viscosidad se encuentran de color azul y la línea de tendencia es de color naranja.

Para la determinación de la temperatura de mezcla y de compactación en función de la viscosidad se utilizó la ecuación de la curva reológica y la información

encontrada en la norma invias donde dice que la viscosidad de mezcla debe ser de 170 ± 20 (cP) y la viscosidad de compactación debe ser de 280 ± 30 (cP).

$$\text{Viscosidad(cP)} = 3E+07e^{-0,084*\text{Temperatura}(\text{°C})}$$

$$170(\text{cP}) = 3E+07e^{-0,084*\text{Temperatura}(\text{°C})} \rightarrow \text{Temperatura}(\text{°C}) \text{ de mezcla} = 143.8 (\text{°C})$$

$$\text{Temperatura}(\text{°C}) \text{ de mezcla} \approx 144 (\text{°C})$$

$$280(\text{cP}) = 3E+07e^{-0,084*\text{Temperatura}(\text{°C})} \rightarrow \text{Temperatura}(\text{°C}) \text{ de compactación} = 137.9 (\text{°C})$$

$$\text{Temperatura}(\text{°C}) \text{ de compactación} \approx 138 (\text{°C})$$

11.3.4 Viscosidad del cemento asfáltico con 15% P.V.C.

En la Tabla 32. se puede encontrar los datos la viscosidad con respecto a la temperatura en un cemento asfáltico modificado con 15% de P.V.C. y en la Figura 11. se encuentra la gráfica de viscosidad (cP) y temperatura (°C) con una línea de tendencia exponencial de color purpura.

Tabla 32. Datos viscosidad cemento asfáltico con 15% P.V.C.

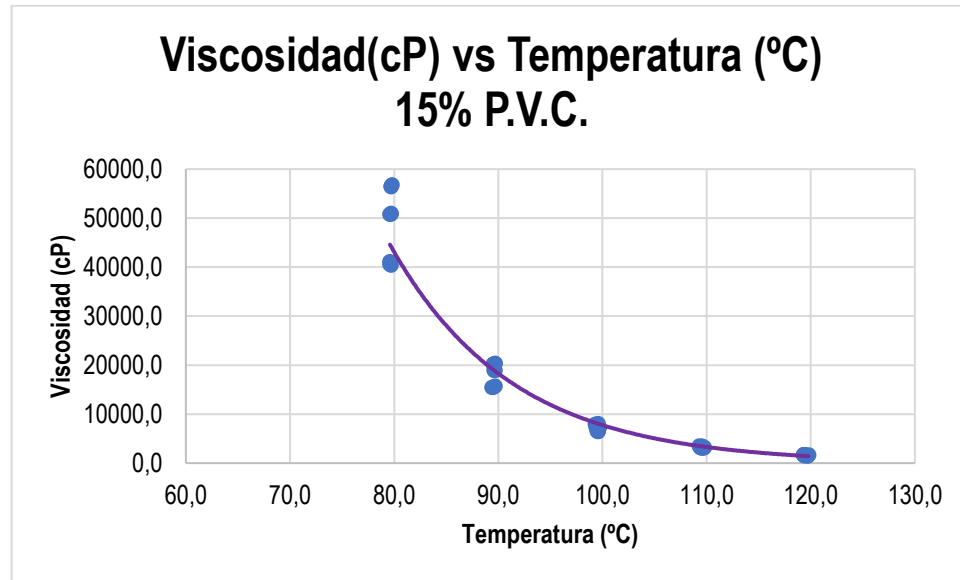
| Temperatura(°C) | Viscosidad(cP) |
|-----------------|----------------|
| 79,6 | 41144,1 |
| 79,7 | 40416,7 |
| 79,6 | 40625,0 |
| 79,8 | 56802,3 |
| 79,7 | 56569,8 |
| 79,7 | 56395,3 |
| 79,7 | 50989,6 |
| 79,6 | 50781,2 |
| 79,7 | 50833,3 |
| 89,7 | 15693,5 |
| 89,4 | 15461,8 |

| Temperatura(°C) | Viscosidad(cP) |
|-----------------|----------------|
| 89,5 | 15445,9 |
| 89,7 | 20354,2 |
| 89,5 | 20250,0 |
| 89,7 | 20354,2 |
| 89,6 | 19232,3 |
| 89,7 | 18934,1 |
| 89,6 | 18914,7 |
| 99,6 | 6506,7 |
| 99,6 | 6473,3 |
| 99,5 | 6486,7 |
| 99,6 | 8083,3 |
| 99,5 | 7959,0 |
| 99,3 | 7967,2 |
| 99,7 | 7283,6 |
| 99,4 | 7261,2 |
| 99,6 | 7169,1 |
| 109,4 | 3178,6 |
| 109,5 | 3118,6 |
| 109,5 | 3092,4 |
| 109,3 | 3514,4 |
| 109,6 | 3478,6 |
| 109,5 | 3464,5 |
| 109,8 | 3165,6 |
| 109,7 | 3141,1 |
| 109,7 | 3099,5 |
| 119,3 | 1679,3 |
| 119,8 | 1653,1 |
| 119,5 | 1650,3 |
| 119,3 | 1721,8 |
| 119,4 | 1713,0 |
| 119,3 | 1697,6 |
| 119,7 | 1509,3 |
| 119,4 | 1498,5 |

| Temperatura(°C) | Viscosidad(cP) |
|-----------------|----------------|
| 119,7 | 1492,3 |

Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Viscosidad Vs. Temperatura con 15% P.V.C.



Fuente: Elaboración propia.

Para la realización de la Figura 11. se utilizaron 45 datos de viscosidad, se trazó una línea de tendencia donde se determinó que el tipo de línea de tendencia que mejor se adaptaba a los resultados es el de tipo exponencial. Los datos de viscosidad se encuentran de color azul y la línea de tendencia es de color púrpura.

Para la determinación de la temperatura de mezcla y de compactación en función de la viscosidad se utilizó la ecuación de la curva reológica y la información encontrada en la norma invias donde dice que la viscosidad de mezcla debe ser de 170 ± 20 (cP) y la viscosidad de compactación debe ser de 280 ± 30 (cP).

$$\text{Viscosidad(cP)} = 4E+07e^{-0,086 \cdot \text{Temperatura(°C)}}$$

$$170(\text{cP}) = 4\text{E}+07e^{-0,086*\text{Temperatura}(\text{°C})} \rightarrow \text{Temperatura}(\text{°C}) \text{ de mezcla} = 143.8 (\text{°C})$$

$$\text{Temperatura}(\text{°C}) \text{ de mezcla} \approx 144 (\text{°C})$$

$$280(\text{cP}) = 4\text{E}+07e^{-0,086*\text{Temperatura}(\text{°C})} \rightarrow \text{Temperatura}(\text{°C}) \text{ de compactación} = 138.1 (\text{°C})$$

$$\text{Temperatura}(\text{°C}) \text{ de compactación} \approx 138 (\text{°C})$$

11.3.5 Viscosidad del cemento asfáltico con 20% de P.V.C. En la Tabla 33. se puede encontrar los datos la viscosidad con respecto a la temperatura en un cemento asfáltico modificado con 20% de P.V.C. y en la Figura 12. se encuentra la gráfica de viscosidad (cP) y temperatura (°C) con una línea de tendencia exponencial de color azul.

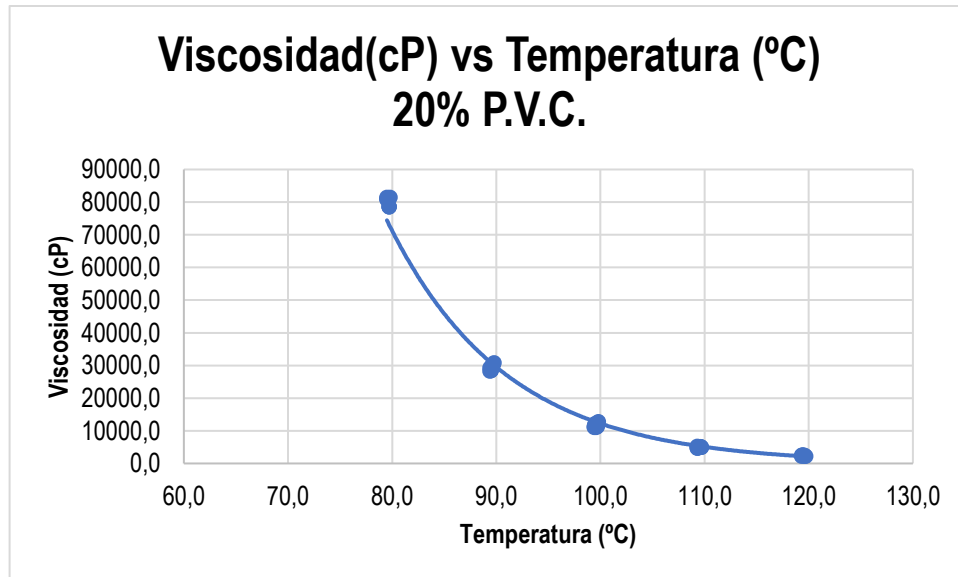
Tabla 33. Datos viscosidad cemento asfáltico con 20% P.V.C.

| Temperatura(°C) | Viscosidad(cP) |
|-----------------|----------------|
| 79,8 | 81500,0 |
| 79,5 | 81500,0 |
| 79,6 | 81250,0 |
| 79,5 | 80833,3 |
| 79,5 | 81083,3 |
| 79,6 | 81250,0 |
| 79,7 | 78629,0 |
| 79,7 | 78548,4 |
| 79,7 | 78629,0 |
| 89,8 | 30854,4 |
| 89,7 | 30216,0 |
| 89,6 | 30185,2 |
| 89,7 | 30312,5 |
| 89,5 | 29603,7 |
| 89,4 | 29307,2 |
| 89,5 | 28459,3 |

| Temperatura(°C) | Viscosidad(cP) |
|-----------------|----------------|
| 89,5 | 28459,3 |
| 89,4 | 28343,0 |
| 99,8 | 12776,3 |
| 99,5 | 12272,7 |
| 99,5 | 12150,0 |
| 99,5 | 11631,0 |
| 99,5 | 11654,8 |
| 99,4 | 11337,2 |
| 99,7 | 11302,3 |
| 99,4 | 11068,2 |
| 99,6 | 11068,2 |
| 109,3 | 5304,4 |
| 109,6 | 5225,8 |
| 109,6 | 5164,9 |
| 109,3 | 5093,8 |
| 109,7 | 4994,9 |
| 109,7 | 4984,7 |
| 109,4 | 4789,2 |
| 109,3 | 4799,0 |
| 109,3 | 4682,7 |
| 119,4 | 2571,1 |
| 119,3 | 2523,2 |
| 119,5 | 2507,7 |
| 119,6 | 2520,6 |
| 119,4 | 2510,3 |
| 119,4 | 2489,8 |
| 119,6 | 2250,0 |
| 119,7 | 2261,6 |
| 119,3 | 2238,5 |

Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Viscosidad Vs Temperatura con 20% P.V.C.



Fuente: Elaboración propia.

Para la realización de la Figura 12. se utilizaron 45 datos de viscosidad, se trazó una línea de tendencia donde se determinó que el tipo de línea de tendencia que mejor se adaptaba a los resultados es el de tipo exponencial. Los datos de viscosidad se encuentran de color azul y la línea de tendencia es de color azul.

Para la determinación de la temperatura de mezcla y de compactación en función de la viscosidad se utilizó la ecuación de la curva reológica y la información encontrada en la norma invias donde dice que la viscosidad de mezcla debe ser de 170 ± 20 (cP) y la viscosidad de compactación debe ser de 280 ± 30 (cP).

$$\text{Viscosidad(cP)} = 8E+07e^{-0,088*\text{Temperatura}(\text{°C})}$$

$$170(\text{cP}) = 8E+07e^{-0,088*\text{Temperatura}(\text{°C})} \rightarrow \text{Temperatura}(\text{°C}) \text{ de mezcla} = 148.4 (\text{°C})$$

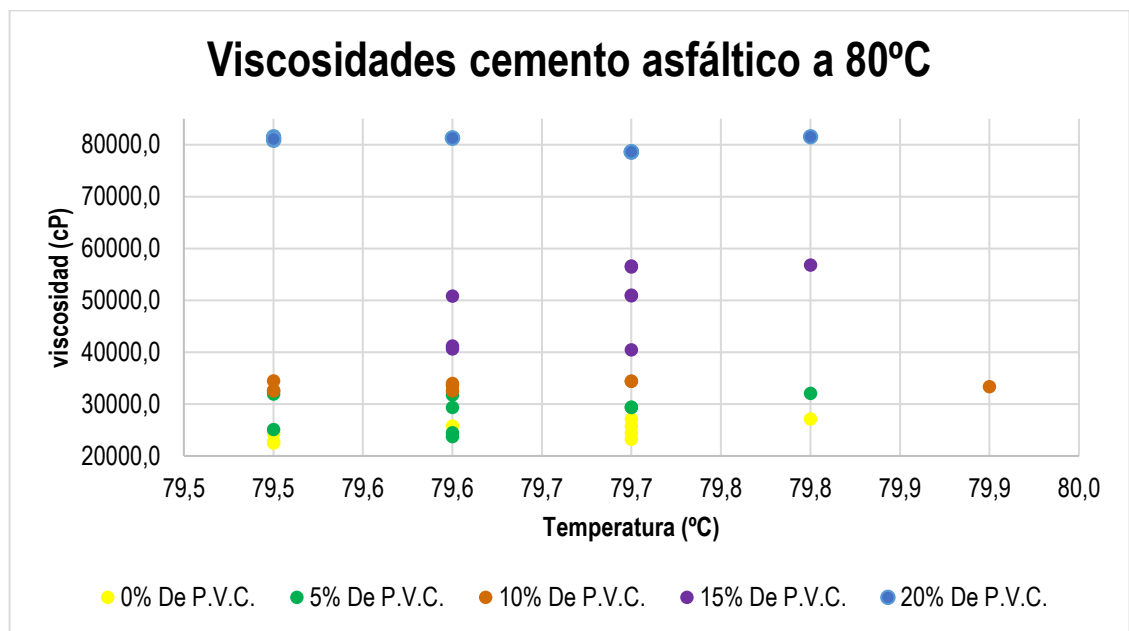
$$\text{Temperatura}(\text{°C}) \text{ de mezcla} \approx 148 (\text{°C})$$

$$280(\text{cP}) = 8E+07e^{-0,088*\text{Temperatura}(\text{°C})} \rightarrow \text{Temperatura}(\text{°C}) \text{ de compactación} = 142.7 (\text{°C})$$

$$\text{Temperatura}(\text{°C}) \text{ de compactación} \approx 143(\text{°C})$$

11.3.6 Comparación viscosidad del cemento asfáltico sin modificar y modificado con 5%, 10%, 15% y 20% de P.V.C. La Figura 13. Es una gráfica donde se puede apreciar la comparación de viscosidades de todas las muestras a 80°C.

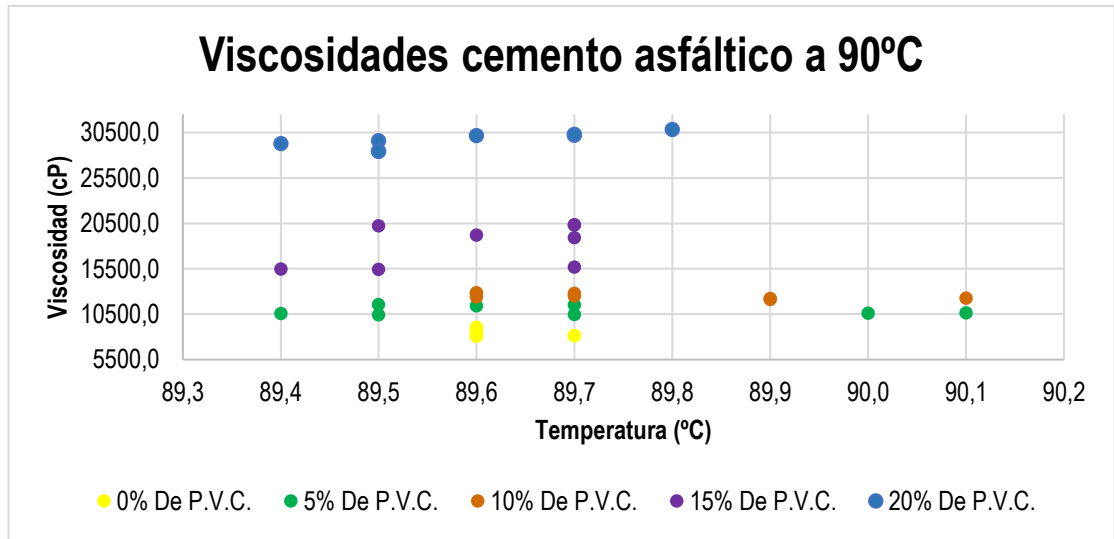
Figura 13. Comparación de viscosidades 80°C



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 14. Es una gráfica donde se puede apreciar la comparación de viscosidades de todas las muestras a 90°C.

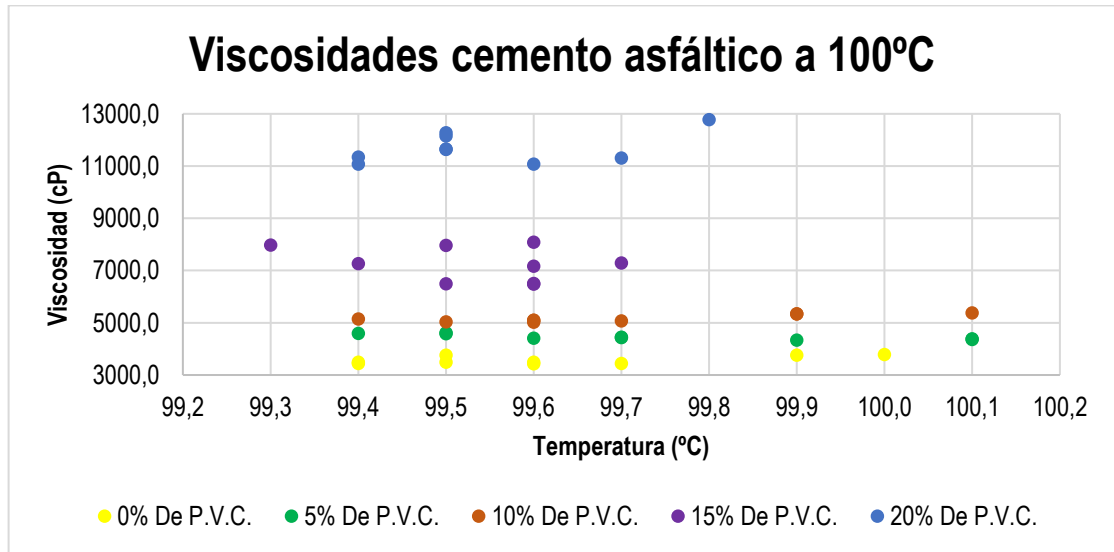
Figura 14. Comparación de viscosidades 90°C



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 15. Es una gráfica donde se puede apreciar la comparación de viscosidades de todas las muestras a 100°C.

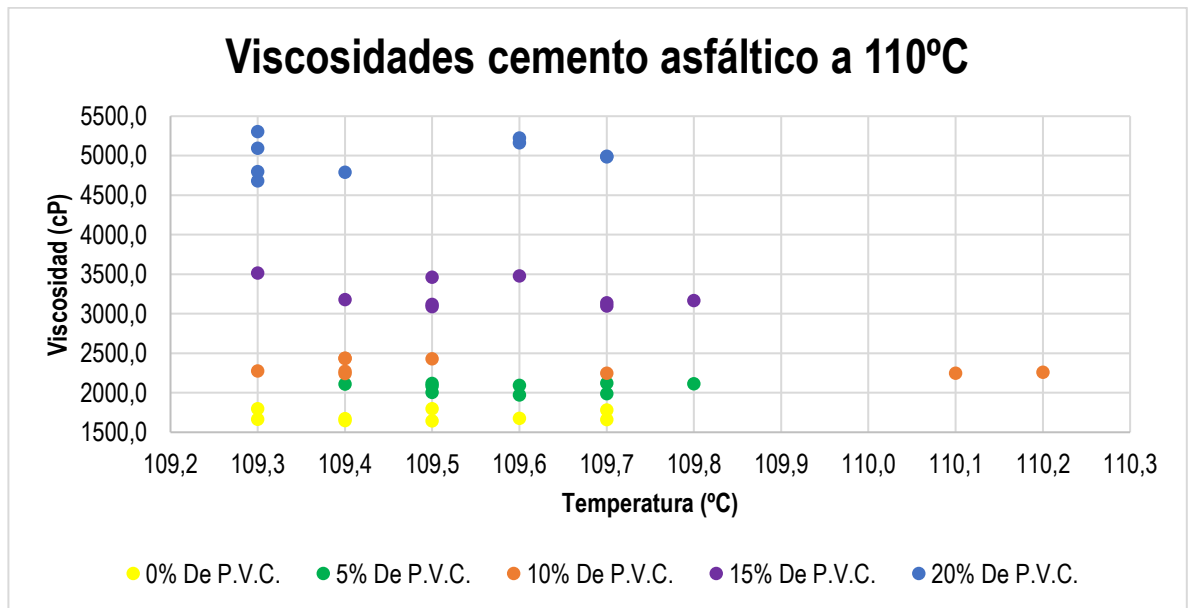
Figura 15. Comparación de viscosidades a 100°C



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 16. Es una gráfica donde se puede apreciar la comparación de viscosidades de todas las muestras a 110°C.

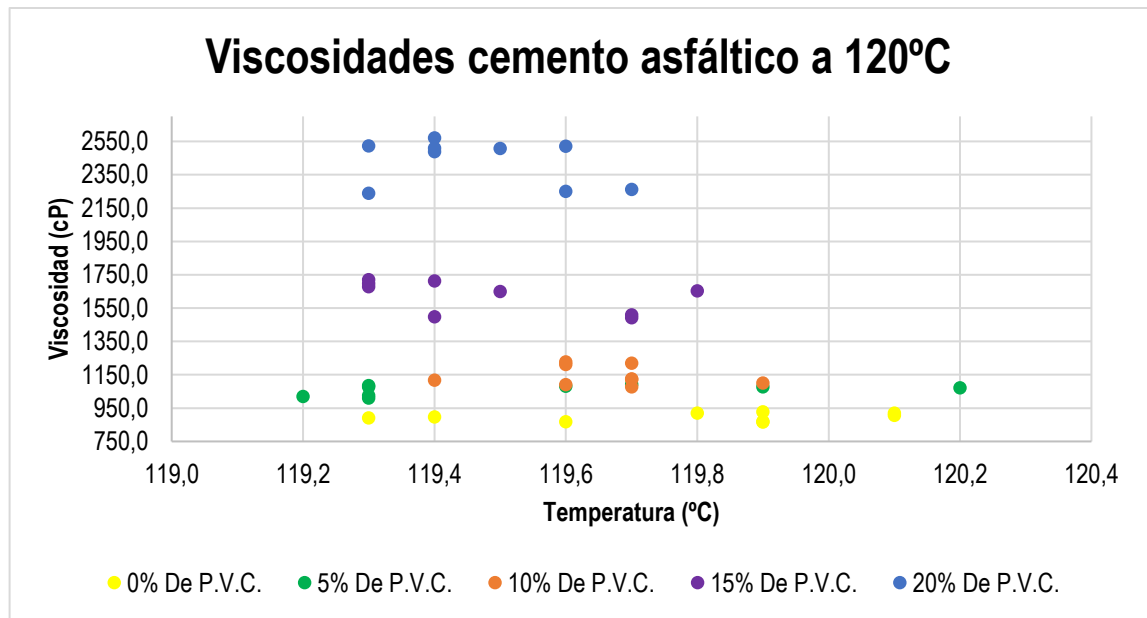
Figura 16. Comparación de viscosidades A 110°C



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 17. Es una gráfica donde se puede apreciar la comparación de viscosidades de todas las muestras a 120°C.

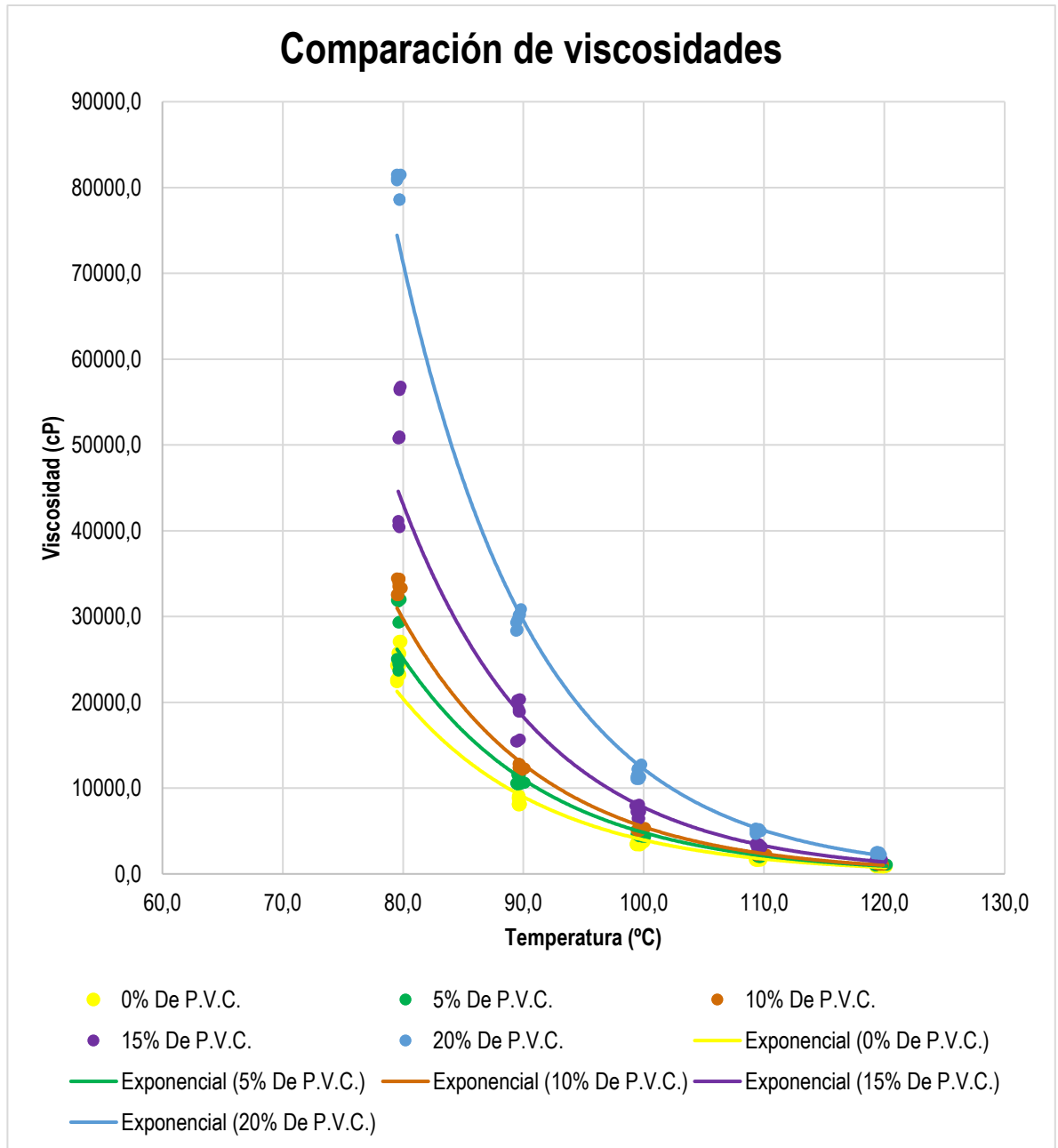
Figura 17. Comparación de viscosidades a 120°C



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 18. Se puede observar todos los datos graficados, en total 225 datos sobre viscosidad. Adicionalmente se agregó una línea de tendencia de tipo exponencial para comparar más claramente cada tipo de cemento asfáltico modificado con P.V.C.

Figura 18. Comparación viscosidad



Fuente: Elaboración propia.

Los análisis de los datos de viscosidad se analizaron de la siguiente forma: Se tomaron todos los datos del ensayo, se clasificarán los datos por sus respectivas temperaturas, lo que nos deja con 9 datos por temperatura, de estos datos se

determinó el rango de resultados y el promedio de la viscosidad. Una vez obtenidos estos datos se puede realizar una comparación de las viscosidades.

Los datos de viscosidad del cemento asfáltico para la muestra sin alterar dieron como resultado para una temperatura de 80°C un rango de (22453,7 cP-27083,3 cP) y una viscosidad promedio de 24744 cP. Para la temperatura de 90°C el rango de viscosidad es de (8091,7 cP-9064,8 cP) y su viscosidad promedio es de 8398,7 cP. Para la temperatura de 100°C el rango de viscosidad es de (3426,1 cP- 3786,8) y su viscosidad promedio es de 3564,9 cP. Para la temperatura de 110°C el rango de viscosidad es de (1643,6 cP- 1800 cP) y su viscosidad promedio es de 1706 cP. Para la temperatura de 120°C el rango de viscosidades es de (866,7 cP- 928,2 cP) y su viscosidad promedio es de 896,9 cP.

Para las muestras alteradas con un 5% de P.V.C. los rangos de viscosidad a una temperatura de 80°C es de (23689,3 cP-32006,6 cP) y su viscosidad promedio es de 28547,2 cP. Para la temperatura de 90°C los rangos de viscosidad son (10439,9 cP-11571,4 cP) y su viscosidad promedio es de 10880,6 cP. Para la temperatura de 100°C los rangos de viscosidad son (4330,4 cP- 4617,9 cP) y su viscosidad promedio es de 4461,9 cP. Para la temperatura de 110°C los rangos de viscosidad son de (1971,5 cP-2121,7 cP) y su viscosidad promedio es de 2067,6 cP. Para una temperatura de 120°C los rangos de viscosidades fueron de (1011,5 cP -1092,3 cP) y su viscosidad promedio es de 1060,5 cP.

Para las muestras que fueron alteradas con un 10% de P.V.C. los rangos de viscosidad a una temperatura de 80°C fueron de (32500 cP-34436,6 cP) y su viscosidad promedio es de 33512,2 cP. Para una temperatura de 90°C los rangos de viscosidad son (12137,7 cP-12868,4 cP) y su viscosidad promedio es de 12488,0 cP. Para la temperatura de 100°C los rangos de viscosidad son (5015,5 cP- 5369,8 cP) y su viscosidad promedio es de 5165,9. Para una temperatura de 110°C los rangos de viscosidad son (2245,4 cP-2439,9 cP) y su viscosidad promedio es de

2317,6 cP. Para una temperatura de 120°C los rangos de viscosidad son (1076,9 cP- 1228,2 cP) y su viscosidad promedio es de 1143,7 cP.

Para las muestras alteradas con un 15% de P.V.C. a una temperatura de 80°C tiene el rango de viscosidad (40416,7 cP-56802,3 cP) y una viscosidad promedio de 49395,3 cP. Para una temperatura de 90°C los rangos de viscosidad son (15445,9 cP- 20354,2 cP) y su viscosidad promedio es de 18293,2 cP. Para una temperatura de 100°C los rangos de viscosidad son de (6473,3 cP-8083,3 cP) y su viscosidad promedio es de 7243,3 cP. Para una temperatura de 110°C Los rangos de viscosidad son de (3092,4 cP-3514,4 cP) y una viscosidad promedio de 3250,4 cP. Para una temperatura de 120°C los rangos de viscosidad son (1492,3 cP- 1721,8cp) y su viscosidad promedio es de 1623,9 cP.

Para las muestras alteradas con un 20% de P.V.C. a una temperatura de 80°C el rango de viscosidad es de (78548,4 cP-81500 cP) y su viscosidad promedio es de 80358,1 cP. Para una temperatura de 90°C los rangos de viscosidad son (28343,0 cP- 30854,4 cP) y su viscosidad promedio es de 29526,7 cP. Para una temperatura de 100°C los rangos de viscosidad son de (11068,2 cP- 12776,3 cP) y su viscosidad promedio es de 11695,6 cP. Para una temperatura de 110°C los rangos de viscosidad son de (4682,7 cP-5304,4 cP) y su viscosidad promedio es de 5004,4 cP. Para la temperatura de 120°C los rangos de viscosidad son (2238,5 cP- 2571,1 cP) y su viscosidad promedio es de 2430,3 cP.

Para poder comparar los resultados de los ensayos de viscosidades se utilizaron dos datos el rango de viscosidad y el promedio de las viscosidades obtenidas.

En la Tabla 34. se puede observar la comparación de viscosidades de muestras alteradas con un 0%, 5%, 10%, 15% y 20% de P.V.C, todas a una temperatura de 80°C.

Tabla 34. Viscosidades a 80°C

| Temperatura 80°C | | | | | | | | | |
|---------------------|-----------------------------|---|-----------------------------|---|---------------------------|---|-----------------------------|---|---------------------------|
| | 0% de P.V.C. | | 5% de P.V.C. | | 10% de P.V.C. | | 15% de P.V.C. | | 20% de P.V.C. |
| Rango de viscosidad | (22453,7 cP- 27083,3 cP) | ≤ | (23689,3 cP- 32006,6 cP) | < | (32500 cP- 34436,6 cP) | < | (40416,7 cP- 56802,3 cP) | < | (78548,4 cP- 81500 cP) |
| Viscosidad promedio | 24744 cP | < | 28547,2 cP | < | 33512,2 cP | < | 49395,3 cP | < | 80358,1 cP |

Fuente: Elaboración propia.

Comparando los datos obtenidos se puede concluir que a la temperatura de 80°C el cemento asfáltico que menor viscosidad obtuvo es el que no fue alterado con P.V.C., seguido del que fue alterado con 5%, después el de 10%, 15% y el más viscoso a 80°C es el de 20% de P.V.C.

En la Tabla 35. se puede observar la comparación de viscosidades de muestras alteradas con un 0%, 5%, 10%, 15% y 20% de P.V.C, todas a una temperatura de 90°C.

Tabla 35. Viscosidades a 90°C

| Temperatura 90°C | | | | | | | | | |
|---------------------|---------------------------|---|-----------------------------|---|-----------------------------|---|-----------------------------|---|-----------------------------|
| | 0% de P.V.C. | | 5% de P.V.C. | | 10% de P.V.C. | | 15% de P.V.C. | | 20% de P.V.C. |
| Rango de viscosidad | (8091,7 cP- 9064,8 cP) | < | (10439,9 cP- 11571,4 cP) | < | (12137,7 cP- 12868,4 cP) | < | (15445,9 cP- 20354,2 cP) | < | (28343,0 cP- 30854,4 cP) |
| Viscosidad promedio | 8398,7 cP | < | 10880,6 cP | < | 12488,0 cP | < | 18293,2 cP | < | 29526,7 cP |

Fuente: Elaboración propia.

Comparando los datos obtenidos durante los ensayos a la temperatura de 90°C se puede determinar que la muestra menos viscosa ensayada fue la de 0% de P.V.C. seguido de 5%, 10%, 15% y 20% respectivamente.

En la Tabla 36 se puede observar el resultado de las viscosidades de las muestras de cemento asfáltico con 0%, 5%, 10%, 15% y 20% de P.V.C. a una temperatura de 100°C.

Tabla 36. Viscosidades a 100°C

| Temperatura 100°C | | | | | | | | | |
|---------------------|---------------------------|---|---------------------------|---|---------------------------|---|---------------------------|---|-----------------------------|
| | 0% de P.V.C. | < | 5% de P.V.C. | < | 10% de P.V.C. | < | 15% de P.V.C. | < | 20% de P.V.C. |
| Rango de viscosidad | (3426,1 cP- 3786,8 cP) | < | (4330,4 cP- 4617,9 cP) | < | (5015,5 cP- 5369,8 cP) | < | (6473,3 cP- 8083,3 cP) | < | (11068,2 cP- 12776,3 cP) |
| Viscosidad promedio | 3564,9 cP | < | 4461,9 cP | < | 5165,9 cP | < | 7243,3 cP. | < | 11695,6 cP |

Fuente: Elaboración propia.

Comparando los datos que se obtuvieron de los ensayos de viscosidad a una temperatura de 100°C se determinó que la muestra de menor viscosidad es la muestra con 0% de P.V.C. seguido de 5%, 10%, 15%, y 20% respectivamente.

En la Tabla 37 se observa el resultado de los ensayos de viscosidades de las muestras de cemento asfáltico con 0%, 5%, 10%, 15% y 20% de P.V.C. a una temperatura de 110°C.

Tabla 37. Viscosidades a 110°C

| Temperatura 110°C | | | | | | | | | |
|---------------------|-------------------------|---|---------------------------|---|---------------------------|---|---------------------------|---|---------------------------|
| | 0% de P.V.C. | < | 5% de P.V.C. | < | 10% de P.V.C. | < | 15% de P.V.C. | < | 20% de P.V.C. |
| Rango de viscosidad | (1643,6 cP- 1800 cP) | < | (1971,5 cP- 2121,7 cP) | < | (2245,4 cP- 2439,9 cP) | < | (3092,4 cP- 3514,4 cP) | < | (4682,7 cP- 5304,4 cP) |
| Viscosidad promedio | 1706 cP | < | de 2067,6 cP | < | 2317,6 cP | < | 3250,4 cP | < | 5004,4 cP |

Fuente: Elaboración propia.

Realizando una comparación entre las viscosidades a 110°C se determinó que las muestras con menor viscosidad fueron las muestras con 0% de P.V.C. seguido de 5%, 10%, 15% y 20% respectivamente.

En la Tabla 38. se observa el resultado de los ensayos de viscosidades de las muestras de cemento asfáltico con 0%, 5%, 10%, 15% y 20% de P.V.C. a una temperatura de 120°C.

Tabla 38. Viscosidades a 120°C

| Temperatura 120°C | | | | | | | | | |
|---------------------|-------------------------|---|----------------------------|---|---------------------------|---|---------------------------|---|---------------------------|
| | 0% de P.V.C. | | 5% de P.V.C. | | 10% de P.V.C. | | 15% de P.V.C. | | 20% de P.V.C. |
| Rango de viscosidad | (866,7 cP- 928,2 cP) | < | (1011,5 cP - 1092,3 cP) | ≤ | (1076,9 cP- 1228,2 cP) | < | (1492,3 cP- 1721,8 cP) | < | (2238,5 cP- 2571,1 cP) |
| Viscosidad promedio | 896,9 cP | < | 1060,5 cP | < | 1143,7 cP | < | 1623,9 cP | < | 2430,3 cP |

Fuente: Elaboración propia.

Comparando las viscosidades de las muestras a 120°C se determinó que la muestra menos viscosa es la muestra con un 0% de P.V.C. seguido por 5%, 10%, 15% y 20% respectivamente.

12. CONCLUSIONES

- Mediante los ensayos de caracterización se pudo determinar que el cemento asfáltico utilizado en el trabajo de grado es de clasificación 60-70 por que los resultados de los ensayos se encuentran en los rangos de esta clasificación.
- Se logró modificar el cemento asfáltico adicionándole P.V.C. elaborando muestras modificadas con un 5%, 10%, 15% y 20% de P.V.C.
- Se determinó la viscosidad del cemento asfáltico modificado y sin modificar a las temperaturas de 80°C, 90°C, 100°C, 110°C y 120°C.
- Se logró elaborar un total de cinco (5) tipos de curvas reológicas. Con cemento asfáltico sin modificar y modificado en un 5%, 10%, 15% Y 20% con P.V.C
- Mediante la comparación de las diferentes curvas reológicas y las tablas de rangos de viscosidades y viscosidades promedio se determinó que el cemento asfáltico presenta una viscosidad mayor entre más cantidad de P.V.C. contenga de manera que la muestra con mayor viscosidad en todos los ensayos fue la de 20% de contenido de P.V.C. y la muestra que presento las viscosidades más bajas fue la del cemento asfáltico sin modificar.
- El cemento asfáltico con mayor porcentaje de P.V.C. necesita una temperatura mayor para la mezcla y compactación, haciendo que se consuma más energía para la elaboración de estas mezclas asfálticas.
- Mediante la curva reológica y su ecuación de tipo exponencial se logró determinar la temperatura de mezcla y temperatura de compactación de todos los tipos de muestras analizadas.

13. RECOMENDACIONES.

- Se recomienda la utilización de protección respiratoria si el cemento asfáltico será calentado a más de 80°C y de igual forma la utilización de guantes y gafas de protección.
- Al empezar a realizar los ensayos con el viscosímetro Brookfield es necesario realizar un autocero lo cual consiste en que la máquina hace rotar la rosca donde se pone la aguja. Es importante verificar que la pieza que rodea esta rosca en ningún momento toque la rosca ya que el aparato se encuentra verificando el torque y al tocarla modificará el torque mínimo de la máquina lo que se traduce en errores en la toma de datos arruinando el ensayo.
- En el viscosímetro Brookfield existe un cable del equipo que va conectado del controlador de temperatura al computador si se omite la conexión de este cable se podrá variar la temperatura por medio del controlador de temperatura, pero sí en cambio es conectado este cable la modificación de la temperatura solo será posible mediante la computadora.
- En la realización del ensayo de viscosidad se recomienda esperar al menos 10 minutos una vez que la termocelda alcanza la temperatura indicada ya que la muestra aún no se encuentra a la misma temperatura.

BIBLIOGRAFÍA

American Chemistry Council. Disponible en: www.chemicalsafetyfacts.org.
Obtenido de www.chemicalsafetyfacts.org/es/cloruro-de-polivinilo

Asopac. Cartilla del pavimento asfáltico. Asociación de productores y pavimentadores asfálticos de Colombia, 8-9. 2004

DINERO.COM COPYRIGHT©2010 PUBLICACIONES SEMANA S.A. Nuevas tecnologías para los asfaltos del país. DINERO. 2013

Fonseca, A. M. Ingeniería de pavimentos fundamentos, estudios básicos y diseño. Bogotá: Universidad católica de Colombia ediciones y publicaciones. 2002

Reyes Lizcano, Fredy Alberto C. G. Comportamiento de un cemento asfáltico. Revista Ingenierías Universidad de Medellín. 2013

G., O. R. Introducción a la reología. En O. R. G., Cuaderno Firp s520-b (pág. 21). Merida: Universidad de los andes. 1999

R. Q., Hugo Alexander. Comportamiento de una mezcla densa de asfalto en caliente. Ciencia e Ingeniería Neogranadina vol 18-2, 29-43. 2008

Cardenas, Jaleydy. E. F. Modelación del comportamiento reológico del asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura. EIA, 127. 2009

Makino, T. PVC and environmental issues. journal of the Japan Society of Polymer Processing. 1998

G. E. Martina. Reología de ligantes asfálticos mediante el viscosímetro Brookfield. LEMac Centro de investigaciones viales. 2009

Otero, A. V. Universidad de Salamanca. Obtenido de Escuela Politécnica Superior de Ávila: Disponible en: <http://ocw.usal.es/enseñanzas-tecnicas/ciencia-y-tecnologia-de-los-materiales/contenido/TEMA%207-%20MATERIALES%20BITUMINOSOS.pdf>

Palencia, V. Nuevas tecnologías para los asfaltos del país. Dinero. 2013

Sabogal, F. S. Introducción al diseño de pavimentos. Obtenido de copernico escuelaing: Disponible en: http://copernico.esuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/CONTENIDO%20CURSO.pdf

Guitierrez, Steffany. R. G. Manual de usuario equipo viscosímetro de brookfield. Bucaramanga. 2016

The European Council of Vinyl Manufacturers. PVC. 14 de 08 de 2014. Obtenido de vinylplus: Disponible en: <http://www.pvc.org/en/p/history>.

Titow, M. PVC Technology. Elsevier applied science publishers. 2011

Universidad Mayor de San Simón facultad de ciencia y tecnología. Pavimentos texto guía. Cochabamba: Universidad Mayor de San Simón. 2004