

**“EFECTO DE LA ARCILLA CALCINADA EN UN ASFALTO 80/100
MODIFICADO CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO”**

Presentado por:

WILLIAM JAVIER ANDRADE MARTÍNEZ.

DIEGO ARMANDO MURCIA SÁNCHEZ

Estudiantes de pregrado del programa de ingeniería civil

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA.
FACULTAD INGENIERIA CIVIL.
BOGOTÁ, COLOMBIA
MARZO DE 2013.**

**“EFECTO DE LA ARCILLA CALCINADA EN UN ASFALTO 80/100
MODIFICADO CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO”**

Presentado por:

WILLIAM JAVIER ANDRADE MARTÍNEZ.

DIEGO ARMANDO MURCIA SÁNCHEZ.

Proyecto de grado requisito para obtener el título de ingeniero civil

Asesor:

INGENIERO CIVIL GILBERTO MARTÍNEZ ARGUELLES

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA.
FACULTAD INGENIERIA CIVIL.
BOGOTÁ, COLOMBIA
MARZO DE 2013.**

Nota de aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá (18, 03,2013).

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la colaboración de mis padres y amigos William Andrade y Consuelo Martínez por todo su apoyo en este proceso, al laboratorista Oliverio Pinzón por toda su colaboración y al ingeniero Gilberto Martínez.

Agradecimiento especial al profesor Sergio Gaviria Melo de la Universidad Nacional, por su valiosa entrevista y colaboración desinteresada.

William Javier Andrade Martínez.

Me gustaría expresar en estas líneas profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la elaboración de este proyecto de grado, en especial al asesor en esta investigación, por su orientación y seguimiento de la misma, sobre todo por la motivación y el apoyo recibido a lo largo de estos años.

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de contar con las personas que fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de este proyecto de grado y de mi carrera profesional. A mis padres que me apoyaron y me enseñaron el valor de la responsabilidad, a mis amigos y a Johanna Acosta; quien es la inspiración y fortaleza para poder alcanzar mis sueños.

Diego Armando Murcia Sánchez.

Queremos expresar fraternales agradecimientos al ingeniero Gilberto Martínez Arguelles por ser el director en este proceso de grado; se debe destacar, su disponibilidad, paciencia y participación mientras realizaba su doctorado en Italia.

RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad comparar las características físicas y reológicas de un asfalto 80/100, modificado con 18% P/P constante de grano de caucho reciclado*, y con adiciones de arcilla calcinada al 5%, 10%, 15%, 20% y 25% P/P respecto al ligante.

En busca de lograr las condiciones óptimas del asfalto modificado, se demostró en esta investigación, cómo una mezcla asfáltica con grano de caucho reciclado aplicado en caliente por vía húmeda, alcanzó un mayor rendimiento adicionándole llenante mineral en diferentes proporciones, alterando algunas características del ligante. El asfalto 80/100 se modificó con grano de caucho, siguiendo la especificación **ET-GE.002 v1.0** del *Instituto de Desarrollo Urbano (IDU)*, en la cual se estipula “que el grano de caucho reciclado podrá ser del troceado de llantas, deberá ser uniforme, libre de metal, fibras textiles u otros contaminantes, estará seco y tendrá un tamaño inferior a 595μ (pasante del tamiz No 30)”¹. Siguiendo las especificaciones y condiciones establecidas, se implementó un GCR pasante al tamiz N°40 proporcionando mayor versatilidad al momento de mezclarlo. La llenante mineral fue obtenida como residuo en la fabricación del ladrillo. Este material cumplió con los parámetros establecidos en las especificaciones de INVIAS en el artículo 400-07, en donde se estipula que el tamaño de la “llenante mineral empleada en la elaboración de lechadas asfálticas, se deberá encontrar entre cinco y once décimas de gramo por centímetro cúbico (0.5 y 1.1 g/cm³). La llenante mineral total de la fórmula de trabajo obtenida aplica para diseños de mezclas asfálticas densas, semidensas y gruesas en proyectos con niveles de tránsito NT2 y NT3”². La granulometría aquí mencionada corresponde al material pasante del tamiz N° 200.

La modificación que obtuvo mejor comportamiento fue el asfalto caucho con 25% P/P de arcilla calcinada, considerada así como la modificación óptima obtenida. Las pruebas de laboratorio que se realizaron para la caracterización física fueron penetración, punto de ablandamiento, índice de penetración, stripping y

(*) GCR.

¹INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificación técnica para la aplicación del grano de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas en caliente por vía húmeda. ET GE 002. Bogotá D.C. El Instituto. 2011. 4 p.

² INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (INVIAS). Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos. ARTICULO 400 – 07- Bogotá D.C. El Instituto. 2007. 6 p.

adherencia en bandeja. Para el ensayo de penetración se denotó una reducción significativa en el resultado del 43,2% de la modificación óptima respecto al asfalto sin modificar. Así mismo para la temperatura del punto de ablandamiento se denotó un aumento del 25,84% de la modificación óptima respecto al ligante. De esta manera el índice de penetración del ligante para el asfalto sin modificar fue de $-0,619$ y para la modificación óptima fue de $0,93$, aquí se pudo observar claramente una reducción eficiente de la susceptibilidad térmica. La adherencia en aumentó notablemente adicionando el porcentaje óptimo del filler y la acción del agua sobre la película que cubre el agregado fue menor respecto a la muestra sin modificar. A través de estos resultados se estableció que la modificación óptima presenta mejores condiciones de las propiedades físicas analizadas.

Para las propiedades reológicas se realizó el ensayo de viscosidad rotacional Brookfield, se obtuvo un aumento considerable de viscosidad de la modificación óptima respecto a la del ligante. Por tal motivo la temperatura de compactación y de mezclado, también aumentaron considerablemente. Adicionalmente de haber comparado las propiedades físicas y reológicas, se tomaron fotografías microscópicas de barrido electrónico (SEM), y se realizó un estudio de las condiciones morfológicas y de composición química en las que se encontraban inicialmente los residuos sólidos utilizados en las modificaciones.

Se recomienda realizar estudios que incluyan el análisis de las propiedades mecánicas con porcentajes de adición de arcilla calcinada de 25% P/P y mayores a los implementados en este proyecto, para un asfalto 80/100 modificado con 18% P/P de GCR, para seguir fortaleciendo el campo de la investigación a través del reciclaje de residuos sólidos, ya que es de vital importancia disminuir el impacto ambiental.

Palabras claves: Arcilla calcinada, asfalto 80/100, grano de caucho reciclado, reología.

ABSTRACT

This project aims to compare the physical and rheological characteristics of asphalt 80/100, modified with 18% P / P constant recycled rubber grain *, and calcined clay additions of 5%, 10%, 15%, 20% and 25% W/W regard to binder.

In search to achieve the optimum conditions of modified asphalt, was demonstrated in this study, how an asphalt mixture with recycled rubber grain applied hot wet, achieved greater performance adding mineral filler in different proportions, altering some features of the binder. Asphalt 80/100 was modified with rubber grain, following ET-GE.002 specification v1.0 from Urban Development Institute (IDU), which provides "that the recycled rubber grain can be tire butchering , should be uniform, free of metal, textiles or other contaminants, will be dry and smaller than 595μ (intern sieve No. 30) ". Following the specifications and conditions, was implemented an intern at GCR sieve No. 40 providing greater versatility when mixing. The mineral filler was obtained as residue in the manufacture of bricks. This material met the parameters of INVIAS specifications in Article 400-07, which stipulates that the size of the "mineral filler used in the preparation of slurry seal, you must find between five and eleven tenths of a gram per cubic centimeter (0.5 to 1.1 g/cm³). The total mineral filler out working formula applied to dense asphalt mix designs, semi dense and thick on projects with traffic levels NT2 and NT3 ". The grain size corresponds to the material contained herein intern sieve No. 200.

The modification to obtained improve behavior was the rubber asphalt with 25% P/P calcined clay, and considered as optimal modification obtained. Laboratory tests were performed for physical characterization were penetration, softening point, penetration, and adhesion stripping tray. For the penetration test is denoted a significant reduction in the output of 43.2% from the optimal modification compared to unmodified asphalt.

Likewise for softening point temperature was denoted an increase of 25.84% of optimal modification respect to the binder. Hence the penetration index of the binder to the unmodified asphalt was -0.619 and the optimum modification was 0.93, was observed here clearly an efficient reduction of the thermal sensitivity. The adhesion increased significantly by adding the optimum level of filler and the action of water on the film covering the aggregate was lower for the sample

unchanged. Through these results, it was established that the optimal modification has better physical properties tested.

For the rheological properties Brookfield rotational viscosity test was performed, a considerable increase in viscosity of the optimal modification was obtained with respect to of the binder. Therefore compaction temperature and mixing, also increased significantly. Additionally after the physical and rheological properties were compared, photographs were taken scanning electron microscopic (SEM), and a study of the morphological and chemical composition in which they were initially solid waste used in modifications.

Studies are recommended to include the analysis of the mechanical properties with addition rates of 25% P/P calcined clay and higher than that implemented in this project, for an asphalt 80/100 modified with 18 W/W of GCR, to further strengthen the research field through recycling of solid waste, as it is vital to reduce the environmental impact.

Keywords: calcined clay, asphalt 80/100, recycled rubber grain, rheology.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. DELIMITACIÓN DEL TEMA	19
1.1 Alcance	19
1.2 Descripción del problema	19
1.3 Justificación	20
2. OBJETIVOS	21
2.1 Objetivo general	21
2.2 Objetivos específicos.....	21
3. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO	22
4. MARCO TEÓRICO	26
4.1 Asfalto	26
4.1.1 Extracción – Definición	26
4.1.2 Propiedades Físico-Químicas	27
4.1.3 Características Químicas	29
4.1.3.1 Saturados	31
4.1.3.2 Aromatizados.....	31
4.1.3.3 Aromatizados Polares	31
4.1.3.4 Resinas.....	31
4.2 Reología del asfalto.....	31
4.2.1 Viscosidad.....	32
4.3 Grano de caucho reciclado.....	33
4.3.1 Extracción – Definición	33
4.3.2 Niveles de molienda	35
4.3.3 Propiedades Físico-Químicas	36
4.3.4 Composición química caucho-neumático	36

4.4 Arcilla calcinada.....	36
4.4.1 Extracción – Definición	40
4.4.2 Propiedades Físico-Químicas	41
4.4.3 Composición Química	41
5. PROCEDIMIENTO	43
5.1 Modificación del Asfalto	43
5.1.1 Preparación de la muestra	43
5.2 Ensayos	45
5.2.1 Penetración, Norma I.N.V.E – 706 – 07	45
5.2.2 Punto de ablandamiento. Norma I.N.V.E – 712 – 07	47
5.2.3 Adherencia en bandeja. Norma I.N.V.E – 740 – 07	49
5.2.4 Stripping. Norma I.N.V.E – 737 – 07	50
5.2.5 Viscosidad rotacional. Norma I.N.V.E – 717 – 07	52
5.2.6 Fotografías SEM	54
6. ANÁLISIS Y RESULTADOS	57
6.1 Penetración	57
6.2 Punto de ablandamiento.....	62
6.3 Índice de penetración	65
6.4 Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua (Stripping).....	68
6.5 Adherencia en bandeja.....	72
6.6 Viscosidad rotacional.....	75
6.6 Fotografías SEM.....	80
7. CONCLUSIONES	96
BIBLIOGRAFÍA	99
ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

	<i>pág.</i>
Figura 1. Metodología de Trabajo	25
Figura 2. Plan experimental	25
Figura 3. Diagrama de fabricación de los productos asfálticos.....	26
Figura 4. Obtención del caucho natural.....	34
Figura 5. Molienda de caucho en forma preliminar y en procesos de criogénesis	35
Figura 6. Composición Química Caucho – Neumático.	36
Figura 7. Diagrama de esfuerzos de los diferentes cauchos	38
Figura 8. Porcentajes de adición.....	44
Figura 9. Proceso de mezclado en la adición de los polímeros	44
Figura 10. Ensayo de Penetración (preparación de las muestras)	46
Figura 11. Realización del ensayo de Penetración (ejecución del ensayo)	47
Figura 12. Ensayo de Punto de Ablandamiento (Preparación de las muestras) ...	48
Figura 13 Ensayo de Punto de Ablandamiento (ejecución del ensayo)	49
Figura 14 Ensayo de Bandeja de Adherencia (Preparación de las muestras)	50
Figura 15 Ensayo de Stripping (Preparación de las muestras).....	51
Figura 16 Ensayo de Viscosidad Rotacional (Preparación de las muestras)	53
Figura 17 Montaje del Viscosidad Rotacional	53
Figura 18 Ensayo de Fotografías SEM (Preparación de las muestras)	54
Figura 19 Ensayo de Fotografías SEM (Ejecución de las muestras)	55
Figura 20 Resultados del ensayo de penetración de los diferentes porcentajes de adición de arcilla calcinada	59

Figura 21 Reducción de la penetración con los diferentes porcentajes de adición de arcilla calcinada	60
Figura 22 Comportamiento de la temperatura con los diferentes porcentajes de adición de arcilla calcinada	64
Figura 23 Cambio de temperatura de ablandamiento del asfalto con diferentes porcentajes de adición de arcilla calcinada	65
Figura 24 Comparación del índice de penetración de las diferentes muestras.....	67
Figura 25 Ensayo de Stripping con asfalto 80-100 sin adiciones	68
Figura 26 Ensayo de Stripping con asfalto 80-100 + GCR.	69
Figura 27 Ensayo de Stripping con asfalto 80/100 + GCR + 5% arcilla calcinada	69
Figura 28 Ensayo de Stripping con asfalto 80-100 + GCR + 10%, 15%, 20% y 25% arcilla calcinada.	71
Figura 29 Ensayo de Bandeja de Adherencia con asfalto 80-100 sin adiciones...	72
Figura 30 Ensayo de Bandeja de Adherencia con asfalto + GCR.	73
Figura 31 Ensayo de Bandeja de Adherencia con asfalto + GCR + 5, 10, 15, 20 y 25 % de AC.	74
Figura 32 Promedio de ligante adherido a las cincuenta partículas.....	75
Figura 33 Comportamiento Reológico de la muestra control.	76
Figura 34 Comportamiento Reológico del 18% de GCR.	78
Figura 35 Comportamiento Reológico en presencia de arcilla calcinada.....	79
Figura 36 Fotografías de la arcilla calcinada a distintas escalas	81
Figura 37 Fotografías de arcilla calcinada a 5µm.....	81
Figura 38 Fotografías de Grano de Caucho Reciclado a 500µm.....	82
Figura 39 Fotografías de Grano de Caucho Reciclado a 5µm y 50µm	83
Figura 40 Morfología de Arcilla Calcinada.....	84
Figura 41 Mapas de recorrido de elementos de arcilla calcinada	85
Figura 42 Espectro de Rayos X – Muestra de Arcilla Calcinada.....	87
Figura 43 Morfología de Arcilla Calcinada muestra 2	88
Figura 44 Mapas de recorrido de elementos muestra 2 de arcilla calcinada.	89

Figura 45 Espectro de Rayos X – Muestra 2 de Arcilla Calcinada	90
Figura 46 Morfología de grano de caucho reciclado.....	92
Figura 47 Mapas de recorrido de Elementos del GCR.	93
Figura 48 Espectro de Rayos X – grano de caucho reciclado.	94

LISTA DE TABLAS

	<i>pág.</i>
Tabla 1. Características generales del cemento asfaltico CA 80-100	29
Tabla 2. Componente químico del caucho	39
Tabla 3. Componente químico del caucho - Automóviles	40
Tabla 4. Componente química de la Arcilla Calcinada.....	42
Tabla 5. Dimensiones del recipiente circular	45
Tabla 6. Uso del Spindle o vástago cilíndrico	52
Tabla 7. Valores de diferencia máxima entre extremos.	57
Tabla 8. Promedio de los resultados de penetración.	58
Tabla 9. Comparación Resultados de penetración de los proyectos de grado	61
Tabla 10. Resultados de Punto de Ablandamiento.	62
Tabla 11. Resultados del índice de penetración de las diferentes muestras.....	66
Tabla 12. Resultados del ensayo de Stripping.....	71
Tabla 13. Resultados de las propiedades de los asfaltos A1 y A2.....	77
Tabla 14. Composición Química de Arcilla Calcinada.	91
Tabla 15. Tabla numérica de la Composición Química de Arcilla Calcinada.....	91
Tabla 16. Composición Química de GCR.....	95
Tabla 17. Tabla numérica de la Composición Química de GCR.....	95

LISTA DE ANEXOS

	<i>pág.</i>
ANEXO A. Resultados generales de las propiedades reológicas.....	106
ANEXO B. Manual de procedimientos del viscosímetro rotacional Brookfield.....	130

INTRODUCCIÓN

El asfalto es uno de los materiales más usados en la construcción de vías urbanas y carreteras; sin embargo a pesar de la cantidad de investigaciones y estudios que se han realizado³, sigue siendo incomprendido en el campo práctico de la ingeniería en Colombia, debido a sus particulares propiedades físicas, reológicas y de composición química. En los proyectos viales se reflejan deficiencias posteriores, como por ejemplo, fisuramiento a temprana edad del pavimento, desprendimiento de partículas de agregado, mala adherencia asfalto-agregado y ahuellamiento⁴.

Por otro lado el crecimiento urbano e industrial desmedido, ha generado problemas medioambientales de gran incidencia en la sociedad actual. El descuido de la disposición y acumulación de los residuos sólidos, concibe la necesidad de implementar el reciclaje para la mitigación de la problemática en cuestión. Uno de los casos que podemos encontrar son las llantas que se desechan diariamente, ya que a pesar de que existe la normatividad para tratar de controlar la situación⁵, no se aplican controles rigurosos y efectivos, como se puede evidenciar en el Valle de Aburrá⁶ y otros tantos lugares del territorio colombiano. Otro de los casos para mencionar es el de la arcilla calcinada proveniente de la fundición del ladrillo; este residuo sólido se encuentra en tamaños entre 1 a 10 μ y debido a esto pueden llegar a provocar infecciones respiratorias⁷, de igual manera si es vertido en las fuentes hídricas de abastecimiento de la población, se convierte en agente infeccioso de

³ ROMERO, C.M, GOMEZ, A. Propiedades físicas y químicas de los asfaltos colombianos tipo Barrancabermeja y de sus respectivas fracciones de asfaltenos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. . (Sistema de acceso público) [en línea]. 26(98): 128, 2002. ISSN 0370- 3908.

⁴ARENAS, Hugo. Propuesta Técnica para garantizar la homogeneidad de los asfaltos producidos en las refinerías colombianas. (Sistema de acceso público) [en línea]. Cámara Colombiana de la infraestructura. Septiembre 2009.

⁵ Las llantas viejas con un problema ambiental "radial". (Sistema de acceso público) [en línea]. Bogotá, Colombia: Mayo de 2011 [citado 2013-04-14]. Disponible en internet: <http://www.eltiempo.com>

⁶ Buscan alternativas para las llantas usadas. (Sistema de acceso público) [en línea]. Medellín, Colombia: [citado 2013-04-14]. Disponible en internet: <http://www.elcolombiano.com>

⁷Aracelly S. Contaminación atmosférica por la fabricación de ladrillos y sus posibles efectos sobre la salud de los niños de zonas aledañas. (Sistema de acceso público) [en línea]. Departamento de Ciencias Exactas de Ingeniería de la Universidad Católica Boliviana. ACTA NOVA; Vol. 3, N° 2, junio 2006.

enfermedades⁸, ya que posee un bajo índice de renovación, genera una alta permanencia y acumulación en el suelo⁹.

En este marco general sobre las deficiencias del asfalto y la contaminación producida por los residuos sólidos industriales mencionados, se plantea la modificación del asfalto con grano de caucho reciclado de la llanta, y la utilización de la arcilla calcinada como llenante mineral, para observar un cambio en las propiedades físicas y reológicas del ligante.

El estudio de asfaltos modificados es un tema que ha sido motivo de múltiples investigaciones y la utilización del grano de caucho reciclado es uno de los casos que ha sido trabajado para el diseño y ejecución de vías en Colombia. El Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), a través de la especificación *ET-GE-002* formuló la utilización de este material como agente modificador en las mezclas asfálticas en caliente¹⁰. La cantidad de llanta adicionada al asfalto determina sus características físico-químicas y, por ende, el desempeño de las mezclas asfálticas elaboradas con este ligante. Entre tanto el tamaño de partícula de la llanta, cuando son añadidos al asfalto como modificadores, influyen directamente en la homogeneidad estructural del ligante y, por ende, determinan la compatibilidad y estabilidad de las fases del ligante modificado¹¹.

La arcilla calcinada a diferencia del GCR, no ha sido regularizada por parte del sector público, debido a que su implementación como llenante mineral en el asfalto caucho no es común. Sin embargo la aplicación de las arcillas como filler genera un comportamiento mejorable en la rigidez, ya que forman las cadenas de enlace del asfalto modificado fortaleciendo las propiedades físicas y mecánicas¹². El efecto de los asfaltos modificados con este filler es menos susceptible a los

⁸ SIÑANI, S & MANCILLA, B. Problemática ambiental producida por las ladrilleras. (Sistema de acceso público) [en línea]. La Paz, Bolivia. 2006

⁹ Ecología Y Medio Ambiente. (Sistema de acceso público) [en línea]. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Febrero de 2008 [citado 2013-03-7]. Disponible en internet: <http://www.virtual.unal.edu.co>

¹⁰ INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificación técnica para la aplicación del grano de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas en caliente por vía húmeda. ET GE 002. Bogotá D.C. El Instituto. 2011. 4 p.

¹¹ FIGUEROA, Ana. FONSECA, Elsa. REYES, Fredy. Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana Ingeniería y Universidad, Vol. 13, Núm. 1, enero-junio, 2009, p. 69

¹² M, El-Shafie. I.M. Ibrahim, A.M.M. Abd El Rahman. The addition effects of macro and nano clay on the performance of asphalt binder, Nasr City, Cairo, Egypt: Egyptian Petroleum Research Institute (EPRI). April 2012, p. 3

cambios de temperatura alta y también puede ser más resistente a la deformación plástica (ahuellamiento) en comparación con el asfalto sin modificar¹³.

De tal manera y de acuerdo a lo anterior, en esta investigación se utilizó un asfalto 80/100, se modificó con 18% P/P de GCR siguiendo la especificación ET-GE-002, y adicionalmente se agregó la arcilla calcinada en diferentes proporciones (5%, 10%, 15%, 20% y 25% P/P) siguiendo la especificación 400-07 de INVIAS para llenantes minerales.

Después de realizar la preparación de las muestras, se realizaron ensayos de caracterización física y reológica, para determinar un porcentaje óptimo de aplicación de la arcilla calcinada. Se analizó el cambio del comportamiento a través de los ensayos de penetración, punto de ablandamiento, índice de penetración, stripping, adherencia en bandeja y viscosidad Brookfield. Adicionalmente para determinar una condición inicial de cada uno de los residuos sólidos implementados (GCR y arcilla calcinada), se realizaron fotografías microscópicas de barrido electrónico (SEM) analizando su estructura morfológica y de composición química.

Finalmente se realizó un análisis comparativo de los resultados obtenidos de los diferentes porcentajes de adición del filler, con la muestra de asfalto caucho al 18% P/P y el ligante sin modificar.

¹³ Ibid., p. 4.

1. DELIMITACIÓN DEL TEMA

1.1. ALCANCE

Este proyecto presenta el uso de la arcilla calcinada empleándola como llenante mineral en un asfalto caucho, con el fin de analizar el comportamiento físico y reológico de las partículas, mejorando las deficiencias de este material bituminoso y fomentando el uso de residuos sólidos como una alternativa económica y de mitigación de los problemas medioambientales.

Para el asfalto con 18% p/p de GCR, se adicionó arcilla calcinada en porcentajes de 5%, 10%, 15%, 20% y 25% p/p respecto al ligante. Además se realizó una observación microscópica de las partículas y el análisis de la composición química del grano de caucho y la arcilla calcinada, determinando una condición inicial del material objeto de estudio. De tal manera se realizaron los siguientes ensayos de laboratorio:

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

1.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA

La utilización de cauchos reciclados y la arcilla calcinada para mezclas bituminosas, tiene como objetivo mitigar la contaminación que producen estos materiales; considerados como desechos industriales, los cuales incuban insectos, ocupan áreas que no son adecuadas e incentivan la propagación de enfermedades. El trato adecuado por medio de la reutilización, permite mejorar esta problemática, además afirma el desempeño, calidad y durabilidad de los pavimentos flexibles.¹⁴

La herramienta adecuada para brindar un medio de mitigación ante la problemática enunciada es el reciclaje, este tema diariamente se ha enmarcado

¹⁴ FIGUEROA, A. FONSECA, E. REYES, A. Op. Cit. p. 70.

como eje central en los principales debates sobre la preocupación de los cambios climáticos actuales. Los frecuentes eventos climáticos han generado la necesidad de realizar estudios sobre el futuro, los cuales predicen que si el ser humano no se hace cargo de sus desechos provocará un acelerado ciclo geológico, que tendrá consecuencias mayores.

De esta manera se han venido utilizando nuevas tecnologías que reducen el impacto ambiental y generan otro tipo de conciencia sobre el consumo derrochador. El reciclaje se ha establecido como una de las opciones más viables para este propósito.

Los proyectos de ingeniería actuales están acompañados de técnicas de reciclaje que mejoran las condiciones estructurales de las obras, manteniendo un bajo costo en la implementación de los materiales utilizados.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El presente estudio pretende utilizar el grano de caucho reciclado y la arcilla calcinada, como elementos estructurales de las mezclas asfálticas, alterando eficientemente las propiedades que tiene un asfalto convencional. Se busca incentivar la realización de nuevos proyectos buscando diversas alternativas y modificaciones, utilizando otros materiales de reciclaje y usarlos como llenantes minerales y agentes modificadores de mezclas asfálticas¹⁵.

La recuperación adecuada de estos residuos, es una opción que es ilimitada debido a que diariamente se incrementan y usarlos como producto reciclado para nuevas alternativas en el mejoramiento de los pavimentos, tanto para beneficios económicos como sociales, se convierte en una propuesta factible y beneficiosa.

Los estudios realizados y mencionados en los pavimentos con GCR a lo largo de esta investigación, muestran resultados satisfactorios y una viabilidad de esta modificación, ya que aparte de mejorar sus propiedades físico-mecánicas, su bajo costo de inversión lo hace un proyecto rentable¹⁶. Por otro lado también favorece las condiciones medio-ambientales del planeta haciendo parte de la mitigación al problema de la contaminación¹⁷.

¹⁵ IBID. p. 45

¹⁶ IBID. p. 46

¹⁷ IBID. p. 46

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Analizar el efecto de la arcilla calcinada en las propiedades físicas y reológicas de un asfalto 80/100 modificado con grano de caucho reciclado.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar el comportamiento físico y reológico de un asfalto-caucho al adicionar los porcentajes de arcilla calcinada en los ensayos de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad rotacional de acuerdo a la normativa INVIAS.
- Evaluar el efecto de la arcilla calcinada como llenante mineral sobre los agregados en los ensayos de adherencia y Stripping.
- Analizar la composición física y química del grano de caucho y de la arcilla calcinada mediante fotografías obtenidas por el microscopio electrónico de barrido.
- Comparar la utilidad del asfalto-caucho con el uso de la arcilla calcinada actuando como llenante mineral.
- Valorar el uso de la arcilla calcinada como llenante mineral en un asfalto-caucho, como mejora en las propiedades físicas y reológicas.
- Determinar el porcentaje óptimo de arcilla calcinada para el asfalto 80/100 modificado con el 18% p/p GCR.

3. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO

En el proyecto se realizaron pruebas de laboratorios con asfalto modificado con llanta triturada en una proporción del 18%, y al mismo tiempo pruebas a este mismo asfalto con llenante mineral de arcilla aplicado en diferentes proporciones, estableciendo un estudio comparativo con una muestra control sin modificación.

Para la ejecución del proyecto se tuvo en cuenta el rigor en la selección y buena implementación tanto de los materiales como de los implementos de laboratorio siguiendo las normas y especificaciones previstas por INVIAS y por el IDU. De acuerdo a esto el ligante asfáltico que se seleccionó fue 80/100 y el residuo sólido constante fue grano de caucho reciclado del reencauche de las llantas usadas en una proporción del 18% respecto al ligante. En cuanto a la arcilla calcinada que fue utilizada como llenante mineral, se usó del residuo en la fabricación del ladrillo cuando se funde a altas temperaturas; los porcentajes de adición que se aplicaron de arcilla calcinada fueron del 5%, 10%, 15%, 20% y 25% respecto al ligante.

Después de la selección y obtención del material, se procedió a realizar los ensayos de laboratorios, para poder comprobar y analizar las características físicas y reológicas del asfalto en sus diferentes circunstancias. Esto contiene la ejecución de las pruebas, antes y después de que al asfalto sea mezclado con los residuos sólidos, así estableciendo patrones comparativos con las muestras modificadas.

Los ensayos realizados para el estudio del efecto de la llenante mineral en el asfalto 80/100 con GCR fueron penetración, punto de ablandamiento, adherencia en bandeja, stripping y viscosidad Brookfield.

Se tomó como referencia los trabajos de grado **“efecto de la arcilla calcinada en un asfalto b-60/70 en porcentajes de 5% al 50%”** realizado por María Mendoza y María Paula Salazar, y **“Efecto de la arcilla calcinada en un asfalto B-60/70 y su incidencia en una mezcla asfáltica MDC-2”** realizado por Jhon Jaime Romero y María Camila Sánchez. En donde se compararon los resultados y se estableció el porcentaje más adecuado de implementación de la arcilla calcinada como llenante mineral en el asfalto caucho al 18%, analizando un óptimo rendimiento bajo los criterios funcionales.

Adicionalmente se realizaron unas fotografías electrónicas microscópicas de barrido (SEM) para determinar la textura, forma y composición química en que se encuentra tanto el grano de caucho reciclado como la arcilla calcinada.

A continuación se dará a conocer los ensayos que se realizaron con sus respectivas características.

Todos los porcentajes aplicados son respecto al ligante p/p; es decir respecto al peso del asfalto 80/100.

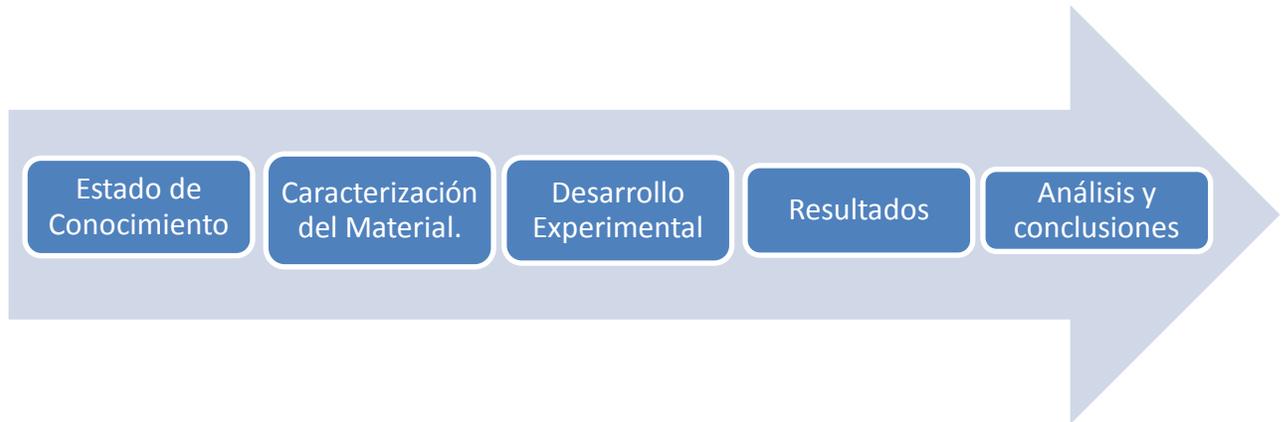
- ***Penetración.***
 - Asfalto 80/100 modificado GCR.
 - 18%
 - Asfalto 80/100 modificado GCR con arcilla calcinada.
 - 5%
 - 10%
 - 15%
 - 20%
 - 25%
- ***Punto de Ablandamiento.***
 - Asfalto 80/100 modificado GCR.
 - 18%
 - Asfalto 80/100 modificado GCR con arcilla calcinada.
 - 5%
 - 10%
 - 15%
 - 20%
 - 25%
- ***Adherencia en bandeja.***
 - Asfalto 80/100 modificado GCR.
 - 18%
 - Asfalto 80/100 modificado GCR con arcilla calcinada.
 - 5%
 - 10%
 - 15%
 - 20%
 - 25%

- **Stripping.**
 - Asfalto 80/100 modificado GCR.
 - 18%
 - Asfalto 80/100 modificado GCR con arcilla calcinada.
 - 5%
 - 10%
 - 15%
 - 20%
 - 25%
- **Viscosidad Brookfield.**
 - Asfalto 80/100 modificado GCR.
 - 18%
 - Temperaturas (80°,105°,130°,155° y 180°.)
 - Asfalto 80/100 modificado GCR con arcilla calcinada.
 - 5%
 - Temperaturas (80°,105°,130°,155° y 180°.)
 - 10%
 - Temperaturas (80°,105°,130°,155° y 180°.)
 - 15%
 - Temperaturas (80°,105°,130°,155° y 180°.)
 - 20%
 - Temperaturas (80°,105°,130°,155° y 180°.)
 - 25%
 - Temperaturas (80°,105°,130°,155° y 180°.)
- **Fotografías SEM.**
 - Grano de caucho reciclado.
 - Arcilla calcinada.

De acuerdo con lo anterior, esta investigación contará con diversas fases que serán estudiadas o explicadas según sea el caso en los siguientes capítulos, la figura 1 indica las fases que se presentan en la investigación representando el seguimiento de acuerdo a la metodología que se empleó para el desarrollo de este proyecto; por lo tanto; la fase 1 es el estado de conocimiento explicado en el capítulo 3. La fase 2, consta del capítulo 4 donde se presentó la caracterización del material, acerca de las generalidades sobre el asfalto, el grano de caucho reciclado y la arcilla calcinada. La fase 3, incluye el capítulo 5; es el desarrollo

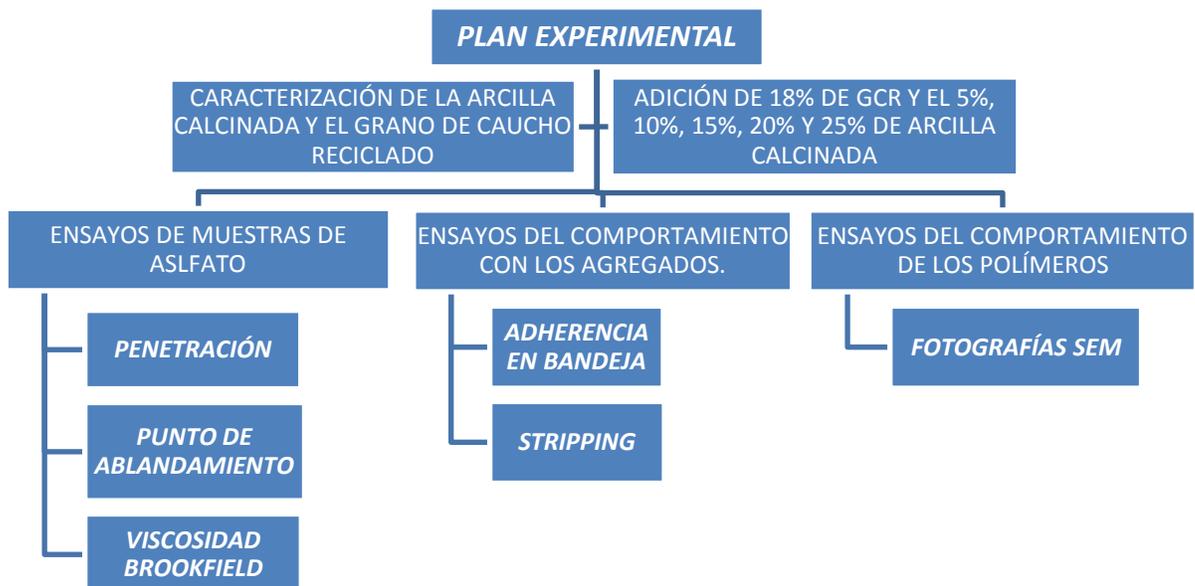
experimental, ahí se describen los ensayos y la manera de ejecutarlos. Finalmente en la fase 4 y fase 5; que constan de capítulo 6 y 7, se presentan los resultados, el análisis y las conclusiones que arrojó la investigación.

Figura 1. Metodología de Trabajo.



La figura 2 está representado el plan experimental de acuerdo a lo que se especificó en el capítulo 2 y con base en la fase 3 de la metodología de trabajo, en el son explicadas cada una de las pruebas que se desarrolló.

Figura 2. Plan experimental.

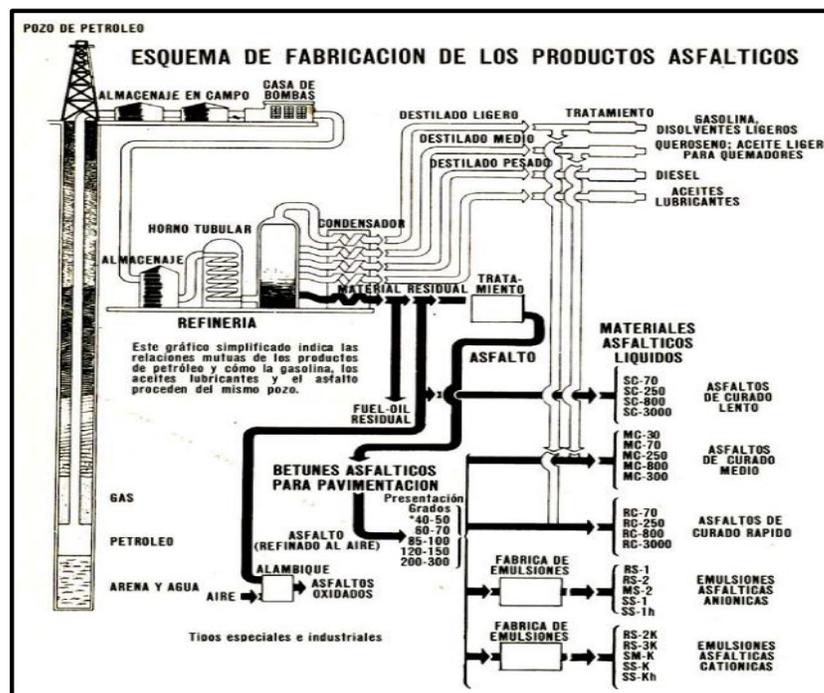


4. MARCO TEÓRICO

4.1. ASFALTO

4.1.1. Extracción – Definición: El asfalto es un componente natural de la mayor parte de los petróleos existentes en disolución. Regularmente se extrae a través de destilación de petróleo crudo¹⁸, ya que a través de este proceso se separan las diversas fracciones y se recupera el asfalto. No todos los crudos producen suficientes cantidades de betún y alrededor de una décima parte del petróleo disponible se encuentra adecuado¹⁹. El proceso de destilación para la obtención del ligante en refinería (ver Figura 3) se realiza con el propósito de obtener las propiedades particulares útiles para la implementación en la mezcla.

Figura 3. Diagrama de fabricación de los productos asfálticos.



Fuente: The Asphalt Handbook. 1965

¹⁸ CORBETT LW. Manufacture of petroleum asphalt. In: Hoiberg AJ, editor. Bituminous Materials: Asphalts, Tars and Pitches. New York: Interscience Publishers; 1965. p. 81–122. Vol. 2, Part 1.

¹⁹ READ J, WHITEOAK D. The Shell Bitumen Handbook. 5th Ed. London: Thomas Telford Publishing; 2003.

También se encuentran yacimientos naturales de asfalto, en algunos de los cuales el material está libre de materias extrañas, mientras que en otros se obtiene mezclado con cantidades variables de minerales, agua y otras sustancias. Las rocas porosas saturadas de asfalto que se identifican en algunos yacimientos naturales se conocen con el nombre de rocas asfálticas²⁰.

El asfalto es un material visco-elástico (a temperatura ambiente)²¹, aglomerante resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero. Es una sustancia plástica flexible controlable a mezclas con áridos. Además es altamente resistente a la mayor parte de los ácidos, álcalis y sales²². Es un material con gran variedad de aplicaciones en la construcción de pavimentos flexibles como por ejemplo, mezclas y modificaciones asfálticas, bases estabilizadas, emulsiones asfálticas, riegos de impregnación, entre otros.

4.1.2. Propiedades Físico-Químicas. Como se menciona anteriormente el asfalto tiene propiedades visco-elásticas, que condicionan las propiedades físicas según la temperatura del medio. Esta susceptibilidad térmica se refleja en la relación de los componentes químicos estructurales del ligante, que a la vez, al transcurrir el tiempo se van alterando después del proceso de refinación como se demuestra en el estudio “Propuesta técnica para garantizar la homogeneidad de los asfaltos producidos en las refinerías colombianas”²³, en donde se menciona que factores como variaciones en los parámetros de manejo durante el proceso de mezclado, la manejabilidad de la mezcla durante la colocación y compactación, alteran las características físicas y mecánicas de la mezcla con la consiguiente disminución de su vida útil, debido a una prematura rigidización y posterior fisuración bajo las condiciones de servicio. Esta rigidización prematura del ligante, lo hace más vulnerable al envejecimiento en condiciones normales, a problemas de adherencia con el agregado, al aumento del desprendimiento de partículas en la mezcla y al fisuramiento por fatiga.²⁴

²⁰VELÁZQUEZ, Manuel. Manual del asfalto - The Asphalt Institute. Ediciones URANO, S.a. España: Bilbao. 1972. p. 21.

²¹MURALI KRISHNAN J, RAJAGOPAL KR. Review of uses and modeling of bitumen from ancient to modern times. Appl Mech Rev 2003; 56:149–214.

²²VELÁZQUEZ. Op. cit., p. 21.

²³ARENAS, Hugo. Op. Cit., p. 11.

²⁴ ibid. p. 15.

Entre los parámetros de caracterización física del ligante se encuentra el de penetración, que se utiliza para reflejar la consistencia del ligante, pero no es suficiente para analizar el cambio de las propiedades que sufre el asfalto al transcurrir del tiempo; ya que no describe el comportamiento de la estructura molecular y reológica del asfalto.

Otro parámetro que se utiliza es el de punto de ablandamiento, el cual indica cuando el ligante pasa de un estado sólido aparentemente estático, a un estado líquido de alteración del movimiento de las partículas a través de la energía calorífica. Este parámetro y el de penetración sirven adicionalmente para calcular el índice de penetración, en el que se establece un coeficiente que refleja la susceptibilidad térmica del ligante, que depende directamente del tipo de carga de crudos y procesos de obtención del ligante en refinería y que al mostrar una gran fluctuación, se verá reflejada en las características dinámicas de la mezcla asfáltica, con la variación de los ejes equivalentes de diseño.²⁵

La presencia de agua es uno de los factores que alteran críticamente la mezcla asfáltica, este fenómeno se conoce con el nombre de Stripping y afecta directamente la durabilidad del pavimento flexible. En el estudio “Influencia del agua en el fenómeno de stripping en mezclas asfálticas: estudio sobre el ligante” se demuestra que a pesar de que el cemento asfáltico es un material impermeable y de muy baja reacción química con agentes externos, en presencia de agua modifica su consistencia y aumenta su rigidez. Lo anterior demuestra que la interfase ligante asfáltico-agregado pétreo se afecta por tal cambio de consistencia. El aumento en rigidez causa contracción del ligante asfáltico sin cambio de volumen, lo cual podría ser una de las causas que generen el desprendimiento del cemento asfáltico con el agregado.²⁶

En la tabla 1 se presentan las características del asfalto 80/100 fabricado a partir de la base asfáltica que proviene de los fondos de la destilación al vacío de crudos seleccionados. El asfalto debe ser seleccionado en función de las características climáticas de la zona y las condiciones de operación de la vía a pavimentar. También se utiliza para la preparación de emulsiones asfálticas en la industria de

²⁵ ARENAS, Hugo. Op. Cit., p. 17.

²⁶ RONDON, Hugo. MORENO, Luis. Influencia del agua en el fenómeno de stripping en mezclas asfálticas: estudio sobre el ligante. (Sistema de acceso público) [en línea]. Ing. Univ. Bogotá (Colombia), 14 (2): 297-312, julio-diciembre de 2010. ISSN 0123-2126

impermeabilizaciones, en asfaltos modificadas con polímeros y para el reciclado con cemento asfáltico espumado.

Tabla 1. Características generales del cemento asfáltico CA 80-100.

Ensayo	Método	Unidad	CA 80-100	Resultado
Ensayos sobre el asfalto original				
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0,1 mm	80-100	85
Índice de penetración	INV. E-724	-	-1/+1	-0,5
Viscosidad absoluta (60 °C)	ASTM D-4402	Poises	1000 mín.	1400
Ductilidad (25 °C, 5cm/min)	ASTM D-113	cm	100 mín.	>105
Solubilidad en tricloroetileno	ASTM D-2042	%	99 mín.	>99
Contenido de agua	ASTM D-95	%	0,2 máx.	<0,2
Punto de inflamación COC	ASTM D-92	°C	232 mín.	295
Ensayos sobre el residuo luego del RTFOT				
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	1,0 máx.	0,2
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	%	48 mín.	65

Fuente: Shell de Colombia S.A. Carta técnica Shell Bitumen, 2007.

4.1.3 Características Químicas.

Las características químicas de los asfaltos se derivan de un comportamiento coloidal reflejado en su estructura molecular tipo sol-gel, útil para el uso en pavimentos por tener una proporción adecuada de maltenos y asfaltenos.²⁷

Los modelos principales de la estructura química del asfalto son el modelo micelar de Nellensteyn y el modelo continuo SHRP²⁸. En el modelo micelar, se supone que el asfalto está formado por grandes moléculas de asfaltenos rodeadas por

²⁷ FIGUEROA. Op. cit. p. 60

²⁸ WAHR, C. Materiales bituminosos. Citado por CÁRDENAS, Jaleydi, Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura. Antioquia. Revista EIA, 2009. p. 128.

aromáticos polares y no polares, suspendidas en aceites saturados, todos los constituyentes peptizados en una solución coloidal.²⁹

Los saturados y aromáticos se pueden considerar como los medios de dispersión de los aromáticos polares, que son los responsables del comportamiento viscoelástico del asfalto a temperatura ambiente.³⁰

Los modelos de SHRP no están de acuerdo con el modelo micelar de “supermolécula”; por el contrario, se considera al asfalto simplemente como un compuesto de dos fases: una polar y una no polar. Sus propiedades dependen de la compatibilidad y habilidad de los constituyentes para coexistir sin transformación de fase en el tiempo, también están influenciadas por el grado de aromaticidad. La estructura química primaria de los cementos asfálticos incluye: anillos aromáticos, anillos cíclicos (aromáticos nafténicos), alifáticos (alcanos), heteroátomos (O, N, S) que forman asociación entre moléculas (inducen polaridad) e influyen en forma significativa en el comportamiento mecánico del asfalto, y metales (Va, Ni, Fe) que tienen influencia sobre el envejecimiento y la huella dactilar del asfalto.³¹

La composición química del ligante contiene tres propiedades importantes que son la consistencia, pureza y seguridad, de acuerdo con Vázquez la consistencia se debe a su habilidad para fluir a diferentes temperaturas, esto en razón a que el asfalto es un material termoplástico, es decir, se fluidifica a altas temperaturas. La pureza define la composición química del asfalto, donde las impurezas de éste, son prácticamente inertes y la seguridad es preciso el comportamiento de afinidad química con las diferentes cargas eléctricas. De la misma manera, dentro de su composición química contiene características de aglutinación, esto debido a su constitución principalmente de asfaltenos y máltenos, que son los elementos que le proporcionan dichas particularidades; este último define la capacidad del asfalto para ser manejado a altas temperaturas con seguridad³².

²⁹ CÁRDENAS, Jaleydi, Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura. Antioquia. Revista EIA, 2009. p. 128.

³⁰ Montejo, A. Ingeniería de pavimentos. Citado por CÁRDENAS, Jaleydi, Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura. Antioquia. Revista EIA, 2009. p. 128.

³¹ CÁRDENAS, Jaleydi Op. Cit., p. 129.

³² VÁZQUEZ RUIZ, Idalit. Ventajas y desventajas del uso de polímeros en los asfaltos. En: Generalidades de los asfaltos. Veracruz. 2010, p. 15.

La estructura química del asfalto según Montejó se clasifica por la mezcla compleja de moléculas que varían tanto en composición química como en peso molecular de la siguiente manera:³³

4.1.3.1 Saturados. Sus componentes tienen consistencia grasa y son prácticamente incoloros. Contienen material parafínico, parcialmente con anillos nafténicos y, parcialmente con cadenas largas y rectas que pueden cristalizar. Su relación H/C (hidrógeno/carbono) varía entre 1.9 y 2, la distribución de los pesos moleculares de esta fracción es estrecha. Entre 300 y 2000.

4.1.3.2 Aromáticos. Sus componentes son aceites viscosos de color café oscuro. Contiene anillos aromáticos con ciclos nafténicos y asociados a cadenas alifáticas. Aproximadamente el 30% de los átomos de carbono forman parte de las estructuras aromáticas. Su relación H/C es de orden de 1.5. Contienen pequeñas cantidades de oxígeno y nitrógeno y hasta 3% de azufre. La distribución de sus pesos moleculares es similar a la de los saturados, es decir entre 300 y 2000.

4.1.3.3 Aromáticos polares. En estos compuestos se agrupan las resinas y los asfaltenos, contienen muchos anillos aromáticos condensados por moléculas (35-40% de los átomos de carbono). El carbono se encuentra en estructuras nafténicas y parafínicas. Contienen hasta 1% de nitrógeno y oxígeno y hasta 8% de azufre y varios grupos polares.

4.1.3.4 Resinas. Estos materiales son solubles en n-heptano. Son sólidos negros que funden con el calor. La distribución de sus pesos moleculares es amplia, oscilando entre 500 y 50000 y su relación H/C es del orden de 1.1 a 1.2.

4.2. REOLOGÍA DEL ASFALTO.

La reología estudia la deformación y el flujo de la materia explicando cómo un material responde a una fuerza; es decir la deformación de un cuerpo sometido a esfuerzos externos. Esto se refiere a una respuesta mecánica de un material, cuyas propiedades varían en función de la temperatura y al tiempo de aplicación de una carga, excluyéndose los fenómenos de rotura. En este sentido comprende

³³ MONTEJO, A. Ingeniería de pavimentos, evaluación estructural, obras de mejoramiento y nuevas tecnologías. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2006. Vol. 2. 3a ed. p. 75 -79.

la teoría de la elasticidad y resistencia de los materiales, la plasticidad, la viscosidad y la hidráulica³⁴.

Las propiedades reológicas del asfalto dependen de las proporciones en que están presentes sus componentes, las cuales varían de acuerdo con el origen de los crudos de petróleo. El comportamiento reológico del ligante tiene una influencia significativa en las propiedades de la mezcla asfalto-agregado (ahuellamiento, fatiga y susceptibilidad térmica)³⁵.

El asfalto, convencional y modificado, se evaluó en este proyecto a través del comportamiento de la viscosidad a diferentes temperaturas.

4.2.1. VISCOSIDAD.

La viscosidad se puede definir como una medida de la resistencia a la deformación del fluido; Los fluidos de alta viscosidad presentan mayor resistencia a fluir en comparación de un fluido con baja viscosidad que fluye con facilidad. Es importante mencionar que la viscosidad es inversamente proporcional a la temperatura; a mayor temperatura, menor viscosidad³⁶. Este concepto relaciona el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación de la siguiente manera³⁷:

$$\tau = \mu \cdot D$$

Dónde:

T : esfuerzo cortante.

μ : viscosidad

D : velocidad de deformación

Nomenclatura para el análisis dimensional:

L : Unidad de longitud

M : Unidad de masa

T : Unidad de tiempo

F : unidades de fuerza

³⁴ REYES, Fredy. Diseño racional de pavimentos. (Sistema de acceso público) [en línea]. CEJA. Bogotá 2003.p.58

³⁵ CARDENAS. Op cit., p. 125.

³⁶ VÁZQUEZ. Op cit., p. 15.

³⁷ GARCIA, Luciana. Reología de ligantes asfálticos mediante el viscosímetro Brookfield. (Sistema de acceso público) [en línea]. LEMAC. Argentina. 2009. p.119.

$$\mu: \frac{T}{D} = \frac{T}{\frac{du}{dn}} = \frac{\frac{F}{L^2}}{\frac{L}{\frac{F \cdot T}{L}}} = \frac{F \cdot T}{L^2} = \frac{N \cdot S}{\frac{M^2}{Pa}} = Pa \cdot s \text{ o } mPa \cdot s$$

$$T: \mu \cdot D: \frac{F \cdot T}{L^2} * \frac{L}{L} = \frac{F}{L^2} = \frac{N}{M^2} = Pa \text{ o } mPa$$

$$D: \frac{T}{\mu} = \frac{\frac{F}{L^2}}{\frac{F \cdot T}{L^2}} = \frac{1}{T} = \frac{1}{s}$$

4.3. GRANO DE CAUCHO RECICLADO

4.3.1. Extracción – Definición: El grano de caucho reciclado (GCR) se obtiene de los tipos de cauchos más empleados en la fabricación de neumáticos como lo es el caucho natural, que tienen propiedades de estireno butadieno, polisoprenos y polibutadienos. Los cauchos naturales proporcionan elasticidad, mientras que los sintéticos estabilidad térmica. Se une a ello un proceso de vulcanizado entrelazando las cadenas de polímeros con moléculas de azufre a alta presión y temperatura³⁸.

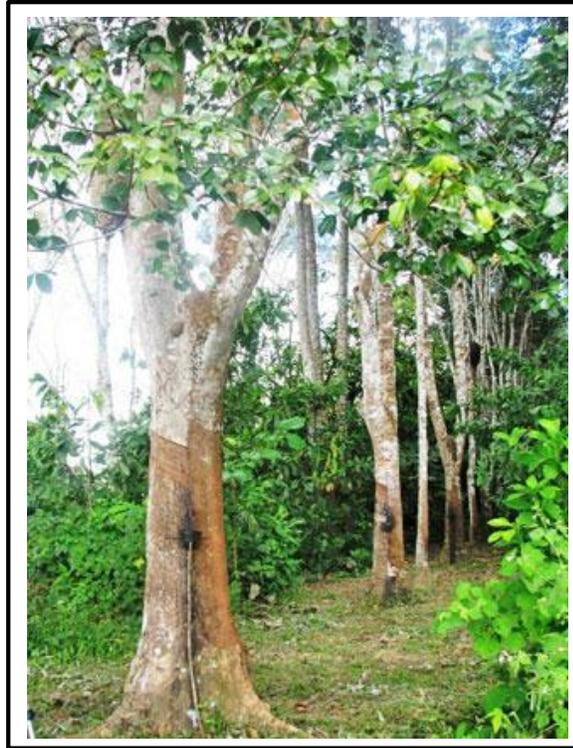
La reutilización de neumáticos es de amplio uso y difusión en aquellos países que poseen normativas ambientales claras y eficientes.

El caucho puede ser natural o sintético. El de origen natural se elabora a partir del látex, que es una resina blanca lechosa que sale de la corteza del árbol de caucho. El caucho natural se extrae a partir del árbol *Hevea Brasiliensis* (Ver figura 4) que es un látex con partículas de caucho en suspensión. Después de un proceso de secado y de ahumado se utilizan diferentes productos. Los elastómeros o cauchos son materiales poliméricos cuyas dimensiones pueden variar según sea el tipo de esfuerzo al que son sometidos, volviendo a su forma cuando el esfuerzo se retira.³⁹

38 BOTASSO, Gerardo y CUATTROCCHIO, Adrián. Estado de la utilización de caucho reciclado en obras viales en Latinoamérica. Aplicaciones. LEMaC. 2007. p. 1.

39 CASTRO, Guillermo. Materiales y compuestos para la industria del neumático. Departamento de ingeniería mecánica F.I.U.B.A. 2008. Pág. 2

Figura 4. Obtención del caucho natural.



Fuente: Imagen extraída de internet, Árbol Hevea Brasiliensis

Un neumático es básicamente un elemento que permite a un vehículo desplazarse en forma suave a través de superficies lisas. Consiste en una cubierta principalmente de caucho que contiene aire el cual soporta al vehículo y su carga. En un principio las utilidades de esta materia prima (caucho) eran pocas; fue el comerciante de ferretería Charles Goodyear (1800 – 1860) quién descubrió que mezclándolo con el azufre y calentándolo, se evitaba que fuese tan pegajoso cuando estaba caliente y tan rígido cuando enfriaba. A partir de este proceso llamado vulcanización se comenzó a fabricar una gama muy amplia de productos como aislamiento para cables eléctricos, mangueras, cintas transportadoras y de manera destacada cubiertas para transporte de automóviles, camiones, aviones,

etc. Hacia fines de siglo XIX Michelin en Francia, Dunlop en Inglaterra y Goodrich en Estados Unidos fabricaron las primeras cubiertas para automóviles.⁴⁰

Los tipos de caucho más empleados en la fabricación de los neumáticos son:

- Cauchos naturales (NR)
- Estireno – Butadieno (SBR)
- Polibutadienos (BR)
- Polisoprenos (IR)

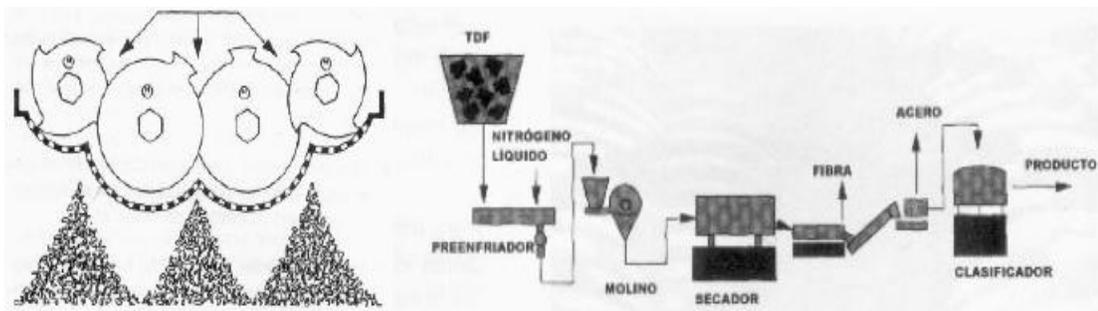
4.3.2. NIVELES DE MOLIENDA

Los niveles de molienda del caucho se pueden clasificar en:

- ✓ Nivel de trituración previa: Se realiza un triturado previo con trituradoras de 2 o más ejes, con cuchillas que giran entre 15 y 20 rpm. El tamaño de producción puede no ser estable, pero eso no tiene gran importancia en esta etapa porque se considera de trituración macro.(Ver Figura 5)
- ✓ Nivel de trituración final: Existen dos métodos en los que se requiere que previamente haya sido retirado el componente metálico. Los métodos se enuncian a continuación: A temperatura ambiente; con molinos clásicos y por cilindros se separa la parte textil. Criogénesis; Se realiza entre -60 °C y -70 °C dando un producto más afín y de mejor finura de hasta valores que pasan un 100 % la malla Nº 100 de ASTM.

Figura 5. Molienda de caucho en forma preliminar y en procesos de criogénesis.

⁴⁰CUATTROCCHIO, A. El uso de caucho de cubiertas en mezclas asfálticas. LEMAC. Buenos Aires, Argentina, 2006. Pág. 2



Fuente: “El uso de caucho de cubiertas en mezclas asfálticas”. Centro de Investigaciones Viales LEMaC

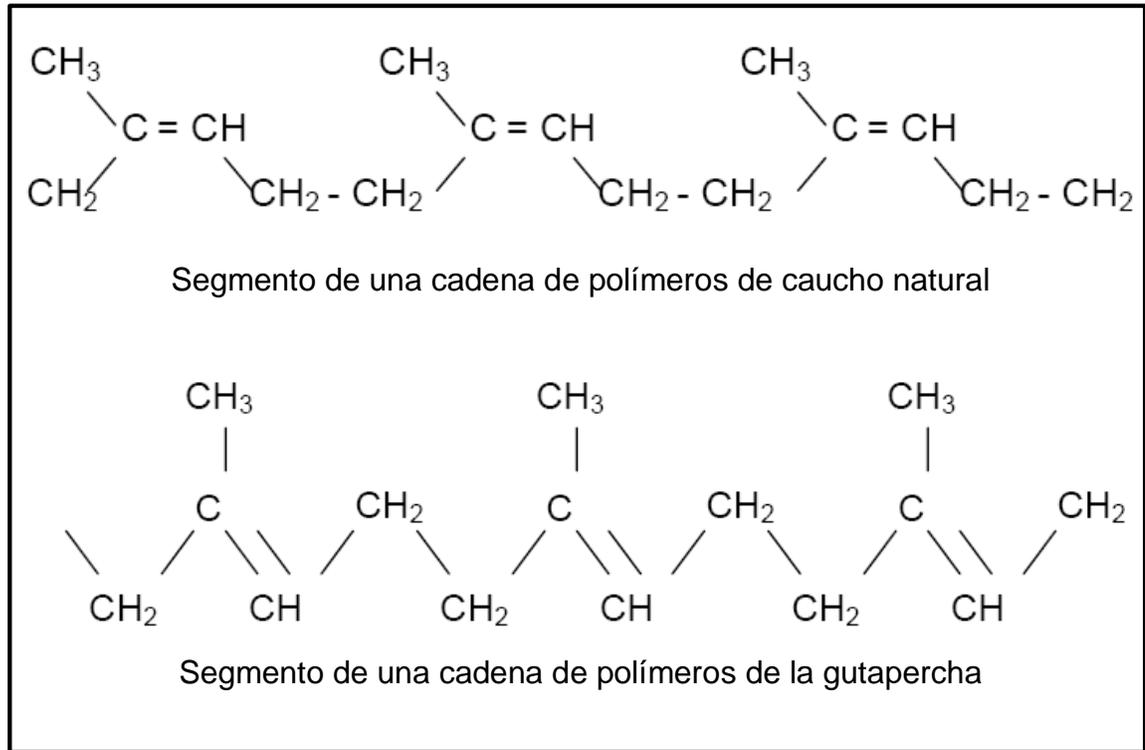
4.3.3. Propiedades Físico-Químicas. Se realiza una combinación de caucho de acuerdo a las características que se desea obtener; es decir con los cauchos naturales se obtiene mayor elasticidad y con los sintéticos se obtiene estabilidad térmica. Esta combinación de efectos favorece la durabilidad y la capacidad de adaptarse a las nuevas exigencias del tránsito. La matriz de caucho más utilizada es el copolímero estireno-butadieno (SBR), en el que la proporción es de aproximadamente un 25 % en peso de estireno, o una mezcla de caucho natural y SBR. Todos los tipos de cauchos poseen diferentes propiedades, pero también con algo en común: Una vez vulcanizados, pueden ser muy duraderos, por lo que necesitarían una gran cantidad de tiempo para su degradación.⁴¹

4.3.4. COMPOSICIÓN QUÍMICA CAUCHO – NEUMÁTICO. La estructura de los cauchos naturales está formada por cis-1,4 polisopreno mezclado con pequeñas cantidades de proteínas, lípidos y sales inorgánicas, entre otros. Se encuentra así un polímero de cadena larga y enredada en forma de espiral, de peso molecular medio, 5×10^5 g/mol, que a temperatura ambiente está en un estado de agitación continua. Este comportamiento general es debido en parte al impedimento estérico del grupo metilo y el átomo de hidrógeno, en el mismo lado del doble enlace carbono-carbono. (Ver Figura 6) Esta cadena se complementa con otro isómero estructural llamado gutapercha.⁴²

⁴¹ CASTRO GUILLERMO. Op cit., p. 4.

⁴²CUATTROCCHIO, A. Op cit., p. 8.

Figura 6. Composición Química Caucho – Neumático.

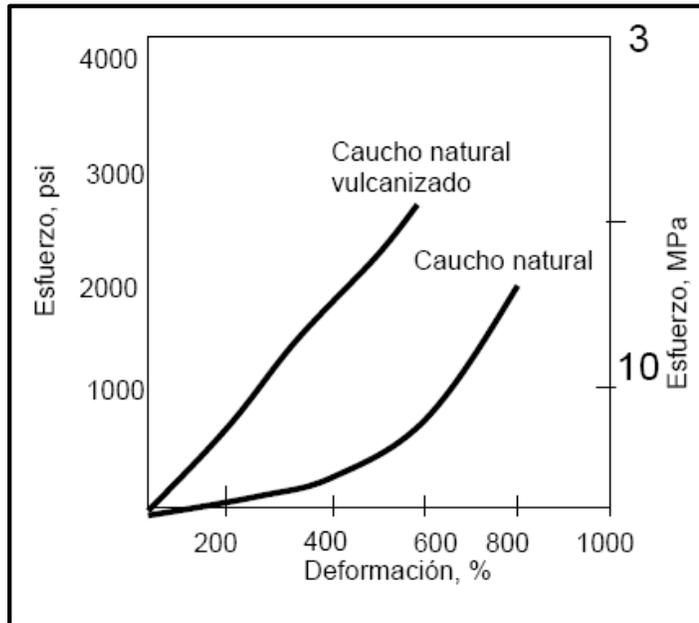


Fuente: “El uso de caucho de cubiertas en mezclas asfálticas”. Centro de Investigaciones Viales LEMaC.

El proceso de vulcanización a que se someten los neumáticos es un entrelazamiento de cadenas de polímeros con moléculas de azufre a alta presión y temperatura. En este proceso el caucho pasa de ser un material termoplástico a ser un material elastomérico, pues el estireno permite obtener un caucho más duro y más tenaz, que se cristaliza bajo grandes esfuerzos (Ver figura 7).⁴³

⁴³ CUATTROCCHIO, A. Op cit., p. 3

Figura 7. Diagrama de esfuerzos de los diferentes cauchos



Fuente: “El uso de caucho de cubiertas en mezclas asfálticas”. Centro de Investigaciones Viales LEMaC

La adición de cargas hace depreciar la vida útil del neumático. Para reducir el impacto dándole cuerpo y rigidez, se utilizan negro de humo y arcillas modificadas. Se agregan además, otros materiales al caucho para mejorar sus propiedades, tales como: Suavizantes, que aumentan la funcionalidad del caucho, antes de la vulcanización; óxido de Zinc y de Magnesio, comúnmente denominados activadores, pues son mezclados para reducir el tiempo de vulcanización de varias a horas a pocos minutos. También antioxidantes, para dar mayor vida al caucho sin que se degrade por la acción del oxígeno y el ozono; y finalmente negro de humo, especie de humo negro obtenido por combustión incompleta de gases naturales, que entrega mayor resistencia a la abrasión y a la tensión. Además de caucho, los neumáticos están compuestos por⁴⁴:

- **Rellenos reforzantes:** Negro de humo, formado de partículas muy pequeñas de carbono, que aumenta la tenacidad y la resistencia a la tracción, a la torsión y al desgaste.

⁴⁴ CUATTROCCHIO, A. Op cit., p. 6

- **Fibras reforzantes:** Textiles y de acero, usualmente en forma de hilos, que aportan resistencia a los neumáticos; tales como algodón, nylon y poliéster. La cantidad de acero y fibras sintéticas reforzantes en los neumáticos varía según el fabricante.

- **Agentes vulcanizantes:** El azufre se usa para entrecruzar las cadenas de polímero en el caucho.

- **Acelerantes:** Compuestos órgano – sulfurados; tales como benzotiazol y derivados, óxido de zinc y ácido esteárico.

- **Retardantes:** N-nitroso difenil amina.

- Otros componentes (antioxidantes o antiozonizantes, adhesivos).

La tabla 2 presenta de forma general la composición química del caucho de acuerdo al tipo de vehículo.

Tabla 2. Componente químico del caucho.

Componentes	Tipo de vehículo		Función
	Automoviles % en peso	Camiones % en peso	
Cauchos	48	45	Estructural – Deformacion
Negro humo	22	22	Mejora Oxidación
Oxido de Zinc	1,2	2,1	Catalizador
Materia textil	5	0	Esqueleto estructural
Acero	15	25	Esqueleto estructural
Asufre	1	1	Vulcanización
Otros	12		Juventud

Fuente: “El uso de caucho de cubiertas en mezclas asfálticas”. Centro de Investigaciones Viales LEMaC

En cuanto a su composición química del caucho que se va utilizó para el desarrollo de este proyecto se presenta en la tabla 3 puede variar según el uso a que están destinados:

Tabla 3. Componente químico del caucho - Automóviles.

Elementos	%
Carbono	70 – 83
Hidrógeno	5 – 7,5
Azufre	1,2 – 1,9
Color	0,1 – 0,8
Nitrógeno	1,5
Oxígeno	5
Zinc	1,2 – 2,7
Hierro	5 – 18
Otros	5

Fuente: “Materiales y compuestos para la industria del neumático”.
Departamento de ingeniería mecánica F.I.U.B.A.

4.4. ARCILLA CALCINADA

4.4.1 Extracción – Definición: La arcilla es un material natural de aspecto terroso constituido esencialmente por filosilicatos de grano muy fino, es la materia prima industrial por su volumen de explotación y por el valor de la producción por generar materiales de construcción y agregados. Es un grupo de minerales que se componen de características mineralógicas y genéticas. La arcilla como lo dice García y Suarez no sólo tiene connotaciones mineralógicas, sino también de tamaño de partícula, en este sentido se consideran arcillas todas las fracciones con un tamaño de grano inferior a 2 mm⁴⁵.

La extracción en la mayoría de las arcillas se obtiene en las canteras. Generalmente es sencillo, reduciéndose a un machaqueo previo y eliminación de la humedad y finalmente, a una molienda hasta los tamaños de partícula deseados. La temperatura de secado depende de la utilización posterior de la arcilla⁴⁶. Una vez extraído el suelo es necesario dejarlo reposar para que se

⁴⁵ GARCÍA ROMERO, Emilia y SUÁREZ BARRIOS, Mercedes. Las arcillas: propiedades y usos. Madrid: Universidad Complutense y Universidad de Salamanca, 2007. p. 3.

⁴⁶ Ibid., p. 16.

produzca un proceso de meteorización; así los agentes atmosféricos, se encargan de desarrollar y homogeneizar la masa⁴⁷.

La técnica de la arcilla cocida en la producción de ladrillos y tejas para construcción, tiene más de 4,000 años. Se basa en el principio que los suelos arcillosos (que contienen de 20 a 50% de arcilla) experimentan reacciones irreversibles, cuando son quemados a 850-1000°C, con lo cual las partículas se unen unas a otras como un material cerámico vidrioso⁴⁸. La arcilla calcinada empleada para la realización de esta investigación se obtuvo del proceso industrial en la fabricación del ladrillo; ya que este material es el residuo sobrante del proceso de horneado.

La granulometría de esta arcilla se clasificó a través del material que pasa por tamiz No 200.

4.4.2. Propiedades Físico-Químicas. La utilización de la arcilla calcinada se debe a su propiedad esencial que es la plasticidad y facilita el moldeado. Aunque esto depende del contenido de arcilla, las proporciones excesivas de arcilla pueden causar fuertes contracciones y agrietamientos, lo que es inadecuado en la fabricación de ladrillos. Para producir tejas y ladrillos de buena calidad se necesitan realizar cuidadosos ensayos del suelo. Así, hay una gran variedad de métodos mecanizados y no mecanizados para la extracción, preparación, moldeado, secado y cocido de la arcilla.⁴⁹

4.4.3 Composición Química. Es importante conocer las propiedades químicas de este residuo sólido, ya que sus propiedades brindan la posibilidad de utilizarlos en las aplicaciones industriales, de acuerdo con la carta de presentación (ver tabla 4) de la empresa brasileña *Mineração Curimbaba*⁵⁰, la arcilla calcinada presenta las siguientes características químicas, mineralógicas y propiedades típicas:

⁴⁷ INSTITUTO NACIONAL DE DEFENSA DE LA COMPETENCIA Y DE LA PROTECCIÓN DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL. INDECOPI Comisión de reglamentos técnicos y comerciales. Normas técnicas ITINTEC 331.017, Peru, 1978, p. 1.

⁴⁸ Mineralogía de las arcillas calcinadas. (Sistema de acceso público) [en línea]. 2001.

⁴⁹ Ibid., (Sistema de acceso público) [en línea]

⁵⁰ Arcilla calcinada molida. (Sistema de acceso público) [en línea]. Brasil: Mineração Curimbaba. 2004 [citado 2013-03-9]. Disponible en internet: http://www.curimbaba.com.br/es/produtos/pdf/argila_calcinada_moida.pdf.

Tabla 4. Componente química de la Arcilla Calcinada.

Características Químicas		Propiedades Típicas		Características Mineralógicas
Al ₂ O ₃ (Óxido de Aluminio)	51,0%	Absorción de Aceite de Linaza	39%	Mulita, Al ₆ Si ₂ O ₁₃
SiO ₂ (Dióxido de Sílice)	41,3%	Retención en #200	1,5%	Kaolinita, Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
TiO ₂ (Dióxido de Titánico)	2,70%	Humedad	2,0%	Gibsita, Al(OH) ₃
Fe ₂ O ₃ (Óxido de Hierro)	2,90%			Microcline, KAISi ₂ O ₃
CaO (Óxido de Calcio)	0,07%			Anatase, TiO ₂
MgO (Óxido de Magnesio)	0,05%			Hermalita, alfa- Fe ₂ O ₃
K ₂ O (Óxido de Potasio)	1,90%			
Na ₂ O (Óxido de Sodio)	0,07%			

Fuente: Arcilla calcinada molida. Mineração Curimbaba.

5. PROCEDIMIENTO

5.1. Modificación de asfalto

El proceso en la modificación del asfalto se fundamentó en la mezcla del GCR (18% p/p) y arcilla calcinada (5%,10%,15%, 20% y 25% p/p), a una temperatura elevada (155 a 170°C), durante un determinado tiempo (30 a 120 min). Esa mezcla reacciona y forma un compuesto filler/asfalto-caucho.

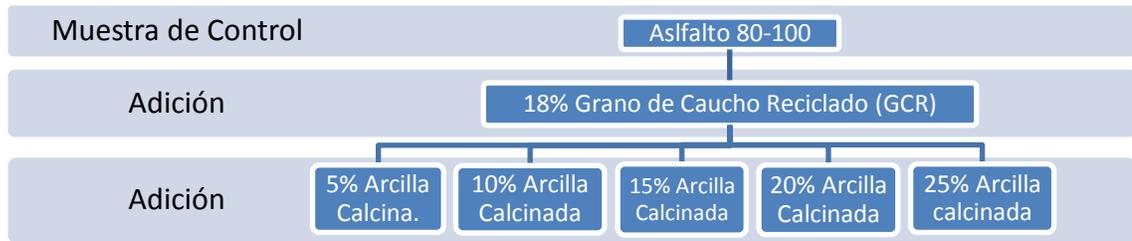
El grado de modificación para estas muestras depende de varios factores como el tamaño de los agentes modificadores, la temperatura y tiempo de reacción, la energía mecánica durante la mezcla, logrando que estos materiales modifiquen la mezcla mejorando el desempeño de los asfaltos en sus propiedades físicas y reológicas⁵¹. Para modificar el asfalto se debe seguir los siguientes pasos:

5.1.1 Preparación de la muestra. El polímero empleado para la realización de esta investigación fue el grano de caucho reciclado, proveniente de automóviles en donde paso por un proceso de molienda para obtener la granulometría apropiada. Este proceso de trituración y tamizado (pasa tamiz No 40) se realizó antes de ser incorporado al asfalto, en el cual se obtienen superficies con irregularidades superficiales muy bajas. La arcilla se extrae de la calcinación del ladrillo, el polvillo que queda de esta fabricación es tamizado (pasa tamiz No 200) y usado como llenante mineral en estos ensayos.

Los materiales se utilizaron de acuerdo a la especificación del IDU en donde describe el tipo de asfalto y de grano de caucho con que debemos trabajar. De acuerdo con esta especificación se tomó el 18% de caucho pasante tamiz 40 y asfalto 80/100 proveniente de Barrancabermeja. Para el caso de la llenante mineral usamos arcilla calcinada en diferentes proporciones, (ver Figura 8).

⁵¹ FIGUEROA. Op. cit. p. 67

Figura 8. Porcentajes de adición.



El asfalto se modificó utilizando una mezcladora eléctrica, adquirida para esta investigación (ver Figura 9). Se realizaron pruebas preliminares de penetración y punto de ablandamiento, tanto al ligante sin modificar como a los modificados, con el fin de obtener patrones comparativos y mejorar las condiciones del funcionamiento de la mezcladora en cada modificación.

Se calentó el asfalto entre 155°C y 170°C durante 10 minutos para estabilizar la temperatura. Ya pasado el tiempo de estabilización se mezcló la cantidad de grano de caucho hasta obtener una mezcla homogénea y posteriormente se añadió el porcentaje del filler hasta obtener nuevamente una mezcla homogénea.

El mezclado se realizó durante un tiempo estimado de 1.5 horas, conservando una velocidad constante de 350 rpm según las especificaciones.

Figura 9. Proceso de mezclado en la adición de los polímeros.



Posteriormente se vertió el ligante modificado en los recipientes adecuados para dar inicio a los ensayos. Se tuvo en cuenta que si la mezcla de asfalto caucho no es usada dentro de las primeras cuatro horas después del tiempo de reacción (después de mezclada), y no se mantuvo almacenada a una temperatura superior a 155°C, se habría pasado un ciclo de calentamiento. El número total de ciclos de calentamiento no debe ser mayor de dos. Mientras la mezcla asfalto-caucho este almacenada a altas temperaturas se debe mantener en agitación constante para evitar separación del GCR y el cemento asfáltico. En el caso de que se use más de dos ciclos los resultados de los ensayos pueden variar, debido al envejecimiento de la mezcla.⁵²

5.2. ENSAYOS

5.2.1. Penetración. Norma I.N.V.E – 706 – 07, Penetración de los materiales Asfálticos.

Este laboratorio determina la consistencia de los materiales asfálticos que se encuentran en estado semisólido o totalmente sólido, para esto, se realiza una penetración de forma vertical de acuerdo con unos parámetros establecidos en la norma anteriormente nombrada.

Materiales y equipo: Penetrómetro, aguja de penetración, baño de agua, cronometro, linterna, recipiente circular con las dimensiones que se presentan en la Tabla 5, muestras de asfalto.

Tabla 5. Dimensiones del recipiente circular.

	Diámetro mm(")	Profundidad mm(")
Penetración hasta 200	55 (2,17)	35 (1,38)
Penetración hasta 200 y 350		70 (2,75)

Fuente: Norma I.N.V.E – 706 – 07.

⁵²ET-GE-002 Para la aplicación del grano de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas en caliente por vía húmeda. Pág. 7, IDU 2011

Procedimiento ensayo de penetración.

1. Se tomaron 500 gr del material bituminoso 80/100 y se vertieron en un recipiente a una temperatura entre 90°C y 110°C, se agito cuidadosamente para evitar sobrecalentamientos y que se homogenice el material adecuadamente.
2. Cuando el ligante pasó a estado líquido, se agregó el 18% de grano de caucho reciclado con respecto a la cantidad de asfalto, este agregado paso por el tamiz N° 40 y fue mezclado a una temperatura entre 155 °C y 170 °C de acuerdo a la especificación del IDU durante 30 min; así mismo se realizó para las diferentes adiciones de arcilla calcinada. Luego se vertió la mezcla en los recipientes de dimensiones establecidas, haciendo tres capas y en cada una se sacudió hacia abajo logrando que la mezcla se asiente y evitando que se formen burbujas, se llenó dejando una altura de al menos 10 mm por debajo del borde del molde.
3. Se cubrieron los moldes con un frasco de vidrio invertido para protegerlos del polvo y también para evitar y eliminar las posibles burbujas de aire, dejándolo en un periodo de 1 - 1.5 h, para que las muestras permanecieran a temperatura ambiente. (Ver Figura 10)

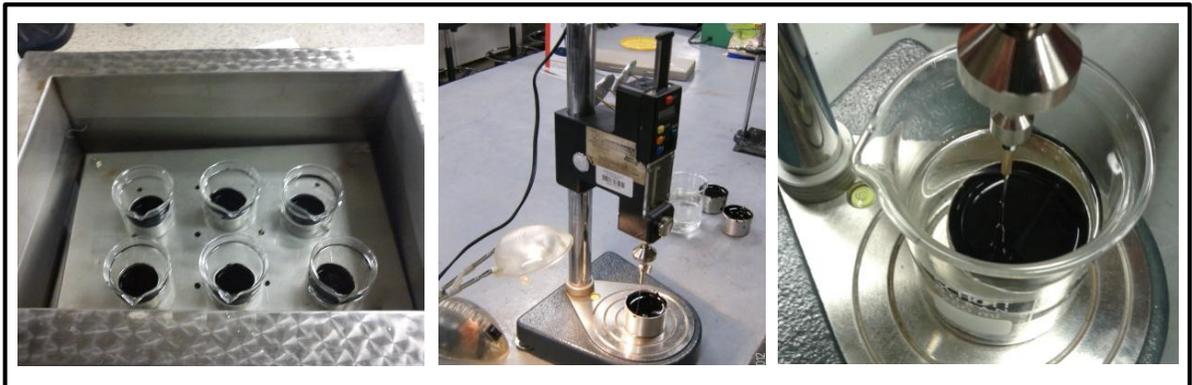
Figura 10. Ensayo de Penetración (preparación de las muestras).



4. Posteriormente se dejaron las muestras en baño maría a una temperatura de 25 °C de acuerdo a la norma, durante un periodo de 1 - 1.5 h (el mismo periodo anterior de enfriamiento).
5. Se ingresó la muestra con molde en un recipiente (Beaker) con agua para que conservara la temperatura de 25°C, se ubicó rápidamente en la plataforma del

Penetrómetro y se manipuló la aguja de penetración dejándolo a menos de 1cm del borde del recipiente circular, esta aguja hizo un contacto suave en la superficie de la muestra. (ver Figura 11)

Figura 11. Realización del ensayo de Penetración (ejecución del ensayo).



6. Finalmente se realizó la penetración en varios puntos por un periodo de tiempo de 5 s para cada una y así se obtuvo la distancia de penetración expresada en decimas de milímetros.

5.2.2. Punto de ablandamiento. Norma I.N.V.E – 712 – 07. *Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola).*

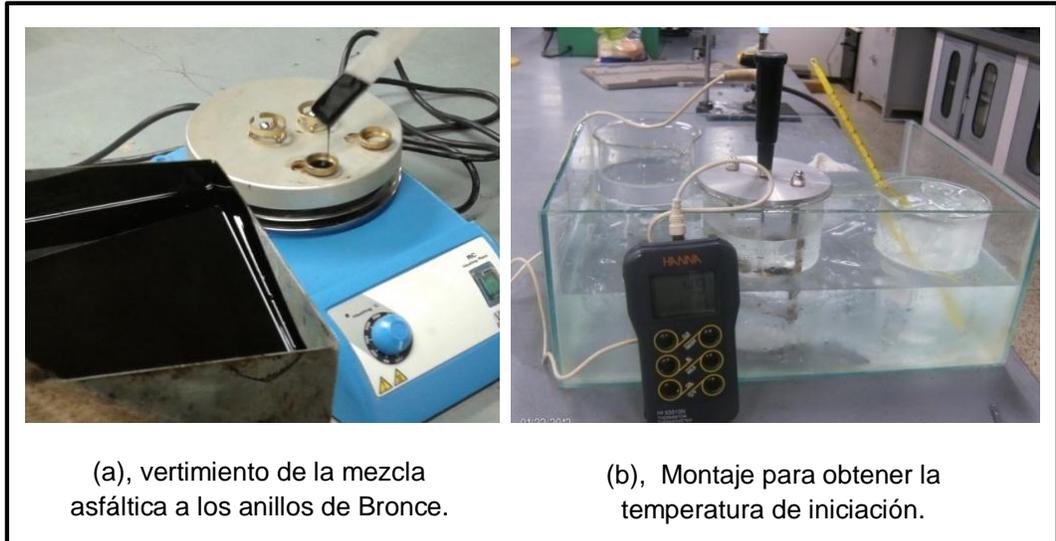
Materiales y equipo: Anillos, 2 esferas, Guías de contacto de bolas, platos de base, recipiente de vidrio de capacidad de 800 ml, soporte de anillos, termómetro de intervalo de temperatura de -2°C a 80°C, liquido de baño (agua), muestras de material asfáltico suficiente para introducir en los anillos.

Procedimiento ensayo de Punto de ablandamiento.

1. Se tomaron 160 gr del material bituminoso 80/100 y se vertieron en un recipiente a una temperatura entre 90°C y 110°C, se agito constantemente para evitar el sobrecalentamiento. Por otro lado se colocaron los anillos en un recipiente dejándolos en el horno a la misma temperatura de la mezcla asfáltica.
2. Ya teniendo el ligante en estado líquido se agregó el GCR y las diferentes adiciones de arcilla calcinada, luego se vertió esta mezcla cuidadosamente en los

anillos de bronce que estaban ubicados en una base cubierta con glicerina impidiendo que la mezcla quede adherida. (Ver Figura 12 (a))

Figura 12. Ensayo de Punto de Ablandamiento (Preparación de las muestras).



3. En seguida se tomaron las muestras y se cubrieron con un frasco para impedir que se contaminaran y logrando que las muestras permanecieran a una temperatura ambiente durante 30 min.

4. Se colocaron las muestras en la placa base y se realizó el montaje del aparato de acuerdo a las medidas establecidas en la norma, se logró tener una temperatura de iniciación de $5^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$ con un recipiente de vidrio lleno de agua y cubos de hielo (ver Figura 12 (b)), permaneciendo a esta temperatura durante 15 min.

Figura 13. Ensayo de Punto de Ablandamiento (ejecución del ensayo).



7. Luego se colocaron las esferas de acero en el centro de cada anillo y se calentaron en una base con un mechero a gas y de esta manera la temperatura incrementó cumpliendo el índice de crecimiento ($5^{\circ}\text{C}/\text{min}$).

8. Finalmente se tomaron las temperaturas por cada caída de bola de acero cubierto de la mezcla asfáltica (ver Figura 13).

5.2.3. Adherencia en bandeja. Norma I.N.V.E – 740 – 07, *Adherencia en Bandeja.*

Materiales y equipo: Bandeja, horno, agua, 50 partículas representativas del agregado grueso y 100 ml de asfalto a analizar.

Procedimiento ensayo de adherencia en bandeja.

1. Se agitó cuidadosamente ligante asfáltico a una temperatura entre 90°C y 110°C impidiendo el sobrecalentamiento y obteniendo la homogenización del ligante. Se tomó una bandeja de ensayo (20 cm x 20 cm) y se agregó una película de 2 mm del ligante y sus respectivas modificaciones:

- Asfalto 80/100
- Asfalto 80/100 + 18% p/p GCR

- Asfalto 80/100 + 18% p/p GCR + % p/p de adición de arcilla calcinada

2. Se dejaron las bandejas con su respectiva mezcla a temperatura ambiente hasta que alcanzaron una temperatura de 60°C; mientras esto ocurría, se seleccionaron 50 partículas de agregados para cada bandeja, que fueron secadas previamente en el horno.

3. Posteriormente se colocaron las 50 piezas una por una en cada bandeja (ver Figura 14), y se dejó bajar la temperatura, hasta que alcanzó 50 °C y enseguida se ubicó en el horno a 60 °C durante 24 horas.

Figura 14. Ensayo de Bandeja de Adherencia (Preparación de las muestras).



4. Se agregó agua destilada hasta cubrir las partículas y se mantuvo a temperatura ambiente durante 4 días.

5. Finalmente se retiraron las partículas con ayuda de un alicate y se evaluó visualmente la cantidad de la mezcla asfáltica que quedó adherida.

5.2.4. Stripping. Norma I.N.V.E – 737 – 07, Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua.

Materiales y equipo: balanza, horno, recipientes, vasos de prueba, agregados, agua destilada y ligante.

Procedimiento ensayo de Stripping.

1. Se tomaron 100 gramos de agregados de granulometría definida por la norma, los cuales se mantuvieron en un horno a 135 °C durante 1 h. Luego se obtuvieron 5.5 gramos de las siguientes mezclas:

- Asfalto 80/100
- Asfalto 80/100 + 18% p/p GCR
- Asfalto 80/100 + 18% p/p GCR + % p/p de adición de arcilla calcinada

2. Después del tiempo estimado, se mezclaron los agregados para cada muestra bituminosa de forma continua y permanente durante 3 minutos, obteniendo un recubrimiento de los agregados, evitando que la temperatura de mezclado disminuyera (ver Figura 15).

Figura 15. Ensayo de Stripping (Preparación de las muestras).



3. Posteriormente se colocó la nueva mezcla en un Beaker de 500 ml de capacidad y se llenó con 400 ml de agua destilada dejándolo durante 16 a 18 h a temperatura ambiente.

4. Se retiró cuidadosamente cualquier partícula que haya quedado flotando en la superficie del agua.

5. Para analizar los agregados se utilizó una lámpara y desde varios enfoques visuales se estimó el porcentaje de área cubierta por la mezcla evaluándolo con un porcentaje mayor o menor al 95%.

5.2.5. Viscosidad rotacional. Norma I.N.V.E – 717 – 07. Método para determinar la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional.

Materiales y equipos: Horno, termómetros, balanza, vástagos cilíndricos, viscosímetro rotacional, controlador de temperatura, solventes o limpiadores desengrasantes, computador, cable puerto Com y CD del programa wingather 32 del respectivo equipo.

La Tabla 6 presenta el uso del de los vástagos cilíndricos o husillos dependiendo de las temperaturas, tipos de asfalto y volúmenes de ligante.

Tabla 6. Uso del Spindle o vástago cilíndrico.

Spindle	Temperatura (°C)	Tipo asfalto	Volumen muestra (gr)
SC4-21	>120	Sin modificar	7.1 – 8
SC4-27	60 a 200	Sin / Modificado	10.4 – 11
SC4-29	< 120	Modificado	13.5 – 14

Procedimiento ensayo de Viscosidad Brookfield

1. Se tomaron 13 y 10 gr de mezcla asfáltica dependiendo del spindle o vástago cilíndrico y se calentaron sin que excedieran los 140°C y se vertieron en un tubo de ensayo. (ver Figura 16)

2. Se calibró el equipo nivelando la termocelda y la cabeza rotacional y se encendió para que se graduara el viscosímetro sin haber instalado ningún spindle.

Figura 16. Ensayo de Viscosidad Rotacional (Preparación de las muestras).



3. Se programaron la termocelda y la cabeza rotacional mediante un equipo de temporizador de temperatura y el software del equipo. Se tuvo en cuenta que para cada cambio de temperatura se debió estabilizar durante 10 min a temperatura constante.

4. Una vez programado el equipo, se eligió el spindle o huella y se procedió a obtener los datos (ver Figura 17).

Figura 17. Montaje del Viscosidad Rotacional.



5.2.6. Fotografías SEM.

Materiales y equipos: Recipiente circular plano (moneda \$100), cinta doble faz negra especial, arcilla calcinada y grano de caucho reciclado, Metalizador Dentom Vacuum Desk IV y Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM-6490LV proporcionado por la universidad de los Andes.

Procedimiento ensayo de fotografías SEM.

1. Se tomó la moneda limpiándola exhaustivamente para evitar impurezas en el análisis. Luego se colocó la cinta doble faz y sobre la superficie de la cinta, se agregó la muestra de GCR o de arcilla calcinada según el caso.
2. Las muestras se ubicaron dentro del Metalizador Dentom Vacuum Desk IV y se realizó el recubrimiento de oro ya que estos materiales no son conductores de corriente eléctrica y es necesario que las muestras lo sean para evitar que se carguen causando la desviación del haz de electrones. (Ver figura 18)

Figura 18. Ensayo de Fotografías SEM (Preparación de las muestras).



Después de haber preparado las muestras con el recubrimiento de oro, se ubicaron en el Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM-6490LV (Ver figura 19) y a través de la energía dispersiva de rayos X y la interacción de los electrones secundarios, se obtuvieron la composición química y morfología de cada muestra.

Figura 19. Ensayo de Fotografías SEM (Ejecución de las muestras).



4. Para el aspecto morfológico: Los electrones producidos por un filamento de tungsteno, son acelerados con una diferencia de potencial de varios miles de Kilovoltios. Por medio de lentes electromagnéticas estos son enfocados para obtener la imagen ampliada del material estudiado. El haz de electrones produce una imagen de electrones secundarios que provienen de la superficie barrida por los electrones incidentes. El rebote de este haz de alta energía con la superficie, produce una imagen morfológica de un área específica.⁵³

El haz de electrones penetra la superficie máximo a 1 micra de profundidad, dependiendo de la intensidad de la radiación de electrones y el tipo de material.⁵⁴

Para la composición química por EDX (Energía dispersiva de rayos X): La interacción de los electrones incidentes de alta energía (acelerados con un alto voltaje Kev) sobre el material, permitieron obtener el espectro atómico de los elementos constitutivos debido a la producción de señales características de cada uno de ellos. Estas señales corresponden a transiciones de electrones de las

⁵³ GAVIRIA, Sergio. Re: Procedimiento SEM. (en línea). Mensaje a: Javier Andrade. 10 Abril 2013. Comunicación personal.

⁵⁴ GILL, Robin. Chemical fundamentals of geology. In: Atomic Spectra. Second edition, London, Chapman & Hall, 1996. p. 136.

nubes internas de los átomos cuando reciben el impacto de un haz de electrones de alta energía que cuyos valores son característicos para cada elemento. Los electrones del primer nivel de energía ($n=1$ o K) pasan a niveles superiores y regresan a su posición original emitiendo señales de tipo K. Los del segundo nivel ($N=2$ o L) producen transiciones L y así sucesivamente. Para los elementos de número atómico pequeño (hasta $Z = 25$) solamente se registran señales K, los elemento de mayor número atómico se registran sucesivamente señales L y para los elementos de mayor número atómico se registran además las señales M y/o N.⁵⁵

Las señales de emisión se recogieron en un detector de silicio (litio), un semiconductor que registró la energía dispersiva de rayos X (EDX) producida por los diferentes elementos. El resultado es la composición química de la superficie del material en los puntos o áreas de análisis. Se pudo analizar una superficie escogida en la muestra para generar mapas de elementos que reflejaron cambios en la composición y determinaron la repartición de la composición química en dicha área.⁵⁶

⁵⁵ Ibid, GAVIRIA, Sergio. Comunicación personal.

⁵⁶ ORTIZ, Aracely. El microscopio electrónico de barrido un instrumento útil para la ciencia. (En línea), Universidad Autónoma de Aguascalientes. Extraído de: <http://www.amemi.org/>

6. ANÁLISIS Y RESULTADOS

6.1. PENETRACIÓN

De acuerdo a la norma *I.N.VE – 706 -07* y a la especificación *ET-GE-002* elaborada por el *IDU* se tomaron tres lecturas para cada adición de arcilla calcinada a una temperatura de 25°C. Para cada resultado se realizó una comparación con la muestra control y con la muestra de asfalto-caucho. Se observó la variación del comportamiento que tiene cada adición del filler o llenante mineral, siguiendo la tabla 7 la cual indica las diferencias de los valores que pueden llegar a obtenerse.

Tabla 7. Valores de diferencia máxima entre extremos.

Penetración (mm/10)	0 a 49	50 a 149	150 a 249	Entre 250 y 500
Diferencia máxima entre valores extremos	2(mm/10)	4(mm/10)	12(mm/10)	20(mm/10)

Fuente: norma *I.N.VE – 706 -07*

Teniendo en cuenta que se obtuvieron 63 datos en total se calcularon los promedios para cada muestra y de esta manera en la tabla 8 se expresaron los resultados de la penetración que tiene el asfalto, el asfalto-caucho y las diferentes adiciones de arcilla calcinada. Se determinó que la muestra control o sin ninguna modificación arrojó un valor de 84.77 (mm/10) siendo la penetración que superó las demás muestras.

En cuanto a los resultados se obtuvieron las diferencias máximas de valores extremos para todas las muestras, para comprobar que se encontraban dentro de los parámetros indicados por la norma; para nuestro caso en una penetración entre 50 mm/10 y 149 mm/10 la diferencia máxima permitida es de 4 mm/10. (Ver Anexos)

Tabla 8. Promedio de los resultados de penetración.

PENETRACIÓN (mm/10)		
MUESTRA	PORCENTAJE DE ADICIÓN	PROMEDIO
1	SIN MODIFICAR	84,77
2	18% GCR	56,23
3	18% GCR + 5% AC	54,77
4	18% GCR + 10% AC	53,48
5	18% GCR + 15% AC	52,5
6	18% GCR + 20% AC	50,61
7	18% GCR + 25% AC	48,18

Como pudimos constatar en la tabla 8, la utilización del grano de caucho reciclado ayudo a mejorar las condiciones de esta propiedad, disminuyendo la penetración significativamente obteniendo un valor de 56.23 (mm/10), así mismo, este valor indicó que la mezcla se realizó adecuadamente ya que se encuentran entre los valores establecidos por la especificación *ET-GE-002* para esta propiedad, donde los resultados de penetración están estipulados entre los 40 mm/10 y 70 mm/10.

El comportamiento físico que tiene el caucho sobre el ligante, en cuanto a la resistencia a la penetración, mostró una mejora significativa ya que las partículas de caucho actúan como poros dentro la mezcla, de acuerdo con el artículo publicado en la revista de la facultad de ingeniería universidad central de Venezuela⁵⁷, se evaluó el comportamiento del GCR de diferentes tamaños en una mezcla de concreto y los resultados indicaron que los especímenes con caucho mostraban una alta capacidad para absorber la energía plástica. Dichas probetas ensayadas soportaron cargas post-fractura y manifestaron desplazamientos significativos, los cuales son parcialmente recuperables. Por esta razón el grano de caucho reciclado tiene la habilidad de experimentar grandes deformaciones elásticas antes de la falla⁵⁸.

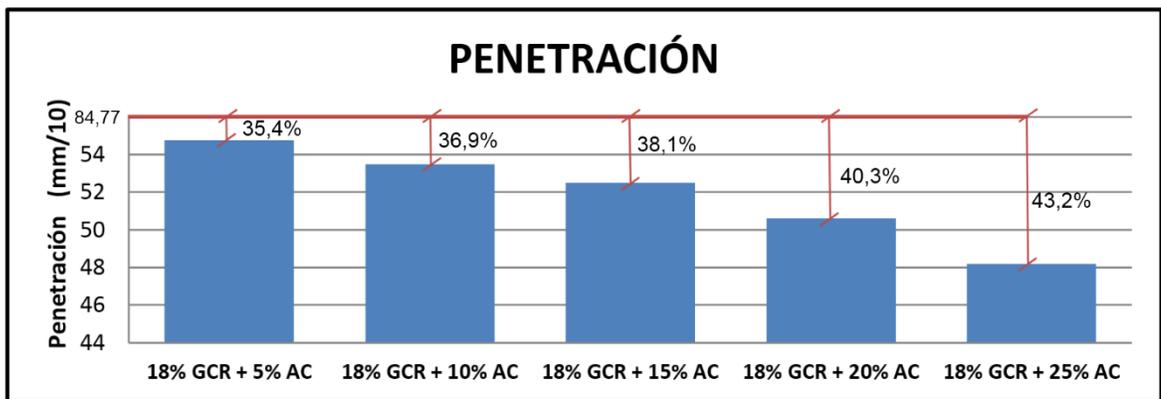
⁵⁷ Estudio de concreto elaborado con caucho de reciclado de diferentes tamaños de partículas. (Sistema de acceso público) [en línea]. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela. Marzo de 2008 [citado 2013-04-7]. Disponible en internet: <http://www.scielo.org.ve>.

⁵⁸ TOPCU, IB., AVCULAR, N. (1997). Analysis of rubberized concrete as a composite material, *Cement and Concrete research*, 27(8), 1135-1139.

De igual forma la mejora en esta propiedad se debe a un incremento en el contenido de aire con la concentración de caucho⁵⁹, así como a la existencia de enlaces interraciales débiles entre la pasta de cemento y el caucho recuperado⁶⁰.

Se presentaron también los resultados que se obtuvieron de las muestras al aumentar las adiciones de la arcilla calcinada y se analizó que mejoró la consistencia de esta propiedad; ya que para cada incremento de porcentaje, se observó una disminución en la penetración. De esta manera se denotó una reducción en la penetración del 33,7% al utilizar el GCR. Cuando se usó el 5% - 10% - 15% - 20% - 25% de Arcilla Calcinada se denotó una reducción del 35,4% - 36,9% - 38,1% - 40,3% - 43,2% respectivamente. (Ver figura 20)

Figura 20. Resultados del ensayo de penetración de los diferentes porcentajes de adición de arcilla calcinada.



Por lo anterior se determinó que en cuanto sea mayor la utilización de la arcilla calcinada como llenante mineral va a ocasionar una mejora notable en la consistencia de la mezcla asfáltica, por esta razón se pudo constatar que el porcentaje óptimo de la llenante mineral es de 25%. (Ver figura 21)

En cuanto al comportamiento físico que tiene la arcilla calcinada según el estudio de la adición de arcillas calcinadas en la durabilidad de hormigones⁶¹, debido a la

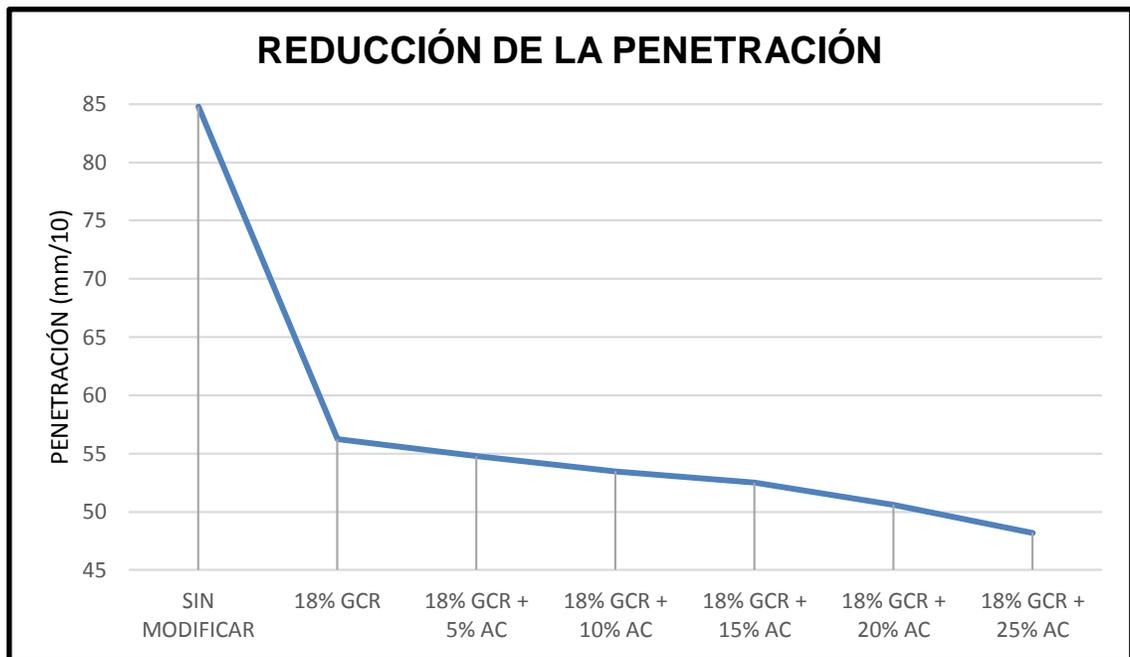
⁵⁹ ARGUELLES, A. Hormigones. Fabricación y Cálculo. Madrid. 1980

⁶⁰ ALVAREZ, H., ALVAREZ, M. (1985). Porosidad técnica del concreto. Tesis de pregrado, UCV, Caracas.

⁶¹ Estudio de la adición de arcillas calcinadas en la durabilidad de hormigones. (Sistema de acceso público) [en línea]. Santiago, Chile: Revista Ingeniería de Construcción Vol. 26 N°1, Abril de 2011 [citado 2013-04-7]. Disponible en internet: <http://www.scielo.cl>.

alta finura alcanzada por la adición de este filler reduce la porosidad capilar del material, destacándose el suelo arcilloso calcinado con una disminución de más del 20% respecto a la referencia de cemento puro a los 28 días. Al parecer, la alta finura de esta puzolana influye en la estructura interna de poros capilares, lo cual provoca una mayor impermeabilidad respecto al resto de los microhormigones fabricados.

Figura 21. Reducción de la penetración con los diferentes porcentajes de adición de arcilla calcinada.



Considerando el comportamiento que tiene la arcilla calcinada como llenante mineral, se logró comparar con otros estudios en donde se evidenció el beneficio que tiene el uso de este filler para esta propiedad, afirmando que al aumentar el porcentaje de adición de la arcilla calcinada disminuye la penetración mejorando su consistencia, de esta manera en el proyecto de Mendoza y Salazar afirman que en cuanto mayor sea la participación de la arcilla calcinada mayor va a ser la mejora en la consistencia del asfalto. En el porcentaje de 0% la penetración es del

66.17 (mm/10) y va disminuyendo según la cantidad de arcilla calcinada hasta cuando se tiene el 50% de adición la penetración es del 41.89 (mm/10).⁶²

En cuanto al estudio de Romero y Sánchez, se utilizó el 1%, 3% y el 5% de arcilla calcinada sin añadirle grano de caucho reciclado, aquí se encontró con respecto a la temperatura de 25°C que mejoró las condiciones de esta propiedad, afirmando que el análisis de resultados demuestra que tanto la arcilla como el cemento mejoran la consistencia final de la muestra de asfalto y a medida de que el porcentaje aumenta en cada uno de estos, esta propiedad mejora.⁶³

Tabla 9. Comparación Resultados de penetración de los proyectos de grado.

<i>PENETRACIÓN</i>	
TIPO	PENETRACIÓN (mm/10)
Asfalto 60 /80 + 5% AC ⁶⁴	52,83
Asfalto 80/100 + 18% GCR + 25% AC	48,18
Asfalto 60/70 + 50% AC ⁶⁵	41,89

El comportamiento que tuvo la arcilla calcinada da la posibilidad de utilizarla como llenante mineral, debido a que otorga a la mezcla asfáltica un aumento de la consistencia reflejando una baja tendencia al fisuramiento, como se pudo ver en la Tabla 9, en cada proyecto sea cual sea el asfalto que se use, la penetración tiende a disminuir con la modificación.

6.2. PUNTO DE ABLANDAMIENTO

⁶² MENDOZA QUINTERO, María Alejandra; SALAZAR SUSUNAGA, María Paula. Efecto de la arcilla calcinada en un asfalto B60/70 en porcentajes del 5 % al 50 %. En: Análisis y resultados. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia, 2012. p. 48.

⁶³ ROMERO MARTÍNEZ, John Jaime; SÁNCHEZ MARTÍNEZ, María Camila. Efecto de la arcilla calcinada en un asfalto B-60/70 y su incidencia en una mezcla asfáltica MDC-2. En: Análisis y resultados. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia, 2011. p. 52.

⁶⁴ ROMERO MARTÍNEZ, John Jaime; SÁNCHEZ MARTÍNEZ, María Camila. Op. Cit., p. 53.

⁶⁵ MENDOZA QUINTERO, María Alejandra; SALAZAR SUSUNAGA, María Paula. Op. Cit., p. 49.

Este ensayo mostró la susceptibilidad térmica (a altas temperaturas) que tiene el ligante con las diferentes modificaciones al aumentar la temperatura en un intervalo entre 32 °C y 150 °C, controlando el crecimiento de la temperatura (5°c/min).

La tabla 10 indica los resultados que se obtuvieron, en donde se pudo evidenciar los promedios de las temperaturas para cada una de las muestras:

Tabla 10. Resultados de Punto de Ablandamiento.

PUNTO DE ABLANDAMIENTO ASFALTO 80/100		
MUESTRA	TIPO	TEMPERATURA PROMEDIO (°C)
1	SIN MODIFICAR	47,2
2	18% GCR	52,5
3	18% GCR + 5% AC	54,5
4	18% GCR + 10% AC	56,5
5	18% GCR + 15% AC	57,45
6	18% GCR + 20% AC	58,67
7	18% GCR + 25% AC	59,4

Se logró evidenciar que la temperatura del punto de ablandamiento del asfalto 80/100 sin modificar fue de 47,2°C, cumpliendo con los parámetros de precisión establecidos en la norma para un asfalto convencional.

Para la mezcla asfalto caucho la temperatura aumentó considerablemente hasta llegar a 52,5 °C. El comportamiento físico que tiene el caucho mejoró notablemente esta propiedad ya que las partículas pequeñas se ubican en los intersticios o huecos dejados por las partículas grandes. Esto significa que existen menos espacios vacíos en la mezcla⁶⁶, lo cual influye en la plasticidad y compatibilidad de la misma, afectando la trabajabilidad y la resistencia mecánica, es decir, mejorando en forma significativa esta propiedad. De esta manera el caucho presenta componentes elásticos y viscosos, lo cual conlleva a que su deformación a altas temperaturas sea relativamente baja; es decir; cuando se calientan las mezclas asfálticas a una temperatura vítrea, el

⁶⁶ Estudio de concreto elaborado con caucho de reciclado de diferentes tamaños de partículas, Op. Cit. p. 72

material experimenta una transformación gradual, desde el estado sólido elástico blando al líquido viscoso⁶⁷. Logrando de esta manera el aumento en la rigidez a altas temperaturas de servicio y mejorando la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación permanente.

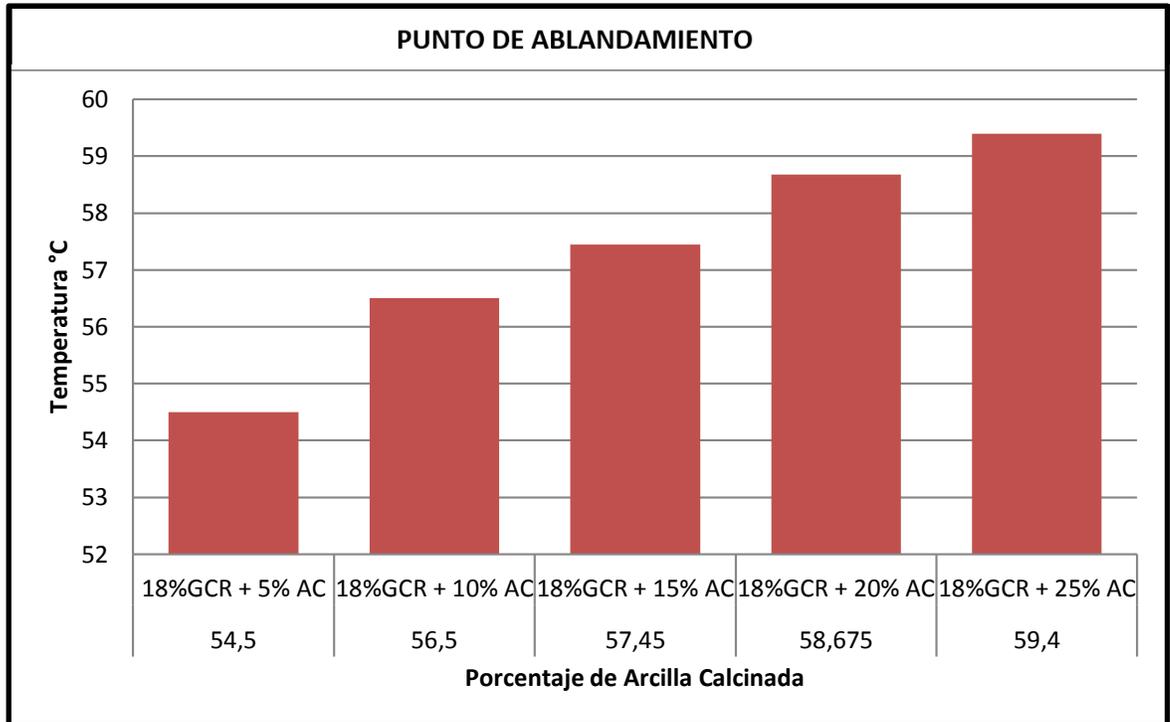
Las mezclas con las diferentes adiciones del filler reflejaron también un aumento en la temperatura del punto de ablandamiento, obteniendo temperaturas entre 54°C y 59°C (Ver figura 23). En cuanto al comportamiento físico que tiene la arcilla calcinada, se analizó que la alta finura de esta puzolana influye en la estructura interna de poros, de igual forma favorece el proceso de hidratación y de su baja conductividad térmica por su composición química, ya que en su estado físico sólido puede compartir o adquirir calor por conducción, esto hace que sus partículas adquieran u otorguen energía estando en contacto con otras de otro material. Ya sea en su estado de arcilla seca o húmeda, así como en su estado de material cocido o cerámico, se le considera material termo-aislante por su baja capacidad de conducción de calor lo que produce una resistencia notoria a las variaciones de temperatura, todas las arcillas tienen esta propiedad pero algunas las presentan en mayor grado, esto gracias al contenido químico de alumina y sílice, entre más alto sea el porcentaje de estos compuestos mayor serán sus propiedades⁶⁸.

El aumento en la temperatura del punto de ablandamiento cuando se agregó el GCR fue de 11,2%. Después de haber adicionado el 5% - 10% - 15% - 20%- 25% de arcilla calcinada aumentó en 15,5% - 19,7% - 21,7% - 24,3% - 25,84% respectivamente (ver Figura 22).

⁶⁷ Utilización del grano de caucho proveniente de llantas en mezclas asfálticas en caliente, (Sistema de acceso público) [en línea]. Oruro, Bolivia: universidad técnica de Oruro. Abril de 2010 [citado 2013-04-7]. Disponible en internet: <http://tesis.dpicuto.edu.bo>.

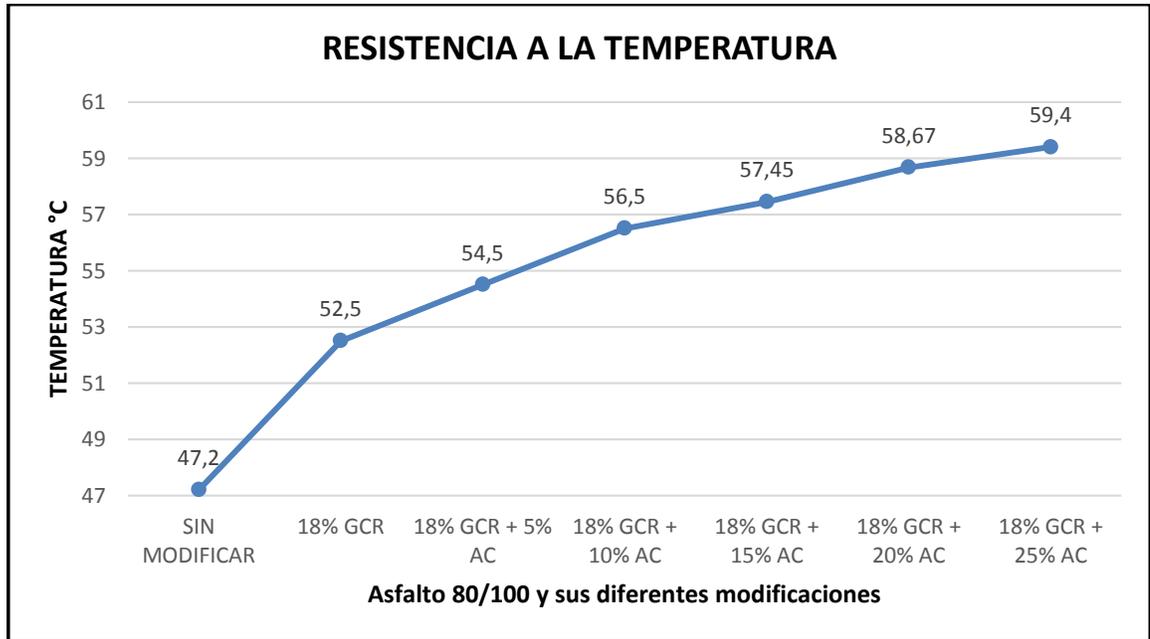
⁶⁸ Arcillas y tierras, (Sistema de acceso público) [en línea]. Bucerías, Nayarit. México.: TUNA Centro de cerámica contemporánea. Marzo de 2001 [citado 2013-04-7]. Disponible en internet: <http://tunaceramica.com>. (***) propiedad que permite la adherencia de una material a cualquier superficie, también denominado "quick stick", adhesión inicial, pegajosidad y agarre rápido.

Figura 22. Comportamiento de la temperatura con los diferentes porcentajes de adición de arcilla calcinada.



En la figura 23 se reflejó que a medida de que se añade el GCR y los porcentajes de la llenante mineral, el aumento de temperatura se elevó mostrando que la arcilla calcinada ayudó controlando la vulnerabilidad a altas temperaturas. Por esta razón se logró demostrar que el porcentaje óptimo de la llenante mineral es de 25%.

Figura 23. Cambio de temperatura de ablandamiento del asfalto con diferentes porcentajes de adición de arcilla calcinada.



En la modificación con este filler de otros asfaltos utilizados en otros estudios se encontró el mismo comportamiento, es decir, el punto de ablandamiento era mayor cada vez que se aumentaba la cantidad de arcilla calcinada, por tal motivo se afirmó que esta temperatura de ablandamiento se hace más alta con el aumento del filler y de esta manera se mejora la resistencia del ligante a altas temperaturas, lo que en la vida útil disminuiría problemas con el ahuellamiento y la fatiga entre otros.⁶⁹

⁶⁹ MENDOZA QUINTERO y SALAZAR SUSUNAGA, Op. Cit., p. 53.

6.3. ÍNDICE DE PENETRACIÓN

Se determinó el índice que describe la susceptibilidad térmica en las modificaciones del asfalto, basándonos en los ensayos de penetración y punto de ablandamiento, aplicando la fórmula que se indica en la respectiva norma.

En la tabla 11 se encuentran los resultados que se obtuvieron de los ensayos de penetración y punto de ablandamiento estimando el índice de penetración de las diferentes muestras.

Tabla 11. Resultados del índice de penetración de las diferentes muestras.

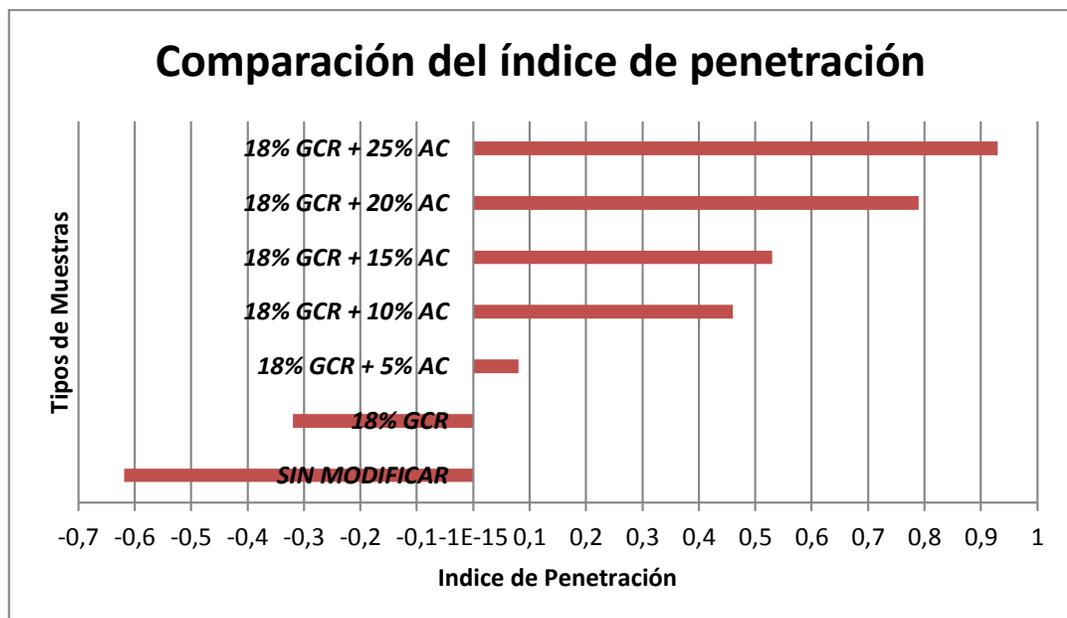
MUESTRA	TIPO	PUNTO DE ABLANDAMIENTO (°C)	PENETRACIÓN (mm/10)	ÍNDICE DE PENETRACIÓN
1	SIN MODIFICAR	47,2	84,77	-0,619
2	18% GCR	52,5	56,23	-0,32
3	18% GCR + 5% AC	54,5	54,77	0,08
4	18% GCR + 10% AC	56,5	53,48	0,46
5	18% GCR + 15% AC	57,45	52,5	0,53
6	18% GCR + 20% AC	58,67	50,61	0,79
7	18% GCR + 25% AC	59,4	48,18	0,93

Se analizó que el comportamiento que asumió el ligante y las respectivas modificaciones para esta propiedad, presentando una mayor resistencia a la deformación permanente; es decir mayor oposición por parte de las partículas, a la alteración inducida por aumento de la temperatura.

Los resultados para cada muestra se encontraron dentro de los parámetros establecidos por la norma.

De acuerdo con la figura 24 se analizó que la muestra patrón y la muestra modificada con grano de caucho reciclado presentaron valores por debajo de 0; por el contrario, cuando se añadió los porcentajes de adición de arcilla calcinada se obtuvo valores de índice de penetración superiores a 0, logrando considerar que uno de los efectos de este filler en los asfaltos modificados es la reducción de la sensibilidad a los cambios de temperatura alta y aumento en la resistencia de la deformación plástica (ahuellamiento).⁷⁰

Figura 24. Comparación del índice de penetración de las diferentes muestras.



Debido a que la modificación de asfalto caucho con 25% p/p de arcilla calcinada reflejó mayor rendimiento respecto a la susceptibilidad térmica se establece como porcentaje óptimo. Convirtiéndolo en una mezcla recomendable para la construcción y repavimentación de vías en condiciones calurosas.

Comparando los resultados obtenidos con otros estudios se demuestra que el uso de la arcilla calcinada en mayores proporciones mejoran esta propiedad, por lo que se puede deducir que el material asfáltico con presencia de llenante mineral

⁷⁰ Ibid., p. 4.

de arcilla presenta propiedades más estable a elevaciones de temperatura, lo que favorece la no deformabilidad excesiva a temperaturas elevadas⁷¹.

6.4. CUBRIMIENTO DE LOS AGREGADOS CON MATERIALES ASFÁLTICOS EN PRESENCIA DEL AGUA (STRIPPING)

Este ensayo presentó el efecto que tiene la arcilla calcinada en una mezcla asfalto-caucho siendo la película que cubre el agregado en presencia del agua. Se realizó el estudio a la muestra control evaluando que el 60% de los agregados mostraron desgaste en las esquinas considerando que hay influencia del ligante asfáltico en el fenómeno de Stripping (ver figura 25); Es decir, el comportamiento que tiene el agua sobre la película de asfalto 80/100 en los agregados provocó la separación en los extremos de los agregados.

Figura 25, Ensayo de Stripping con asfalto 80-100 sin adiciones



Los efectos del Stripping en muestras de asfalto con 18% p/p caucho reciclado, no presentaron ningún desgaste por el efecto del agua, esto quiere indicar que la mezcla favoreció los agregados cubriéndolos satisfactoriamente. (Ver Figura 26)

El comportamiento físico que tiene el caucho frente a la película que cubre el agregado en presencia del agua, es el aumento de la cohesión que se generó en la atracción entre las moléculas que se mantuvieron unidas mientras se encontraban en su estado visco-elástico, siendo así que la mezcla cubra los

⁷¹ ROMERO MARTÍNEZ y SÁNCHEZ MARTÍNEZ, Op. Cit., p. 57.

agregados pétreos y al ser sometida al agente externo (agua) no modifique sus propiedades de cohesión. Por tal motivo no se presentó debilitación en la junta adhesiva y se evitó el fallo frente a esfuerzos mecánicos⁷².

Figura 26. Ensayo de Stripping con asfalto 80-100 + GCR.



La adición del 5% de la arcilla calcinada provocó que un 7% de los agregados fueran afectados por la presencia del agua, ya que se manifestó el desgaste del ligante en las esquinas de estos agregados. Este resultado tal vez insinuó que la conexión de la mezcla y los agregados llegó a desprenderse ya que el material pétreo presentó un cambio de volumen por la presencia del agua generando la contracción de la mezcla. (Ver figura 27)

Figura 27, Ensayo de Stripping con asfalto 80/100 + GCR + 5% arcilla calcinada.



⁷² Tecnología de la adhesión, (Sistema de acceso público) [en línea]. Madrid España: Departamento técnico de Loctite España. 2006 [citado 2013-04-9]. Disponible en internet: <http://www.ulpgc.es/>.

Los resultados obtenidos al agregar el 10%,15%, 20% y 25 % de arcilla calcinada al agregado, fueron una mejor adherencia entre las partículas y película de la mezcla impidiendo que se generara el efecto stripping. (Ver figura 28) Esto quiere decir que la utilización de este filler a mayores porcentajes de adición proporcionó mejores propiedades entre la lámina de asfalto y el agregado grueso.

El comportamiento físico que tuvo la arcilla calcinada en el asfalto modificado fue de mejorar las condiciones entre el agregado pétreo y la mezcla en presencia del agua, ya que estos minerales arcillosos presentan un tamaño reducido de partícula, y presencia de carga en su superficie, lo cual le otorga propiedades físico - químicas muy particulares como la retención y liberación de moléculas orgánicas e inorgánicas, logrando tener la capacidad para mantenerse dispersas o reunirse en agregados voluminosos (hinchamiento). De esta manera la finura de este filler influye en la estructura interna de poros de la mezcla asfáltica, lo cual provoca una mayor impermeabilidad: La adición de arcilla calcinada favorece la formación de fases hidratadas más estables.⁷³

La actividad superficial de los minerales de la caolinita es pequeña. Están formadas por una lámina silícica y otra alumínica. La unión entre todas las retículas es lo suficientemente firme para no permitir la penetración de moléculas de agua. La forma de los granos también es plana o escamosa pero la caolinita no absorbe agua en su estructura molecular, Por lo anterior, los minerales de caolinita pura no presentan el efecto de la expansión al contacto con el agua o fuerte contracción al secarse⁷⁴.

⁷³ LÓPEZ LARA, Teresa; HERNÁNDEZ ZARAGOZA, Juan Bosco; HORTA RANGEL, Jaime; CORONADO MÁRQUEZ, Aleyda; CASTAÑO MENESES, Víctor Manuel. Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas. Facultad de Ingeniería; Universidad Autónoma de Querétaro, 2010, p. 160.

⁷⁴ZEEVAERT L "La Investigación del Suelo por su Estructura y Comportamiento Reológico"; Segunda Conferencia Magistral en el Instituto Politécnico Nacional; México, 1997

Figura 28, Ensayo de Stripping con asfalto 80-100 + GCR + 10%, 15%, 20% y 25% arcilla calcinada.



De acuerdo con los resultados analizados en la tabla 12 se evidenció el comportamiento del ensayo de Stripping, en donde se indicaron los porcentajes de área cubierta del ligante con el agregado y su efecto con el agua.

Tabla 12. Resultados del ensayo de Stripping.

CUBRIMIENTO DE LOS AGREGADOS CON MATERIALES ASFALTICOS EN PRESENCIA DEL AGUA.	
MUESTRA	ESTIMADO DE ÁREA CUBIERTA
Asfalto 80/100	Inferior al 95 %
Asfalto 80/100 con GCR	Superior al 95 %
Asfalto 80/100 con GCR + 5% Arcilla Calcinada	Inferior al 95%
Asfalto 80/100 con GCR + 10% Arcilla Calcinada	Superior al 95%
Asfalto 80/100 con GCR + 15% Arcilla Calcinada	Superior al 95 %
Asfalto 80/100 con GCR + 20% Arcilla Calcinada	Superior al 95%
Asfalto 80/100 con GCR +25% Arcilla Calcinada	Superior al 95%

Comparando los resultados con los proyectos de grado se pudo destacar que el uso de este llenante mineral en grandes proporciones (25% p/p) generó un mayor cubrimiento de los agregados estimando un área cubierta superior al 95%, afirmando que con la acción del filler se aumentó la afinidad que pudo poseer un asfalto con los agregados pétreos. Con la ampliación del porcentaje de adición del filler se notó un mejor cubrimiento frente al agua mejorando las propiedades del asfalto convencional⁷⁵.

6.5. ADHERENCIA EN BANDEJA

Este ensayo estudió el efecto de la arcilla calcinada en diferentes proporciones en el asfalto caucho, analizando el porcentaje de adherencia en agregados gruesos. Los resultados para una muestra control presentaron una adherencia baja ya que hay poca presencia del ligante en el agregado. (Ver figura 29)

Figura 29, Ensayo de Bandeja de Adherencia con asfalto 80-100 sin adiciones



Para la muestra con adición de GCR hay un aumento considerable en esta propiedad, mostrando que el asfalto modificado con GCR fortaleció la consistencia, proporcionando mayor cantidad de esta mezcla adherida al agregado grueso. (Ver figura 30)

⁷⁵ MENDOZA QUINTERO y SALAZAR SUSUNAGA, Op. Cit., p. 64.

Figura 30, Ensayo de Bandeja de Adherencia con asfalto + GCR



El comportamiento físico que tiene el caucho modificado, es debido a su comportamiento visco-elástico y por la adición de resinas de hidrocarburos logrando una mayor tack; es decir logrando que la adherencia forme un enlace entre la mezcla asfáltica con el agregado pétreo. La adherencia responde a las fuerzas de deformación de una manera determinada tanto en la unión como en la separación, por lo tanto el comportamiento visco-elástico proporciona un mayor agarre. ⁷⁶

En las muestras con la adición del 5%, 10% y 15% de arcilla calcinada se logró presenciar mayor conexión sin conseguir la adherencia total de la mezcla, descartando la idea de que podría ser la morfología del agregado ya que se fijaba con la mayor superficie plana posible. (Ver figura 31 (a)) La muestra con el 20% de arcilla calcinada evidenció un mayor aumento en la adherencia, logrando recubrir más la superficie expuesta. (Ver figura 31 (b))

Las muestras con el contenido del 25% de arcilla calcinada revelaron una adherencia superior a las demás muestras analizadas, encontrando que la superficie de los agregados en contacto con la mezcla se unió totalmente, sin dejar rastro de alguna parte faltante. (Ver figura 31 (c))

⁷⁶ J. Royo, Manual de tecnología del caucho. Consorcio nacional de industrias del caucho, Barcelona (1989).

Figura 31. Ensayo de Bandeja de Adherencia con asfalto + GCR + 5, 10, 15, 20 y 25 % de AC



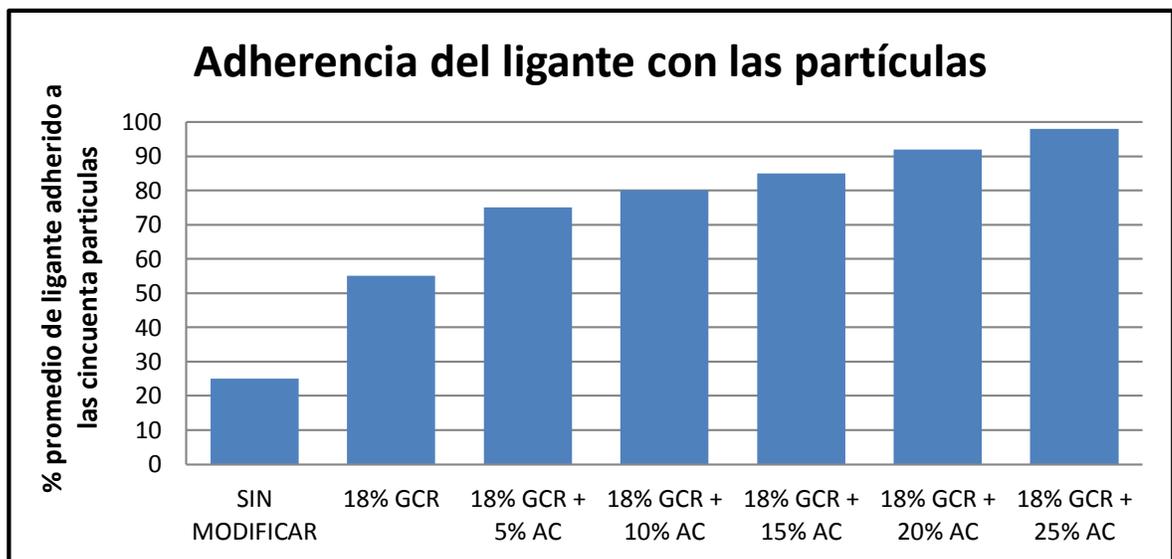
La Figura 32 se aprecia la ganancia de adherencia para cada muestra permitiendo inferir que el ligante modificado con el 18 % de grano de caucho reciclado y el 25% de arcilla calcinada lograron obtener un comportamiento considerable en estas propiedades, ya que los agregados obtuvieron mayor adherencia que las demás muestras.

En cuanto al comportamiento físico que tiene la arcilla calcinada es proporcionada por la cohesión ya que permite que exista una adherencia entre las partículas debido a la tracción entre ellas en virtud de las fuerzas moleculares internas⁷⁷. Las principales características físicas de este filler dependen principalmente de la distribución del tamaño de las partículas en la mezcla asfáltica. Las arcillas dependen de la adherencia del tipo stiction (fricción estática) y la plasticidad, propiedades que están asociadas con su composición mineralógica y su contenido de humedad, y también de su textura natural o macro estructura. Por tanto, la fracción glandular de un depósito de suelo se clasifica de acuerdo con su distribución de tamaños de las partículas, en tanto que la fracción arcillosa se

⁷⁷ Propiedades físicas del suelo, (Sistema de acceso público) [en línea]. Montevideo, Uruguay: universidad de la República, Facultad de agronomía. 2004 [citado 2013-04-9]. Disponible en internet: <http://www.fagro.edu.uy>

clasifica de acuerdo con sus características de plasticidad con los parámetros conocidos como límites de Atterberg⁷⁸.

Figura 32. Promedio de ligante adherido a las cincuenta partículas.



Otras investigaciones sobre el uso de la arcilla calcinada mencionan la eficiencia que existe utilizando este filler y afirman que entre mayor sea el porcentaje de adición de arcilla más ganancia de adherencia persiste⁷⁹. Por estas razones se escogió como porcentaje óptimo el asfalto modificado con 18 % p/p de GCR y adición del 25% p/p de arcilla calcinada. (Ver Figura34)

6.6. VISCOSIDAD ROTACIONAL

Se realizó este ensayo para obtener la resistencia que opone el asfalto caucho con los diferentes porcentajes de la arcilla calcinada al movimiento del rotor.

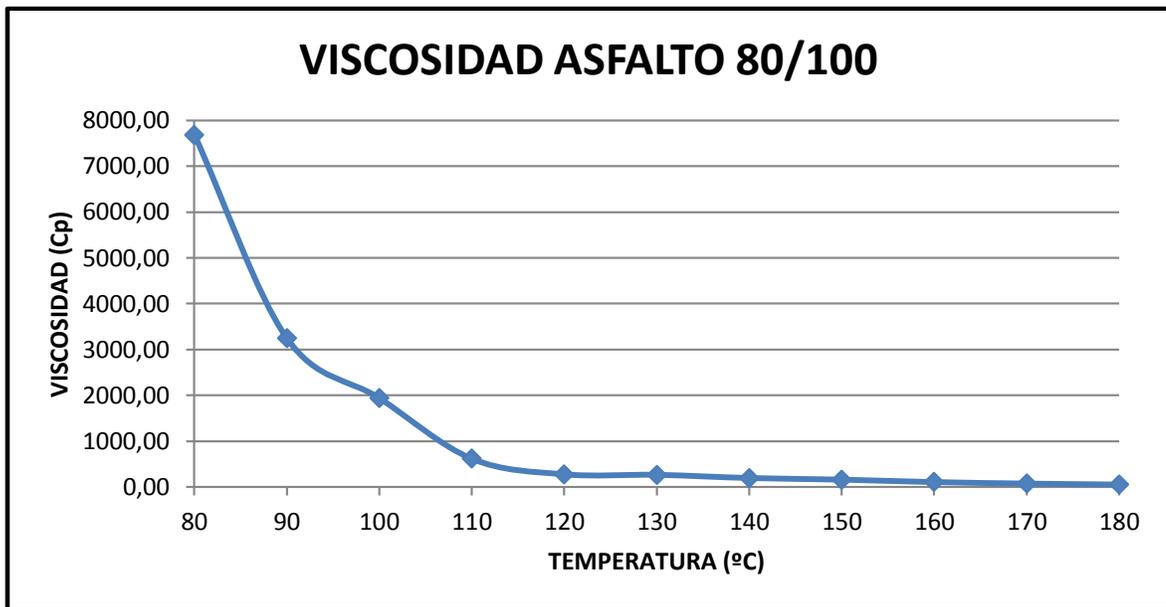
La Figura 33 presentó la curva reológica obtenida del asfalto convencional sin modificación, en donde se pudo visualizar desde los 80 °C hasta los 180 °C, el

78 CAMPOS RIVERA, José Ubaldo; GÓMEZ CASTRO, Silfredis Edgardo; TORREZ FLORES, Wilber Josué. Impermeabilización de rellenos sanitarios utilizando suelos naturales aplicados a la ciudad de San Miguel y Lolotique. En: Capítulo III. Suelos y sus propiedades. El salvador, San Miguel: Universidad de oriente, 2006. p. 69-70.

79 ROMERO MARTÍNEZ y SÁNCHEZ MARTÍNEZ, Op. Cit., p. 69.

comportamiento en la propiedad de la viscosidad rotacional, en intervalos de aumento de cada 10 °C.

Figura 33. Comportamiento reológico de la muestra control.



Como se pudo observar en la Figura 33, el ligante es susceptible a elevaciones de temperatura, clasificándolo como un material visco-elástico, es decir que es un material de comportamiento intermedio entre el sólido de Hooke (elástico) y el líquido de Newton (viscoso). A temperaturas elevadas (>100 °C), el cemento asfáltico se comporta como un fluido viscoso (muestra la consistencia de un lubricante utilizado como aceite para motores), mientras que a bajas temperaturas (< 0 °C) se comporta casi como un sólido elástico (como una banda de goma). Cuando se aplica una carga, el ligante se estira o comprime adoptando diferentes formas. Cuando se retira la carga, retorna a su forma original⁸⁰. A una temperatura intermedia, que es la condición prevista para el pavimento, el cemento asfáltico tiene características de fluido viscoso y sólido elástico.⁸¹

Según el estudio realizado por Peiliang Cong (ver tabla 13), el asfalto convencional 80/100 obtuvo una viscosidad rotacional de 135 mPa s a una

⁸⁰ CARDENAS, Jaleydi y FONSECA, Elsa, Op. Cit., p. 127

⁸¹ VELÁZQUEZ, M. Manual del asfalto . The Asphalt Institute, 1995. Citado por: CARDENAS, Jaleydi y FONSECA, Elsa, Op. Cit., p. 127

temperatura de 130 °C⁸². Cong analizó en su investigación las propiedades físicas de dos tipos de asfaltos convencionales o típicos y la incidencia del grano de caucho reciclado pulverizado en cada uno de estos. De esta manera denominó A1 como asfalto 60/80 y el A2 considerado como asfalto 80/100, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 13. Resultados de las propiedades de los asfaltos A1 y A2.

	Measured values	
	A ₁	A ₂
<i>Physical properties</i>		
Penetration (25 °C, 0.1 mm)	69	91
Softening point (°C)	48.5	47.2
Ductility (15 °C, cm)	123	195
Ductility (5 °C, cm)	15	26
Viscosity (135 °C, mPa s)	450	290
<i>Chemical composition (wt.%)</i>		
Saturates	15.05	8.33
Aromatics	27.78	52.1
Resins	51.21	28.07
Asphaltenes	5.90	11.51

Fuente: Investigation of asphalt binder containing various crumb rubbers and asphalts.

Comparando el resultado obtenido por Cong y el de esta investigación, en donde se obtuvo para una temperatura de 130 °C un valor de 268.3 mPa s, se observó que el parámetro obtenido en esta investigación es muy cercano al obtenido por Cong, haciendo de este resultado satisfactorio, ya que la viscosidad rotacional no tiene parámetros establecidos por la normatividad Colombiana para asfaltos convencionales.

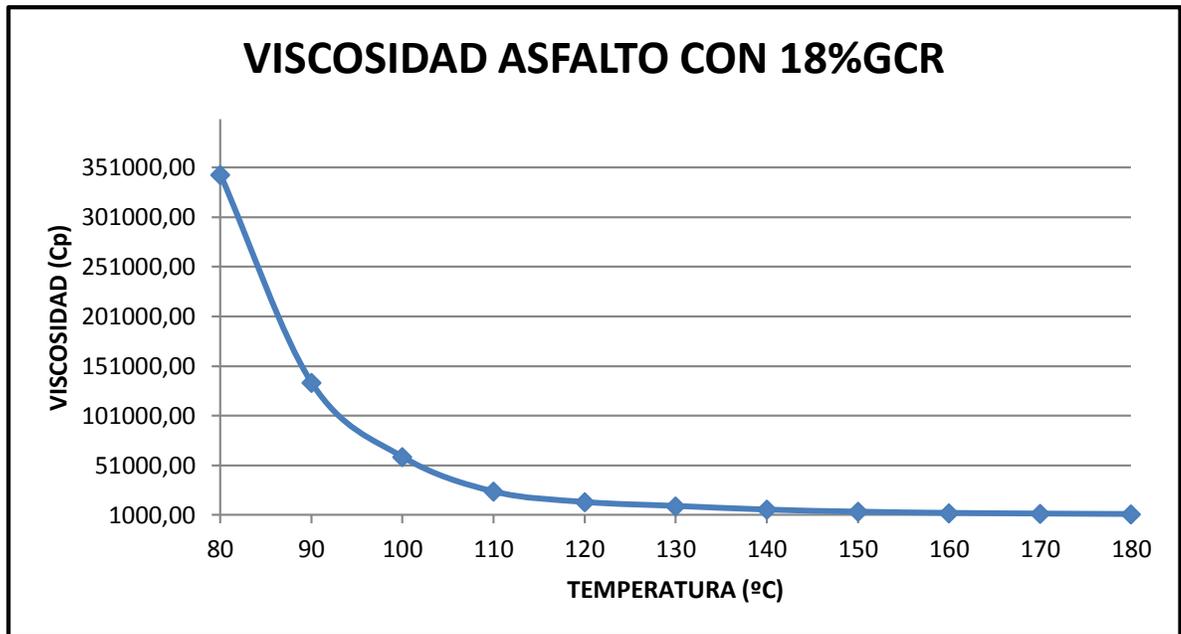
Para la muestra modificada con el 18% de grano de caucho reciclado se evidenció a una temperatura de 160 °C, un aumento considerable de la viscosidad, obteniendo un resultado de 2,82 Pa s (ver Figura 34), cumpliendo con los parámetros establecidos por el IDU en la especificación *ET-GE-002*, en donde se

⁸² CONG, Peiliang. Investigation of asphalt binder containing various crumb rubbers and asphalts. Elsevier Ltd. China. 2012.p. 633

expone un rango de la viscosidad Brookfield a 163 °C entre 1.5 y 3 Pa s según lo recomendado.

El comportamiento físico que tiene el grano de caucho reciclado al reaccionar con el cemento asfáltico implica la absorción de aceites aromáticos lo cual conlleva a que el GCR se hinche y se ablande, obteniendo un aumento amplio de área superficial de este polímero. Esto hace que la mezcla asfalto-caucho también sea más flexible a bajas temperaturas mientras que a altas temperaturas logra que sea menos plástica.⁸³El GCR mejora notoriamente esta propiedad produciendo un aumento en la rigidez, la viscosidad y componentes elásticos superiores al del ligante convencional.

Figura 34 Comportamiento reológico del 18% de GCR.



La figura 35 presenta la curva reológica de los resultados obtenidos en las mezclas modificadas con los diferentes porcentajes de arcilla calcinada a partir de

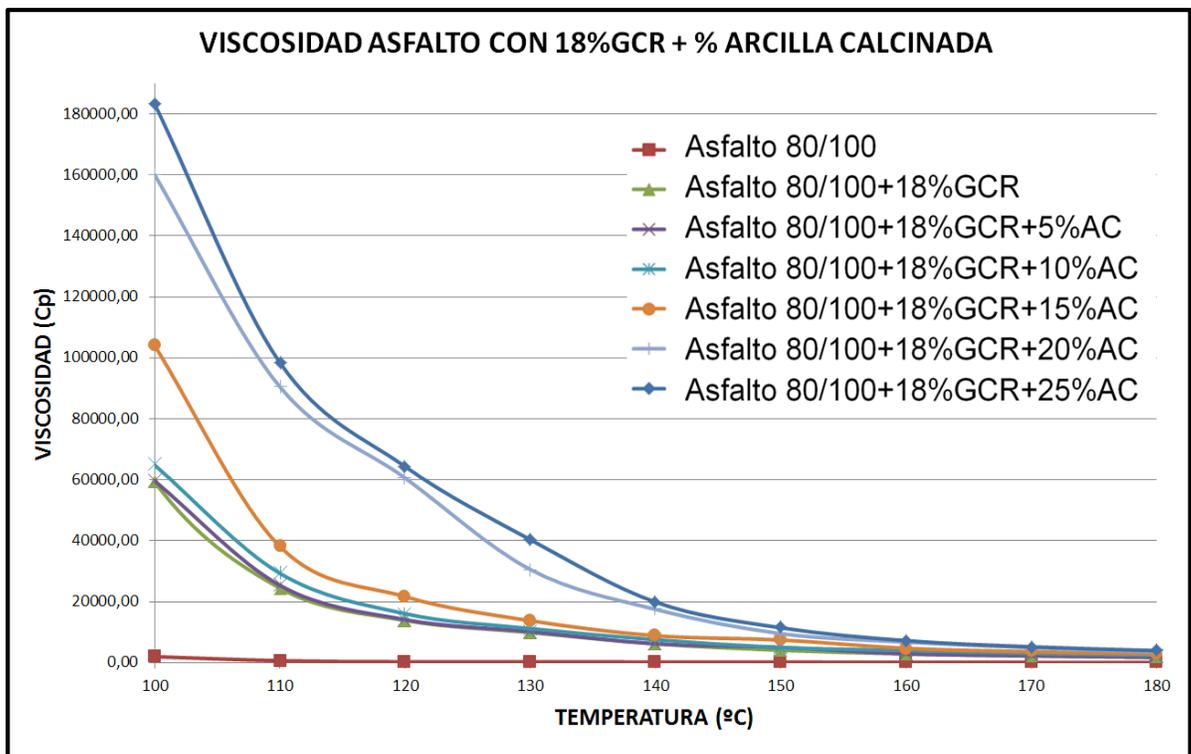
⁸³ Alcaldía mayor de Bogotá D.C. Instituto de Desarrollo Urbano, Contrato IDU – 306 – 003, Bogotá: Universidad de los Andes, 2005, p. 21.

los 100°C, ya que representaron en esta temperatura homogenización y se puede ver un mejor comportamiento de la viscosidad con respecto a la temperatura.

Al adicional el 25% de la arcilla calcinada se encontró un incremento superando las demás muestras, garantizando un crecimiento en el parámetro de viscosidad según el aumento en la cantidad de arcilla.

Cuando se analizaron las muestras independientemente se puede notar un cambio inusual a partir de los 120°C y los 130°C, esto se debe a que en esta temperatura se realizó el cambio de spindle y por consiguiente la cantidad de la muestra ensayada, lo que altera la relación de los resultados. (Ver Figura 37)

Figura 35. Comportamiento de la viscosidad en presencia de arcilla calcinada.



La temperatura de mezclado para el asfalto 80/100 está entre 140°C y 150°C. La temperatura de compactación del ligante sin modificar, está entre 120°C y 130°C.

Las temperaturas de mezclado y compactación de las muestras modificadas son superiores a la muestra control, lo que puede dificultar la aplicación In situ.

El comportamiento físico que tiene la arcilla calcinada es de manera eminentemente plástica, esto es debido a que este filler al ser envuelta por las partículas laminares del ligante caucho, facilitó la cohesión y evitó el desplazamiento de una partícula a otra al momento de ejercer un esfuerzo sobre estas⁸⁴. El efecto general de la arcilla por lo tanto, se puede identificar en términos de rigidez (en relación con el aumento de temperatura) y la alteración del equilibrio visco-elástico⁸⁵.

Otros proyectos resaltan que la presencia de arcilla sugiere que los silicatos de alguna manera pueden comportarse como activadores de compatibilidad. Afirman que la arcilla no solo es un simple relleno, siendo también está relacionada con variaciones muy importantes en la frecuencia de cruce y de transición vítrea. Se supone en consecuencia que la arcilla, debido a su tamaño nanométrico, puede interactuar en fenómenos de transición⁸⁶ o como un agente tensioactivo. Su presencia puede conducir a una mayor interacción entre las fases incompatibles. Los autores argumentan que, en general, entre más alta es la afinidad entre el polímero y la arcilla, mejor será la homogeneidad de la mezcla preparada⁸⁷.

6.7. FOTOGRAFÍAS SEM

Aspecto Morfológico

Arcilla calcinada: En la figura 36 se observó una porción del material de arcilla calcinada utilizada para cada uno de los ensayos en este proyecto; presentó diferentes tamaños de partículas y las de mayor tamaño revelaron que estuvieron constituidas por aglomerados de partículas más pequeñas. El tamaño de las partículas de arcilla calcinada generalmente se encuentran en un rango de 1 a 10 μ ⁸⁸ y esta figura tuvo una resolución de 50 y 100 μ con una aceleración de 10 y 8 Kv respectivamente.

⁸⁴ DELLE SCIENZE, Parco Area. LAZZARINO, Largo Lucio. Linear viscoelastic behaviour of asphalt binders modified with polymer/clay nanocomposites, *Italy: University of Parma, University of Pisa. 2012. p. 5*

⁸⁵ Ibid., p. 6.

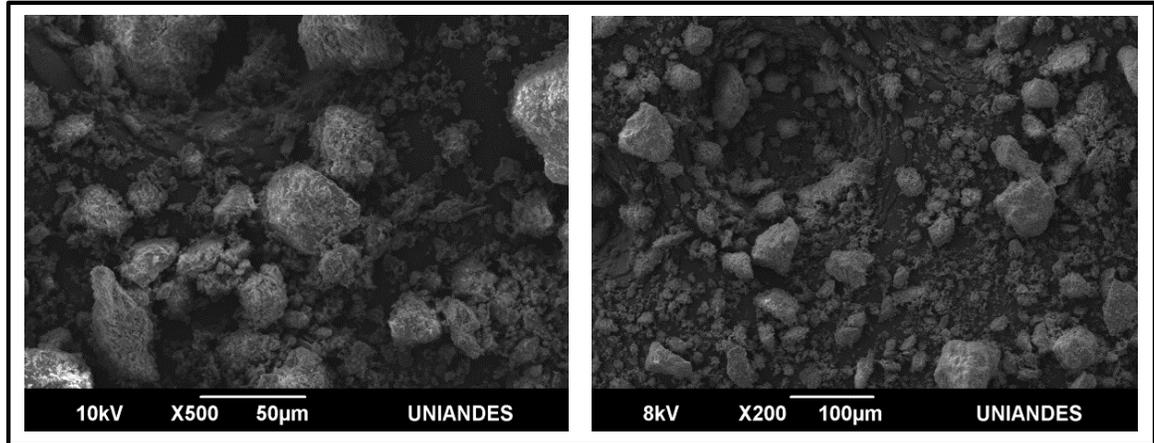
⁸⁶ Ibid., p. 7.

⁸⁷JASSO, Martin. Preparation and properties of conventional asphalt modified by physical mixtures of linear SBS and montmorillonite clay. Elsevier Ltd. Canada, 2012.p.761

⁸⁸ GAVIRIA, Sergio. Op. Cit.

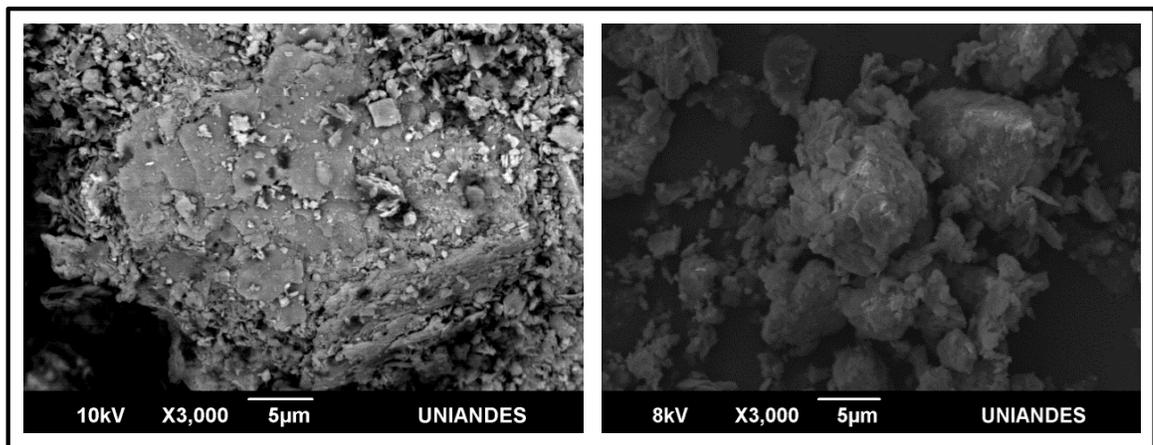
Las partículas no estuvieron uniformemente distribuidas en el interior, hay zonas superficiales en donde se encontraron aisladas. Esto se produjo probablemente a la presión ejercida durante la conformación de dichos cuerpos alcanzando su finura. En ciertas partes de la muestra se pudo detallar un alto grado de calcinación.

Figura 36. Fotografías de la arcilla calcinada a distintas escalas.



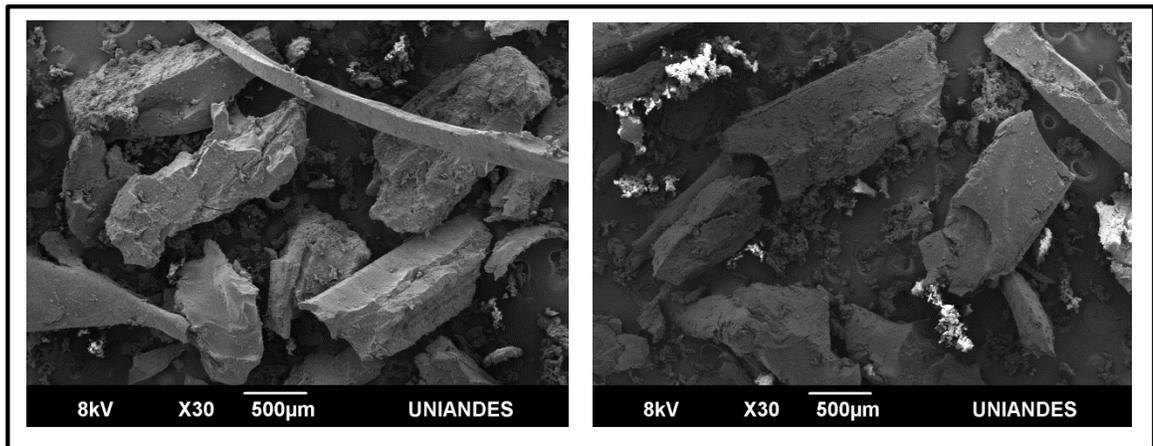
De igual forma, en la figura 37 la arcilla calcinada presentó una distribución heterogénea y con gran detalle se visualizó la presencia de poros o espacios vacíos entre las partículas.

Figura 37. Fotografías de arcilla calcinada a 5µm.



Grano de Caucho Reciclado (GCR): En la figura 38 se observó una distribución mucho más heterogénea en tamaño y forma que la de la arcilla calcinada; este tipo de partículas se encuentran compactas y no estuvieron formadas con bordes redondeados pero sí con ángulos marcados. También se pudo detectar que hay un grado alto de tenacidad, esto se produjo debido a que la muestra, alcanzó la rotura por acumulación de dislocaciones; es decir la resistencia a la que se expuso al momento de ser roto, molido, o desgarrado.

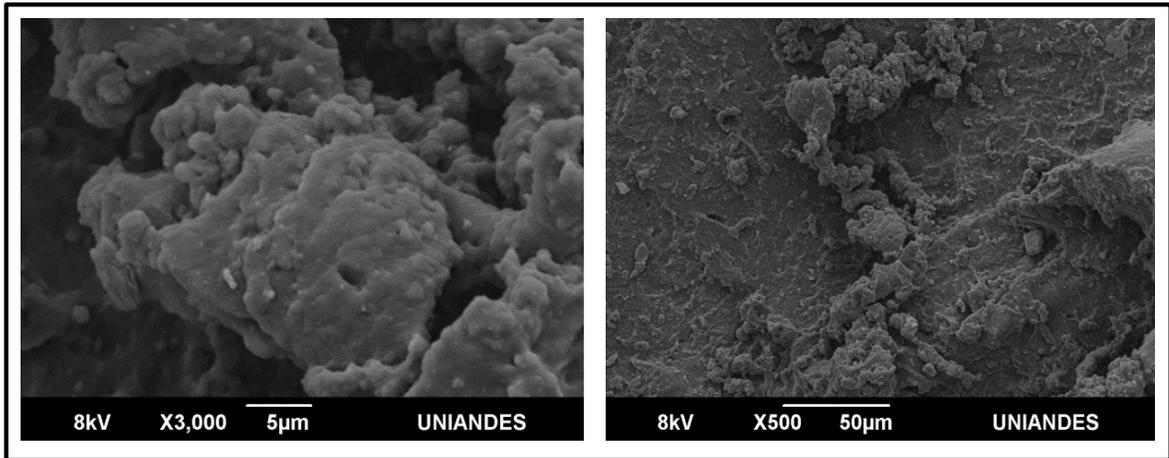
Figura 38. Fotografías de Grano de Caucho Reciclado a 500µm.



En la figura 39 se determinó que existe mayor densidad que en las fotografías de la arcilla calcinada, alcanzando proporciones mayores en cuanto a masa sobre el área analizada. También se observó presencia de un nivel alto de rugosidad superficial; esto quiere decir que en el acabado superficial hubo presencia de una película texturizada caracterizándolo así como adaptable para una mezcla con asfalto 80-100.

La porosidad se halló en tamaños del rango de 5 a 1 micra de ancho, aunque estos poros tienden a deformarse en el momento de aumentar la temperatura en el proceso de mezclado.

Figura 39. Fotografías de Grano de Caucho Reciclado a 5µm y 50µm.



Composición Química EDX

Para analizar la composición química fue necesario exponer tres partes que describieron cada muestra conjuntamente. Así obtuvimos por un lado la "Morfología" del material anteriormente descrita; y a través de esa área específica fotografiada; los "Mapas de recorrido de elementos" y los "Espectros de emisión de rayos X". Vale la pena recalcar que los análisis químicos que se obtuvieron de las muestras se realizaron con la principal característica que cada escala representa. Las muestras analizadas fueron dos de arcilla calcinada y una muestra de GCR.

Arcilla Calcinada (1):

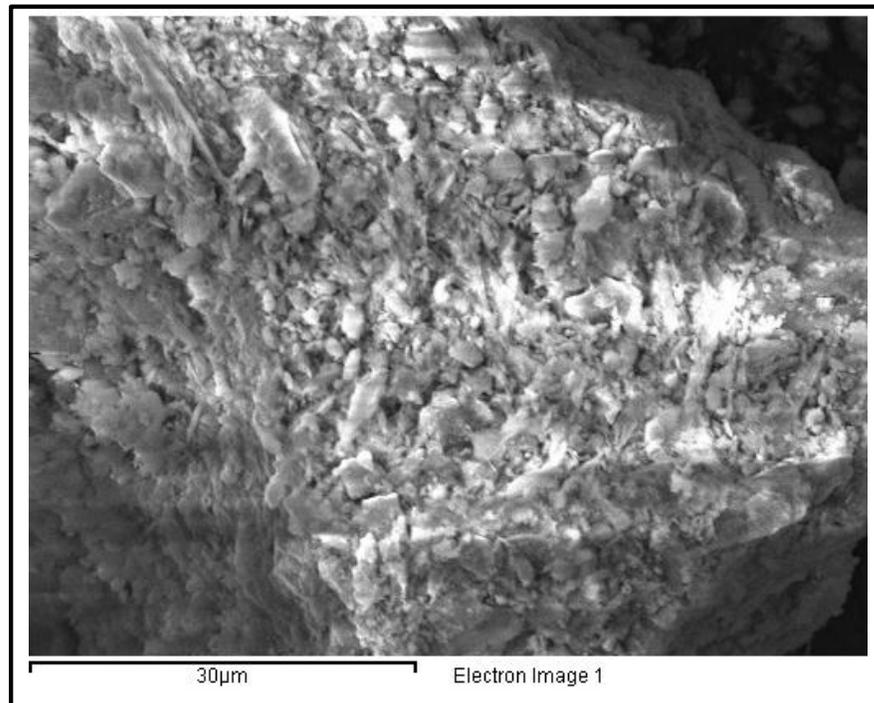
En la siguiente fotografía se obtuvo excelente calidad en la micromorfología, en donde se detalló claramente el brillo superficial causado por el recubrimiento de oro paladio. Aunque este no se reflejó en el mapa de recorrido de elementos y en el espectro de rayos X en este caso, debido a que el microscopio fue programado para despreciar este valor. (Ver Figura 40).

Cuando se quema una arcilla se deshidrata y pierde agua lo que provoca la formación de poros diminutos y el relieve representados en la morfología⁸⁹.

⁸⁹ *ibid*

Parte 1

Figura 40. Morfología de Arcilla Calcinada



Se observó poca presencia de potasio (K) debido a la pérdida causada en el proceso de calcinación⁹⁰, esto se pudo evidenciar en el mapa de recorrido de elementos, en la parte 2 del análisis, en donde la intensidad de este elemento fue mínima comparada con otros elementos que la componen. (Ver Figura 41).

Las arcillas están formadas por silicatos de aluminio; por consiguiente se observó en el mapa de recorrido la intensidad del Oxígeno (O), Silicio (Si) y Aluminio (Al) como una estructura homogénea.

Los elementos de cobre (Cu) y una pequeña parte de aluminio aparecieron en el mapa de recorrido, debido a que el objeto conductor utilizado como soporte de la cinta, fue una moneda de \$100 colombianos.

⁹⁰ *ibid*

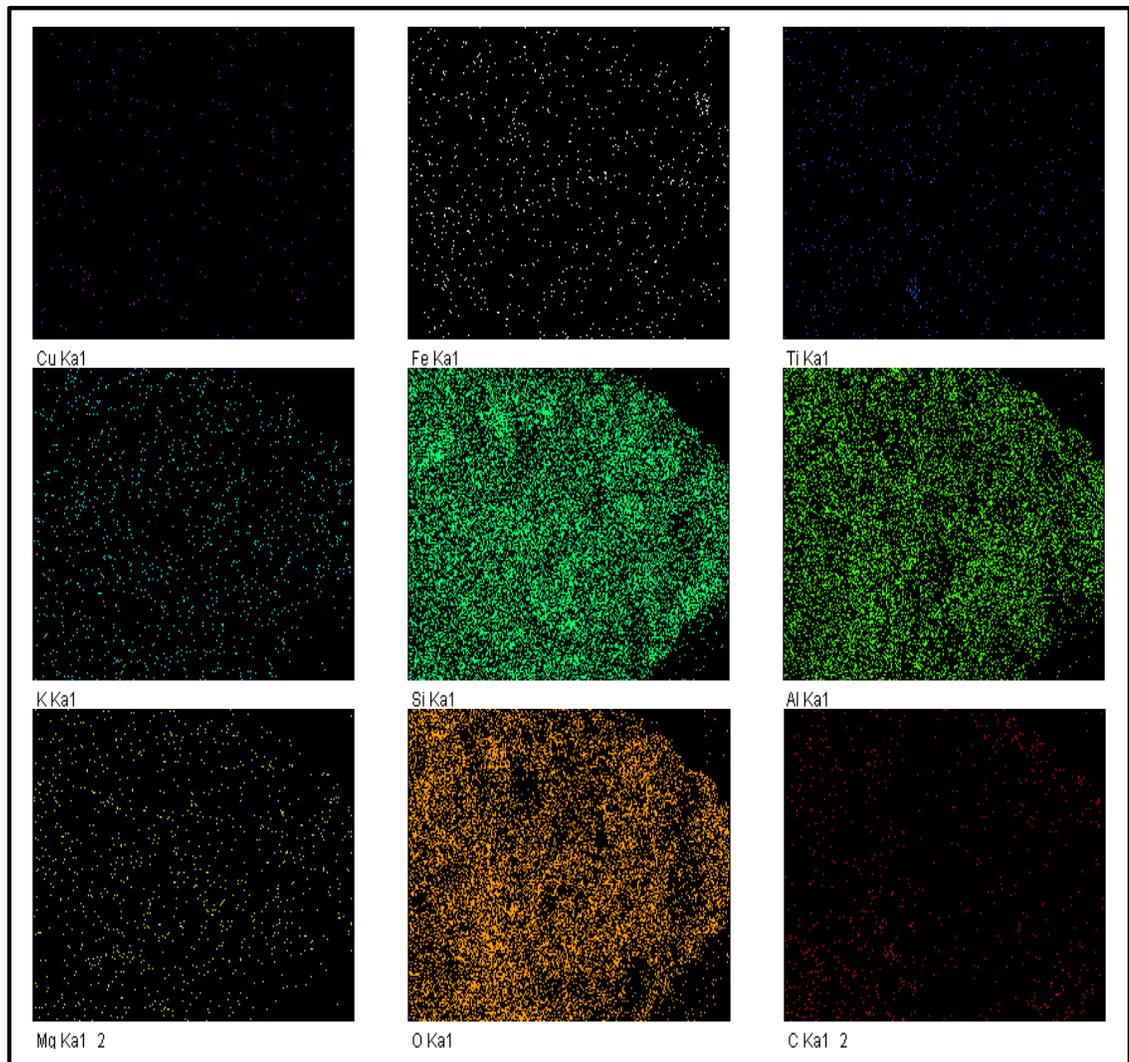
El carbono (C) se reflejó en el mapa de recorrido, debido a que la muestra de GCR fue analizada previamente en el microscopio, lo que produjo que un residuo mínimo de GCR pudo filtrarse en el análisis de la arcilla calcinada.

El proceso de oxidación de hierro (Fe) es lo que genera el color rojizo en las arcillas⁹¹, por lo que se pudo observar su reflejo leve pero constante en toda la muestra.

Las arcillas siempre tienen presente el titanio (Ti) como impureza o elemento menor en los silicatos, este elemento al igual que el Magnesio (Mg), es común encontrarlos en la estructura química de esta; por consiguiente se reflejaron levemente en el siguiente mapa de recorrido:

Parte 2

Figura 41. Mapas de recorrido de elementos de arcilla calcinada.



En la parte inferior de cada recuadro se denotó además del elemento, el tipo de señal en la que se registró dicho elemento; como por ejemplo en el recuadro del oxígeno el equipo registró de la siguiente manera: "O Ka 1", el primer término fue el elemento "O", el segundo el tipo de señal "K" alfa "a" 1, lo que denotó un tipo de transición electrónica de primer nivel. En el caso del Magnesio fue registrado como: "Mg Ka1_2", el primer término fue el elemento "Mg", el segundo el tipo de señal "K" alfa "a" 1 y 2, lo que denotó transiciones electrónicas de primer y segundo nivel. Para este tipo de señales "K" las transiciones electrónicas han estado presentes desde un primer nivel a un segundo nivel y son características en los elementos más livianos. Los elementos más pesados registraron otro tipo de señales, con transiciones de segundo al tercer nivel, del segundo al cuarto, del tercero al quinto, entre otras.

Cada elemento que constituye este material recogió la cantidad de energía necesaria para poder hacer transiciones. Todas estas transiciones electrónicas de los diferentes elementos respondieron con un valor de energía o de longitud de onda definida según su número atómico. (Ver Figura 42)

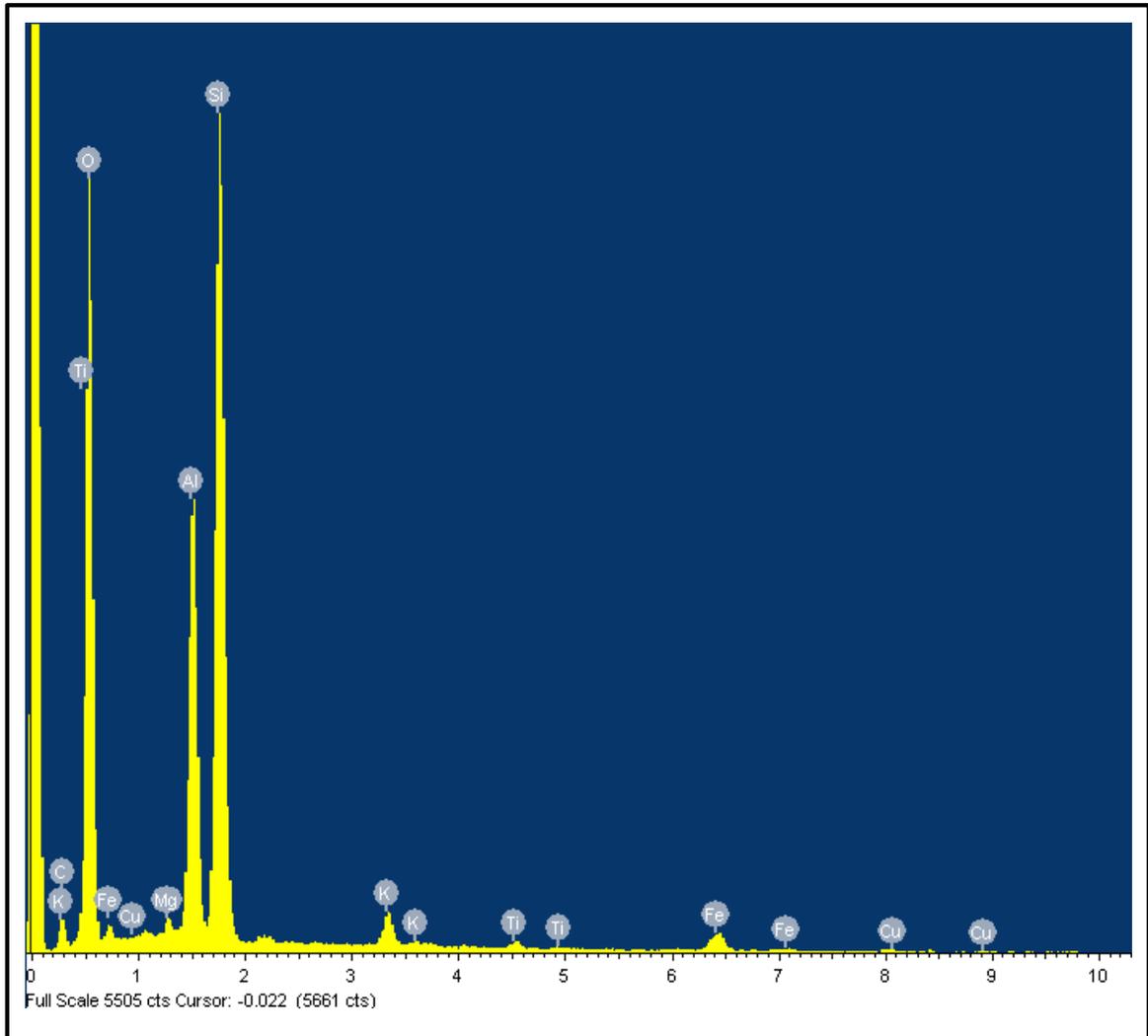
Los espectros obtenidos en la parte 3, se dieron por el análisis promedio de la superficie. La intensidad presentada por cada elemento tuvo que ver con el contenido de este en la muestra; sin embargo existieron unas correcciones internas del equipo, ya que cada elemento respondió a unas características estructurales diferentes; no es que haya sido precisamente la altura la representación de la intensidad, sino es un cálculo matemático ya fijado que se aproxima a esta. De acuerdo a lo anterior en el Espectro de emisión de rayos X se pudo observar lo siguiente:

- Las señales con mayor intensidad fueron las de Silicio (Si), Aluminio (Al) y Oxígeno(O). A pesar de que la señal de titanio (Ti) pareciera haber estado en un nivel alto debido a un defecto de impresión del espectro, en los siguientes niveles se pudo evidenciar su intensidad real (baja).
- El hierro (Fe) fue el elemento químico de la arcilla con mayor presencia de señales; aunque son de baja intensidad fueron constantes, es debido a que su número atómico es el 26 y despreciando el valor del cobre (Cu), fue el elemento más pesado en la muestra.

- Se evidenciaron también varias señales de baja intensidad de Potasio (K) y Titanio (Ti), debido a que sus números atómicos son 19 y 22 respectivamente.

Parte 3

Figura 42. Espectro de Rayos X – Muestra de Arcilla Calcinada



Arcilla Calcinada (2)

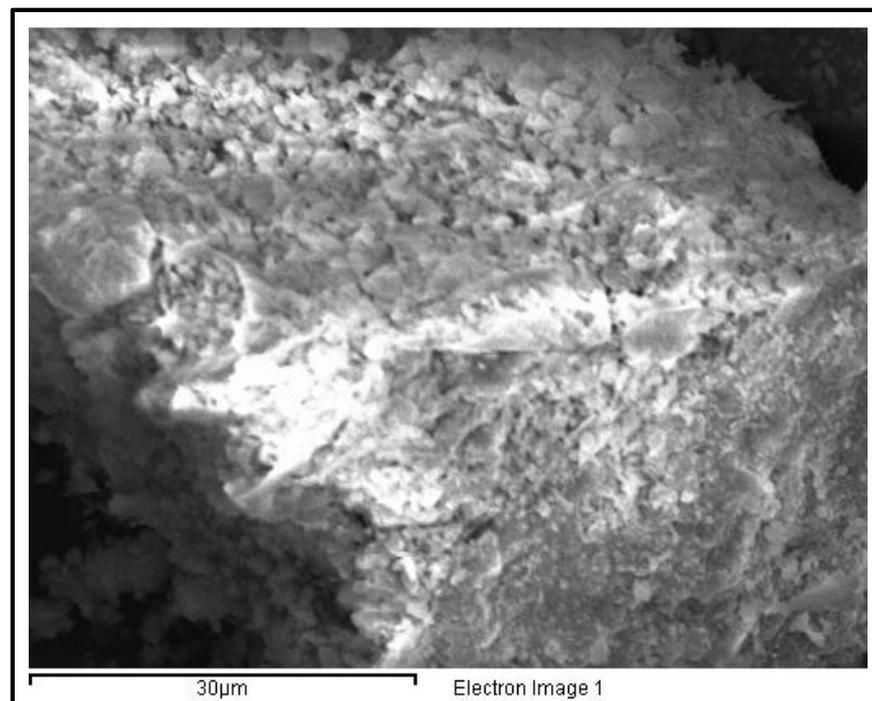
En esta muestra el microscopio electrónico de barrido tomó también el reflejo del oro paladio involucrándolo en el análisis. Adicionalmente se obtuvo una tabla de

composición química en donde se detalla numéricamente la intensidad de cada elemento.

En la morfología de esta arcilla se pudo observar de mejor manera el brillo causado por el recubrimiento de oro paladio y los espacios oscuros en las esquinas donde el haz de electrones no alcanzó a reflejarse debido al límite de profundidad anteriormente mencionado. (Ver Figura 43).

Parte 1

Figura 43. Morfología de Arcilla Calcinada muestra 2.

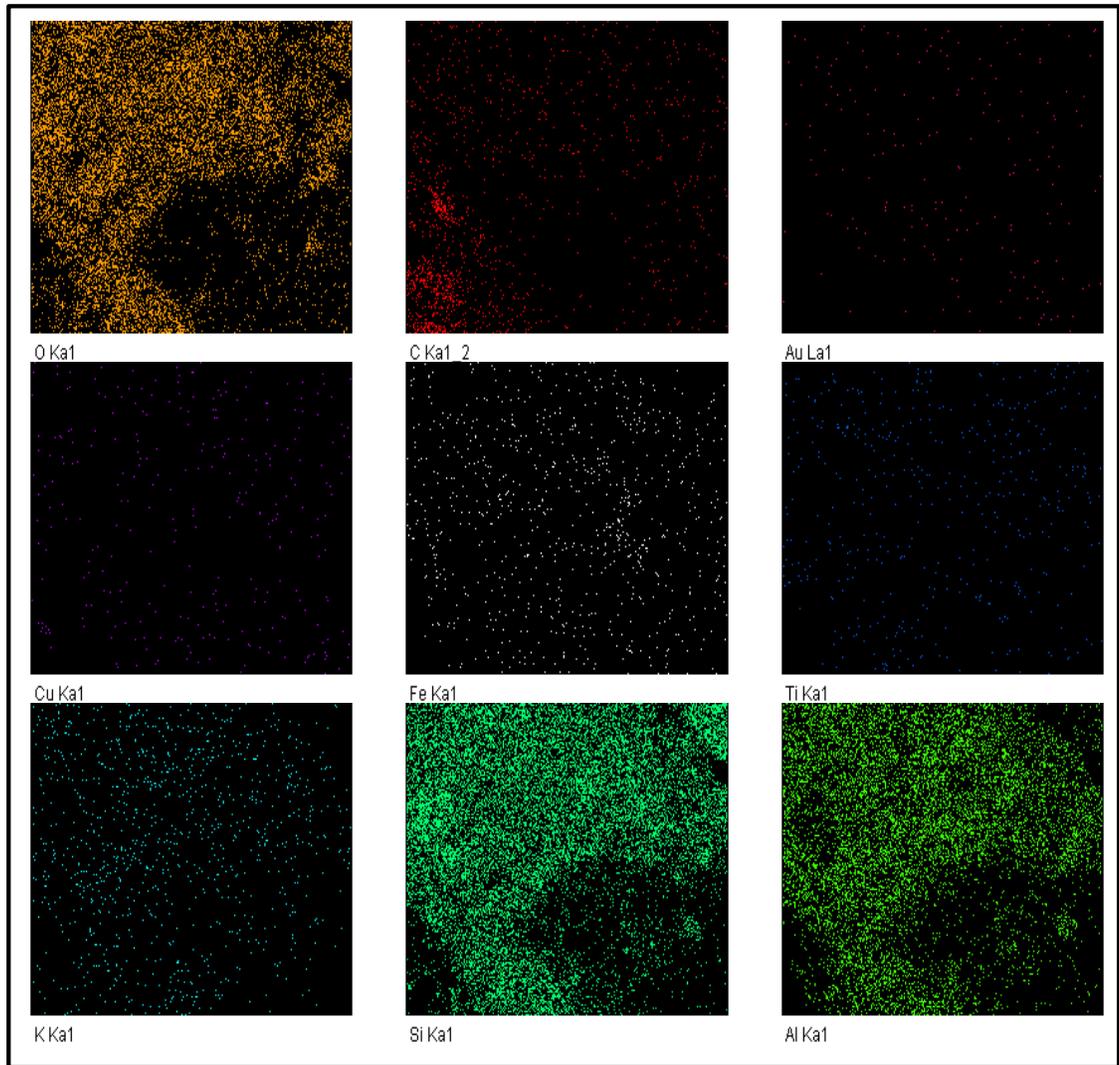


En las esquinas donde aparecieron los espacios oscuros, se pudo observar en el mapa de recorrido de esta muestra, que el elemento que mejor se refleja es el carbono; por tal motivo se dedujo que la muestra de GCR sigue apareciendo como residuo. (Ver Figura 44).

Se pudo establecer que la composición es similar a la muestra anterior de arcilla calcinada, la única diferencia es la aparición del reflejo de oro paladio, aunque la intensidad es mínima comparada con los elementos estructurales de la arcilla.

Parte 2

Figura 44. Mapas de recorrido de elementos muestra 2 de arcilla calcinada.



En el recuadro se observó que el oro paladio aparece como: "Au La1", el primer término fue el elemento "Au", el segundo el tipo de señal "L" alfa "a" 1.

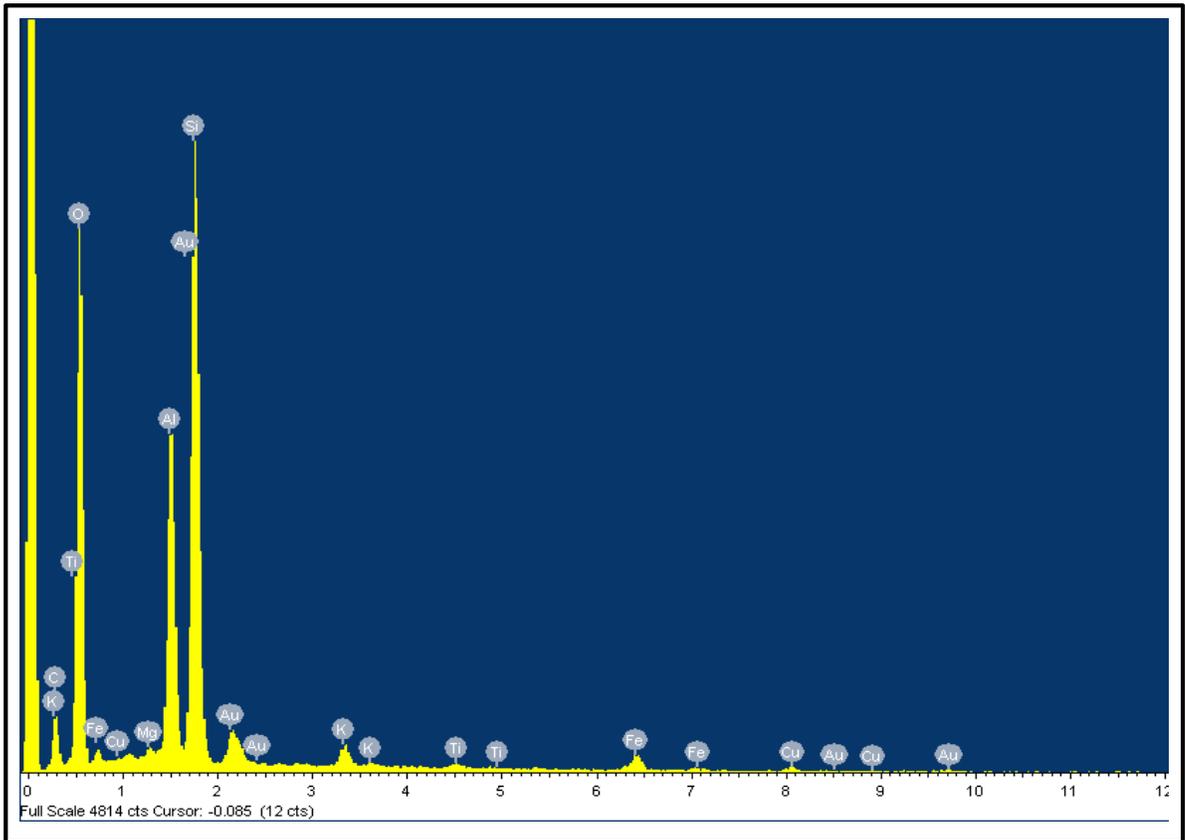
A través de los recuadros en los mapas de recorrido del Silicio, aluminio y oxígeno se observó una deformación de la muestra en la esquina inferior derecha de la muestra.

El número atómico del oro es el 79; por tal motivo presentó varias señales en el espectro hasta los 10 KeV, caracterizándolo como el elemento más pesado en el análisis. (Ver Figura 45).

A pesar de que el hidrogeno hace parte de la composición química de la arcilla por ser el elemento más liviano no reflejó intensidad o emisión de energía que pueda observarse en el espectro.

Parte 3

Figura 45. Espectro de Rayos X – Muestra 2 de Arcilla Calcinada



Tablas de Composición Química

En la siguiente tabla se obtuvo una aproximación de la representación numérica de cada elemento en la composición química de la arcilla calcinada. En la primera columna se detalló el elemento y la señal correspondiente. En las demás columnas la concentración, la intensidad, el porcentaje del peso, la desviación del porcentaje del peso y el porcentaje atómico. (Ver tabla 14). Los elementos del carbono (C), cobre (Cu) y Oro (Au) se despreciaron por los motivos anteriormente mencionados.

Tabla 14. Composición Química de Arcilla Calcinada.

Elemento	Concentración	Intensidad	Peso%	Peso% Sigma	Atómico %
K	0.78	0.4082	14.45	1.03	22.73
O K	6.57	10.794	46.18	0.74	54.51
Mg K	0.03	0.9403	0.25	0.08	0.19
Al K	1.21	0.9969	9.21	0.22	6.45
Si K	2.58	0.9513	20.53	0.38	13.81
K K	0.17	10.156	1.28	0.11	0.62
Ti K	0.04	0.8117	0.40	0.12	0.16
Fe K	0.37	0.8099	3.49	0.28	1.18
Cu L	-0.01	0.4670	-0.19	0.25	-0.06
Au M	0.37	0.6405	4.39	0.42	0.42
Totals			100.00		

Tabla 15. Tabla numérica de la Composición Química de Arcilla Calcinada.

Elemento	Peso%	Atómico%
K	14,55	22,81
O K	46,51	54,71
Mg K	0,25	0,19
Al K	9,28	6,47
Si K	20,68	13,86
K K	1,29	0,62
Ti K	0,4	0,16
Fe K	3,5	3,52
Totals	100	100

Para el análisis numérico se tomaron las casillas de porcentaje del peso y el porcentaje atómico excluyendo los elementos que no correspondieron a la estructura química de la arcilla y recalculando los valores correspondientes. De tal manera que la tabla 15 de composición química quedó así:

Puede ser que el porcentaje de oxígeno estuvo levemente alterado también por el caucho contaminante; sin embargo se ha decidido tomarlo en su totalidad. Se obtuvo 70,87 % atómico de Oxígeno, esto refleja la gran presencia de oxígeno actuando en el proceso de oxidación de las moléculas de Silicato de Aluminio y del hierro⁹².

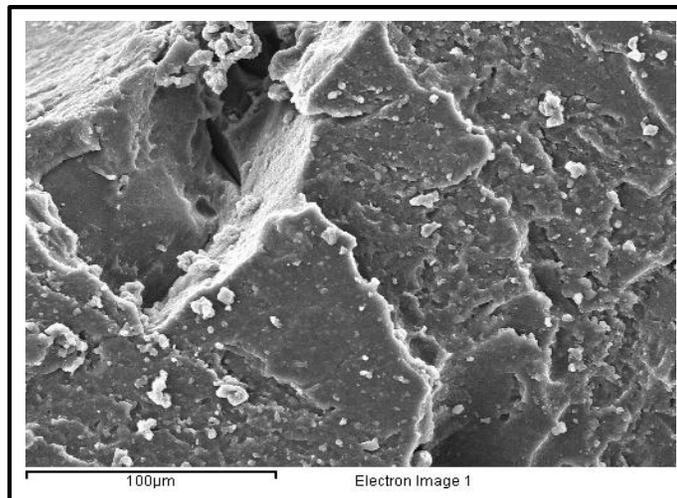
Se observó poca presencia de potasio con un 0,81% atómico debido al proceso de calcinación de la arcilla. El titanio como impureza o elemento menor en los silicatos estuvo presente con 0,21 % atómico. El silicio y el aluminio obtuvieron gran presencia en la muestra, con 17,95% y 8,39% atómico respectivamente. El Magnesio y el hierro tienen poca presencia con 0,25% y 1,53% respectivamente.

Grano de Caucho Reciclado-GCR

En la morfología aparecieron zonas oscuras y se identificaron como poros en donde no se alcanzó a transmitir señal. La superficie se visualizó compuesta por capas aparentemente homogéneas con algunas partículas sueltas. (Ver Figura 46).

Parte 1

Figura 46. Morfología de grano de caucho reciclado.



⁹² *ibid*

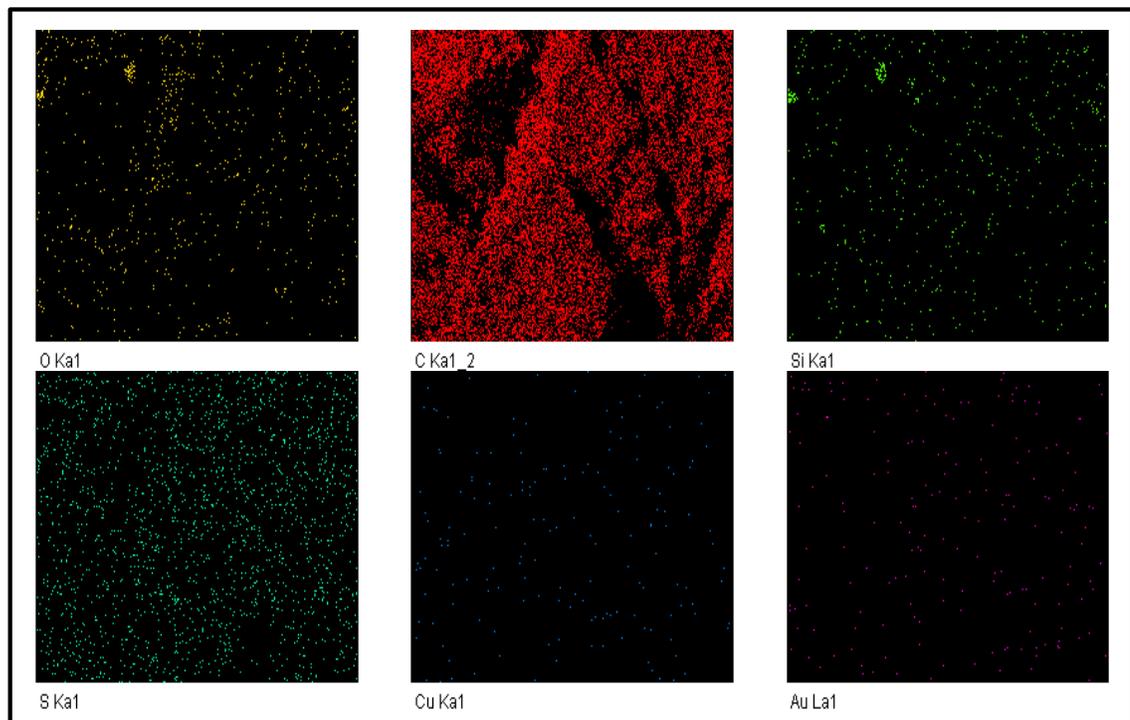
En el mapa de recorrido de elementos se observó mayor presencia de carbono (C), esto debido a que es el elemento más abundante de los polímeros; la materia prima de la llanta, y muestra mayor intensidad punto por punto en el mapa de elementos.

El Azufre (S) apareció en la composición química, debido al proceso de vulcanización de la llanta, en donde este elemento actuó como un aglutinante de las cadenas carbonadas formando una sola molécula.

El Zinc (Zn) y el Silicio (Si) se tomaron como elementos que reaccionaron con el oxígeno (O) y conformaron moléculas que hacen parte de la composición química de la llanta. (Ver Figura 47).

Se observaron también presencia de Cobre (Cu) y Oro (Au) como elementos conductores para la muestra de GCR.

Figura 47. Mapas de recorrido de Elementos del GCR.



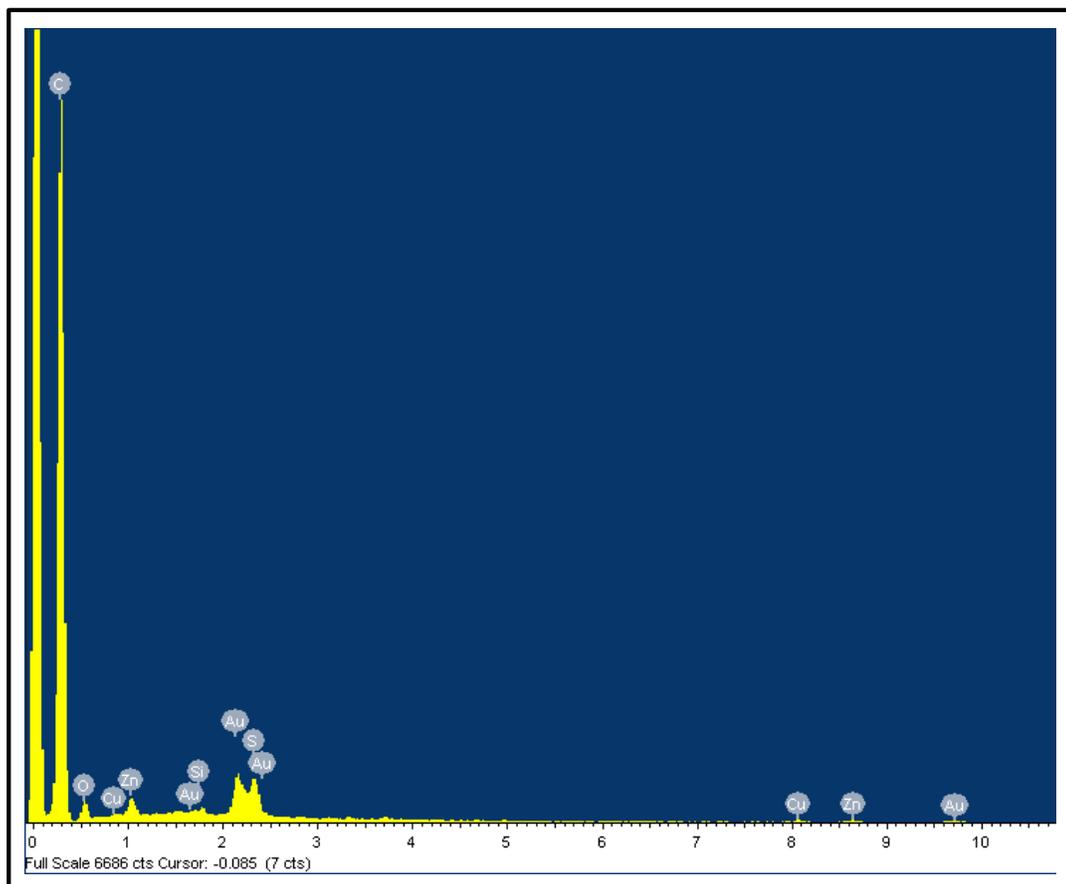
La mayoría de los elementos reflejaron señales K exceptuando el oro paladio que reflejó señal "M", el cobre y el Zinc con señal L. Se pudo observar a través de los mapas de recorrido la reacción del oxígeno sobre el silicio.

El rango de energía del espectro de rayos-X fue de 13KeV; sin embargo para efecto del análisis se recortó la imagen lo necesario para interpretarse de manera más clara. Cada señal correspondió a un valor de energía, los elementos respondieron a esta señal de electrones acelerados, saltando de nivel energético a otro. La energía de las transiciones tuvo que ver también con el tamaño del núcleo⁹³; por tal motivo el carbono solo se reflejó en una sola señal de gran intensidad, ya que su número atómico es 6, fue el elemento más liviano pero de mayor presencia. (Ver Figura 48).

Las señales de oro se emiten en varios niveles; ya que fue el elemento más pesado.

Parte 3

Figura 48. Espectro de Rayos X – grano de caucho reciclado.



⁹³ *ibid*

Tablas de Composición Química

Al igual que el cobre, el Zinc obtuvo varias señales hasta "L" debido a que su número atómico es 30 se consideró como el elemento más pesado de la estructura química de la llanta. (Ver tabla 16).

Tabla 16. Composición Química de GCR.

Elemento	Concentración	Intensidad	Peso%	Peso% Sigma	Atómico %
C K	11.59	11.940	81.72	0.74	92.74
O K	0.36	0.4965	6.12	0.46	5.21
Si K	0.03	10.551	0.26	0.07	0.13
S K	0.29	0.9396	2.62	0.16	1.11
Cu L	-0.03	0.5589	-0.47	0.31	-0.10
Zn L	0.12	0.5966	1.63	0.26	0.34
Au M	0.72	0.7509	8.10	0.55	0.56
Totals			100.00		

Para este análisis también se despreciaron los valores del cobre y el oro, y se recalcularon los porcentajes de peso y porcentajes atómicos. (Ver tabla 17).

Tabla 17. Tabla numérica de la Composición Química de GCR.

Elemento	Peso%	Atómico%
C K	88,49	93,18
O K	6,63	5,23
Si K	0,28	0,13
S K	2,84	1,12
Zn L	1,77	0,34
Totals	100,00	100,00

Como se pudo observar el carbono tuvo un 93,18% atómico, lo que demostró una vez más que es elemento de mayor presencia, seguido de una poca presencia de Oxígeno 5,23% atómico y Azufre 1,12% atómico.

6. CONCLUSIONES

1. El comportamiento físico y reológico del asfalto caucho más las adiciones de arcilla calcinada, fue analizado a través de pruebas de deformación, cambio de densidad y susceptibilidad térmica arrojando los siguientes resultados:
 - a). De acuerdo a los ensayos de penetración se asume que al aumentar los porcentajes de adición del llenante mineral la consistencia mejoró notablemente, considerando que cada aumento del filler favoreció la solidez de la mezcla ya que al utilizar 25% de la arcilla calcinada se presentó una reducción del 43.2% respecto al asfalto sin modificar presentando menor posibilidad al fisuramiento de la carpeta asfáltica.
 - b). En el ensayo de punto de ablandamiento los efectos producidos por la adición de la arcilla calcinada favoreció la resistencia a altas temperaturas, es decir, la intensificación del llenante mineral presentó un beneficio de la mezcla logrando que se comportara en estado sólido a mayor temperatura. El efecto más evidente se presentó al usar el 25% de la llenante mineral, debido a que mejoró la resistencia al aumento de temperatura, proporcionando menor posibilidad al ahuellamiento.
 - c). El índice de penetración confirmó que las muestras con adición de arcilla calcinada obtuvieron resultados positivos cumpliendo con el rango (-1 al 1) siendo menos susceptibles a los cambios de temperatura y a la deformación permanente.
 - d). El ensayo de viscosidad rotacional concluyó que el 25% de arcilla calcinada, mejoró la cohesión y evitó el desplazamiento entre partículas, logrando así una mejor homogeneización y compatibilidad de la mezcla, debido a su condición eminentemente plástica.
2. Los resultados de los ensayos del efecto Stripping y bandeja de adherencia permitieron concluir que al aumentar el porcentaje de adición de la arcilla calcinada mejoró favorablemente la estabilidad y consolidación de la mezcla ya que las moléculas internas de la llenante mineral interactúan entre sí, aumentando la fuerza de fricción con el agregado grueso. Por otro lado debido

a su alta finura, actúan en los poros de la mezcla asfáltica logrando así una mayor impermeabilidad destacándose su capacidad de adsorción.

3. El análisis de las fotografías SEM se concluye que la composición física de la arcilla calcinada presentó un aglomerado de partículas de más pequeñas en donde se cumplió el rango de 3 a 5 micras, sin embargo la morfología de este filler no genero la uniformidad en su distribución. En cuanto a la composición química se obtuvo que debido a que la arcilla es calcinada logro obtener titanio como elemento principal en este tipo de filler, y generando una ganancia de Oxígeno (O), Silicio (Si), Aluminio (Al) y óxido de hierro y encontrando una reducción de potasio.

Así mismo composición física del grano caucho se obtuvo una uniformidad en la distribución de este polímero, la morfología de este material logro demostrar que no presenta bordes redondos pero si ángulos marcados y presencia de poros. La composición química demostró la presenta Magnesio (Mg) que es común encontrarlo en su estructura química, de igual forma se obtuvo el Azufre (S) debido al proceso de vulcanización, el Zinc (Zn) y el Silicio (Si) reaccionaron con el oxígeno (O) y conformaron moléculas que hacen parte de la composición química de la llanta.

4. Con los resultados obtenidos en los ensayos se logró concluir que el contenido de grano de caucho reciclado confiere a la mezcla mejoras en las propiedades físicas y reológicas con respecto al asfalto convencional, debido a que posee la capacidad de absorción de energía plástica, ofreciendo la habilidad de experimentar grandes deformaciones elásticas antes de la falla. También aumenta las resinas del ligante mejorando la adherencia y cohesión entre las partículas proporcionando mayor flexibilidad en la estructura molecular de la mezcla asfáltica. Sin embargo con la incorporación de la arcilla calcinada se obtuvo mejores rendimientos en cuanto a la compatibilidad de las partículas, proporcionando mayor capacidad de adsorción del agua y aumentando la resistencia a las temperaturas altas, permitiendo la prolongación de la vida útil de la carpeta asfáltica.
5. Los resultados del proyecto de investigación confirmaron que la utilización de arcilla calcinada usándola como llenante mineral ayudo satisfactoriamente

mejorando las propiedades del asfalto convencional, ya que la reacción con el asfalto caucho proporcione rigidez ofreciendo mejoras en la impermeabilidad, mayor contacto de adherencia con agregados, alta resistencia a la susceptibilidad térmica y penetración.

Por otro lado, esta investigación halló que entre mayor sea la adición del llenante mineral en una relación filler/asfalto-caucho, mayor es el mejoramiento en las propiedades del asfalto modificado.

6. Se concluye que el porcentaje más alto de adición de arcilla calcinada mostró un comportamiento superior, es decir, el contenido del filler al 25% permitió obtener la mezcla de mayor beneficio puesto que su comportamiento muestra un mejor desempeño en las propiedades físicas y reológicas que las demás muestras.
7. La utilización de la arcilla calcinada y el grano de caucho como agentes modificadores en las mezclas asfálticas, contribuyen al medio ambiente mitigando el impacto ambiental, debido a la inadecuada disposición y almacenamiento de estos residuos sólidos. Adicionalmente los resultados de este proyecto demostraron que la adición de estos materiales en óptimos porcentajes mejoran las propiedades del asfalto convencional.
8. Se invita a la comunidad universitaria para que den continuidad al estudio de los asfaltos modificados con GCR y arcilla calcinada, evaluando y profundizando las propiedades físicas, reológicas y mecánicas.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. ALASTIJEY, A; BASTIDA, J; FERNÁNDEZ TuRrnL, J.; QUEROL, X; SIGNES, M. Mineralogía de las arcillas calcinadas. instituto de Ciencias de la Tierra y Departamenyto de Geología, Universidad de Valencia, España, (Sistema de acceso público) [en línea]. 2001.
2. Alcaldía mayor de Bogotá D.C. Instituto de Desarrollo Urbano, Contrato IDU – 306 – 003, Bogotá: Universidad de los Andes, 2005.
3. ALVAREZ, H., ALVAREZ, M. (1985). Porosidad técnica del concreto. Tesis de pregrado, UCV, Caracas.
4. Arcillas y tierras, (Sistema de acceso público) [en línea]. Bucerías, Nayarit. México.: TUNA Centro de cerámica contemporánea. Marzo de 2001 [citado 2013-04-7]. Disponible en internet: <http://tunaceramica.com>.
5. Arcilla calcinada molida. (Sistema de acceso público) [en línea]. Brasil: Mineração Curimbaba. 2004 [citado 2013-03-9]. Disponible en internet: http://www.curimbaba.com.br/es/produtos/pdf/argila_calcinada_moida.pdf
6. ARENAS, Hugo. Propuesta Técnica para garantizar la homogeneidad de los asfaltos producidos en las refinerías colombianas. (Sistema de acceso público) [en línea]. Cámara Colombiana de la infraestructura. Septiembre 2009.
7. Aracelly S. Contaminación atmosférica por la fabricación de ladrillos y sus posibles efectos sobre la salud de los niños de zonas aledañas. (Sistema de acceso público) [en línea]. Departamento de Ciencias Exactas de Ingeniería de la Universidad Católica Boliviana. ACTA NOVA; Vol. 3, Nº 2, junio 2006.
8. ARGUELLES, A. Hormigones. Fabricación y Cálculo. Madrid. 1980.
9. ASOCIACIÓN DE PRODUCTORES Y PAVIMENTADORES ASFALTICOS DE COLOMBIA, cartilla del pavimento Asfaltico, ASOPAC, 2004.
10. ASTM International Standards worldwide. “Standard viscosity-temperature chart for asphalts”. ASTM D2493 (2001).

11. BOTASSO, Gerardo y CUATTROCCHIO, Adrián. Estado de la utilización de caucho reciclado en obras viales en latinoamérica. Aplicaciones. LEMaC. 2007. 36h. Centro de Investigaciones Viales. Universidad Tecnológica Nacional: Facultad Regional La Plata.
12. BROOKFIELD. "More solutions to sticky problems". Brookfield Engineering Labs. 2005.
13. Buscan alternativas para las llantas usadas. (Sistema de acceso público) [en línea]. Medellín, Colombia: [citado 2013-04-14]. Disponible en internet: <http://www.elcolombiano.com>
14. CAMPOS RIVERA, José Ubaldo; GÓMEZ CASTRO, Silfredis Edgardo; TORREZ FLORES, Wilber Josué. Impermeabilización de rellenos sanitarios utilizando suelos naturales aplicados a la ciudad de San Miguel y Lolotique. En: Capítulo III. Suelos y sus propiedades. El salvador, San Miguel: Universidad de oriente, 2006.
15. CARDENAS, J y FONSECA, E. "Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura". Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 12, p. 125-137. 2009
16. CASTRO, G. "Materiales y compuestos para la industria del neumático". Departamento de ingeniería mecánica F.I.U.B.A. 2008.
17. CONG, Peiliang. Investigation of asphalt binder containing various crumb rubbers and asphalts.
18. CORBETT LW. Manufacture of petroleum asphalt. In: Hoiberg AJ, editor. Bituminous Materials: Asphalts, Tars and Pitches. New York: Interscience Publishers; 1965. p. 81–122. Vol. 2, Part 1.
19. CUATTROCCHIO, A. El uso de caucho de cubiertas en mezclas asfálticas. LEMAC. Buenos Aires, Argentina, 2006.

20. DELLE SCIENZE, Parco Area. LAZZARINO, Largo Lucio. Linear viscoelastic behaviour of asphalt binders modified with polymer/clay nanocomposites, Italy: University of Parma, University of Pisa. 2012.
21. Ecología Y Medio Ambiente. (Sistema de acceso público) [en línea]. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Febrero de 2008 [citado 2013-03-7]. Disponible en internet: <http://www.virtual.unal.edu.co>
22. Estudio de concreto elaborado con caucho de reciclado de diferentes tamaños de partículas. (Sistema de acceso público) [en línea]. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela. Marzo de 2008 [citado 2013-04-7]. Disponible en internet: <http://www.scielo.org.ve>.
23. Estudio de la adición de arcillas calcinadas en la durabilidad de hormigones. (Sistema de acceso público) [en línea]. Santiago, Chile: Revista Ingeniería de Construcción Vol. 26 N°1, Abril de 2011 [citado 2013-04-7]. Disponible en internet: <http://www.scielo.cl>.
24. ET-GE-002 Para la aplicación del grano de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas en caliente por vía húmeda. IDU 2011
25. FIGUEROA, A. et al. Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente. Ingeniería e Investigación. 2007.
26. FIGUEROA, Ana. FONSECA, Elsa. REYES, Fredy. Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana Ingeniería y Universidad, Vol. 13, Núm. 1, enero-junio, 2009.
27. FIGUEROA, A. y REYES, F. Asfaltos modificados con poliestireno. Bogotá: Universidad de la Salle, 2005.
28. GARCÍA, L. "Reología de ligantes asfálticos mediante el viscosímetro Brookfield". Centro de investigaciones viales LEMAC. 2009.

29. GARCÍA ROMERO, Emilia y SUÁREZ BARRIOS, Mercedes. Las arcillas: propiedades y usos. Madrid, 2007, 25 h. Monografía. Universidad Complutense y Universidad de Salamanca.
30. GAVIRIA, Sergio. Re: Procedimiento SEM. (en línea). Mensaje a: Javier Andrade. 10 Abril 2013. Comunicación personal.
31. GILL, Robin. Chemical fundamentals of geology. In: Atomic Spectra. Second edition, London, Chapman & Hall, 1996.
32. INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO, Estudio de las Mejoras Mecánicas de Mezclas Asfálticas con Desechos de Llanta. Procedimiento
33. INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. “Especificación técnica para la aplicación del grano de caucho reciclado en mezclas asfálticas en caliente por vía húmeda”. ET – GE - 002. 2011.
34. INSTITUTO NACIONAL DE DEFENSA DE LA COMPETENCIA Y DE LA PROTECCIÓN DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL. INDECOPI Comisión de reglamentos técnicos y comerciales. Normas técnicas ITINTEC 331.017, Peru, 1978.
35. INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (INVIAS). Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos. ARTICULO 400 – 07- Bogotá D.C. El Instituto. 2007.
36. INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, Artículo 410-07, Suministro de Cemento Asfáltico, Definición de Cemento Asfáltico.
37. JASSO, Martin. Preparation and properties of conventional asphalt modified by physical mixtures of linear SBS and montmorillonite clay. Elsevier Ltd. Canada, 2012.
38. J. Royo, Manual de tecnología del caucho. Consorcio nacional de industrias del caucho, Barcelona (1989).

39. Las llantas viejas con un problema ambiental "radial". (Sistema de acceso público) [en línea]. Bogotá, Colombia: Mayo de 2011 [citado 2013-04-14]. Disponible en internet: <http://www.eltiempo.com>
40. LÓPEZ LARA, Teresa; HERNÁNDEZ ZARAGOZA, Juan Bosco; HORTA RANGEL, Jaime; CORONADO MÁRQUEZ, Aleyda; CASTAÑO MENESES, Víctor Manuel. Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas. Facultad de Ingeniería; Universidad Autónoma de Querétaro, 2010.
41. MENDOZA QUINTERO, Maria Alejandra; SALAZAR SUSUNAGA, Maria Paula. Efecto de la arcilla calcinada en un asfalto B60/70 en porcentajes del 5 % al 50 %. Bogotá, 2012, 111 h. Trabajo de grado (Ingeniería civil). Universidad Piloto de Colombia. Facultad de Ingeniería Civil.
42. M, El-Shafie. I.M. Ibrahim, A.M.M. Abd El Rahman. The addition effects of macro and nano clay on the performance of asphalt binder, Nasr City, Cairo, Egypt: Egyptian Petroleum Research Institute (EPRI). April 2012.
43. MONTEJO, A. Ingeniería de pavimentos, evaluación estructural, obras de mejoramiento y nuevas tecnologías. Vol. 2. 3a ed. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2006.
44. MURALI KRISHNAN J, RAJAGOPAL KR. Review of uses and modeling of bitumen from ancient to modern times. Appl Mech Rev 2003;56:149–214.
45. ORTIZ, Aracely. El microscopio electrónico de barrido un instrumento útil para la ciencia. (En línea), Universidad Autónoma de Aguascalientes. Extraído de: <http://www.amemi.org/>
46. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Mezclas asfálticas. (Sistema de acceso público) [en línea]. Madrid. 2001, 26 h. [citado 2013-03-4]. Disponible en internet: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3334/13/34065-13.pdf>

47. Propiedades físicas del suelo, (Sistema de acceso público) [en línea]. Montevideo, Uruguay: universidad de la República, Facultad de agronomía. 2004 [citado 2013-04-9]. Disponible en internet: <http://www.fagro.edu.uy>
48. READ J, WHITEOAK D. The Shell Bitumen Handbook. 5th Ed. London: Thomas Telford Publishing; 2003.
49. REYES, Fredy. Diseño racional de pavimentos. (Sistema de acceso público) [en línea]. CEJA. Bogotá 2003
50. ROMERO, C.M, GOMEZ, A. Propiedades físicas y químicas de los asfaltos colombianos tipo Barrancabermeja y de sus respectivas fracciones de asfaltenos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. . (Sistema de acceso público) [en línea]. 26(98): 2002. ISSN 0370- 3908.
51. ROMERO MARTÍNEZ, John Jaime; SÁNCHEZ MARTÍNEZ, María Camila. Efecto de la arcilla calcinada en un asfalto B-60/70 y su incidencia en una mezcla asfáltica MDC-2. Bogotá, 2011, 98 h. Trabajo de grado (Ingeniería civil). Universidad Piloto de Colombia. Facultad de Ingeniería Civil.
52. RONDON, Hugo. MORENO, Luis. Influencia del agua en el fenómeno de stripping en mezclas asfálticas: estudio sobre el ligante. (Sistema de acceso público) [en línea]. Ing. Univ. Bogotá (Colombia), 14 (2): julio-diciembre de 2010. ISSN 0123-2126
53. SIÑANI, S & MANCILLA,B. Problemática ambiental producida por las ladrilleras. (Sistema de acceso público) [en línea]. La Paz, Bolivia. 2006.
54. Tecnología de la adhesión, (Sistema de acceso público) [en línea]. Madrid España: Departamento técnico de Loctite España. 2006 [citado 2013-04-9]. Disponible en internet: <http://www.ulpgc.es/>.
55. TOPCU, IB., AVCULAR, N. (1997). Analysis of rubberized concrete as a composite material, Cement and Concrete research.
56. Utilización del grano de caucho proveniente de llantas en mezclas asfálticas en caliente, (Sistema de acceso público) [en línea]. Oruro, Bolivia: universidad

técnica de Oruro. Abril de 2010 [citado 2013-04-7]. Disponible en internet: <http://tesis.dpicuto.edu.bo>.

57. VÁZQUEZ RUIZ, Idalit. Ventajas y desventajas del uso de polímeros en los asfaltos. En: Generalidades de los asfaltos. Veracruz. 2010, 98 h. Monografía (Ingeniería civil). Universidad Veracruzana. Facultad de Ingeniería Civil.
58. VELÁZQUEZ, Manuel. Manual del asfalto - The Asphalt Institute. Ediciones Urano, S.a. España: Bilbao. 1972. 477 h
59. WAHR, C. Materiales bituminosos. Citado por CÁRDENAS, Jaleydi, Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura. Antioquia. Revista EIA, 2009.
60. Zeevaert L "La Investigación del Suelo por su Estructura y Comportamiento Reológico"; Segunda Conferencia Magistral en el Instituto Politécnico Nacional; México, 1997

**ANEXO A.
RESULTADOS GENERALES DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y
REOLÓGICAS.**

Resultado ensayo de penetración.

ASFALTO 80/100		
MUESTRA 1 (mm/10)	MUESTRA 2 (mm/10)	MUESTRA 3 (mm/10)
84,6	82,6	85,3
84,75	84,5	86,5
86,3	85,9	82,5
Promedio (mm/10)		
85,22	84,33	84,77
84,77		
Diferencia entre extremos (mm/10)		
1,7	3,3	4

ASFALTO 80/100 CON 18%GCR		
MUESTRA 1 (mm/10)	MUESTRA 2 (mm/10)	MUESTRA 3 (mm/10)
55,1	53,8	58
59	55,7	54,9
55,9	56	57,7
Promedio (mm/10)		
56,67	55,17	56,87
56,23		
Diferencia entre extremos (mm/10)		
3,1	2,2	3,1

ASFALTO 80/100 CON 18%GCR + 5%ARCILLA		
MUESTRA 1 (mm/10)	MUESTRA 2 (mm/10)	MUESTRA 3 (mm/10)
54	53	56
56	54,6	53,8
54,9	55	55,6
Promedio (mm/10)		
54,97	54,20	55,13
54,77		
Diferencia entre extremos (mm/10)		
2	2	2,2

ASFALTO 80/100 CON 18%GCR + 10%ARCILLA		
MUESTRA 1 (mm/10)	MUESTRA 2 (mm/10)	MUESTRA 3 (mm/10)
53,2	52,4	54
54,1	53,2	52,5
53,8	54,2	53,9
Promedio (mm/10)		
53,70	53,27	53,47
53,48		
Diferencia entre extremos (mm/10)		
0,9	1,8	1,5

ASFALTO 80/100 CON 18%GCR + 15%ARCILLA		
MUESTRA 1 (mm/10)	MUESTRA 2 (mm/10)	MUESTRA 3 (mm/10)
52,4	51	52
54	52,1	51
52,9	53	54,1
Promedio (mm/10)		
53,10	52,03	52,37
52,50		
Diferencia entre extremos (mm/10)		
1,6	2	1

ASFALTO 80/100 CON 18%GCR + 20%ARCILLA		
MUESTRA 1 (mm/10)	MUESTRA 2 (mm/10)	MUESTRA 3 (mm/10)
50,2	49,7	51,5
49	51,7	50,3
50,5	50,6	52
Promedio (mm/10)		
49,90	50,67	51,27
50,61		
Diferencia entre extremos (mm/10)		
1,5	2	1,7

ASFALTO 80/100 CON 18%GCR + 25%ARCILLA		
MUESTRA 1 (mm/10)	MUESTRA 2 (mm/10)	MUESTRA 3 (mm/10)
48,6	47,5	48,6
47,3	48,7	47,1
49,1	46,9	49,8
Promedio (mm/10)		
48,33	47,70	48,50
48,18		
Diferencia entre extremos (mm/10)		
1,8	1,8	2,7

Resultado ensayo de punto de ablandamiento.

ASFALTO 80/100			
MUESTRA 1		MUESTRA 2	
Anillo 1	Anillo 2	Anillo 1	Anillo 2
46,8	47,2	47,3	47,5
PROMEDIOS			
47		47,4	
47,2			

ASFALTO 80/100 CON 18% GCR			
MUESTRA 1		MUESTRA 2	
Anillo 1	Anillo 2	Anillo 1	Anillo 2
51,7	52,4	52,8	53,1
PROMEDIOS			
52,05		52,95	
52,5			

ASFALTO 80/100 CON 18% GCR Y 5%ARCILLA			
MUESTRA 1		MUESTRA 2	
Anillo 1	Anillo 2	Anillo 1	Anillo 2
54,7	54,4	54,8	54,1
PROMEDIOS			
54,55		54,45	
54,5			

ASFALTO 80/100 CON 18% GCR Y 10%ARCILLA			
MUESTRA 1		MUESTRA 2	
Anillo 1	Anillo 2	Anillo 1	Anillo 2
56,7	56,4	56,8	56,1
PROMEDIOS			
56,55		56,45	
56,5			

ASFALTO 80/100 CON 18% GCR Y 15%ARCILLA			
MUESTRA 1		MUESTRA 2	
Anillo 1	Anillo 2	Anillo 1	Anillo 2
57,6	57,4	57,7	57,1
PROMEDIOS			
57,5		57,4	
57,45			

ASFALTO 80/100 CON 18% GCR Y 20%ARCILLA			
MUESTRA 1		MUESTRA 2	
Anillo 1	Anillo 2	Anillo 1	Anillo 2
58,2	58,6	58,9	59
PROMEDIOS			
58,4		58,95	
58,675			

ASFALTO 80/100 CON 18%GCR Y 25%ARCILLA			
MUESTRA 1		MUESTRA 2	
Anillo 1	Anillo 2	Anillo 1	Anillo 2
59,3	59,6	59,2	59,5
PROMEDIOS			
59,45		59,35	
59,4			

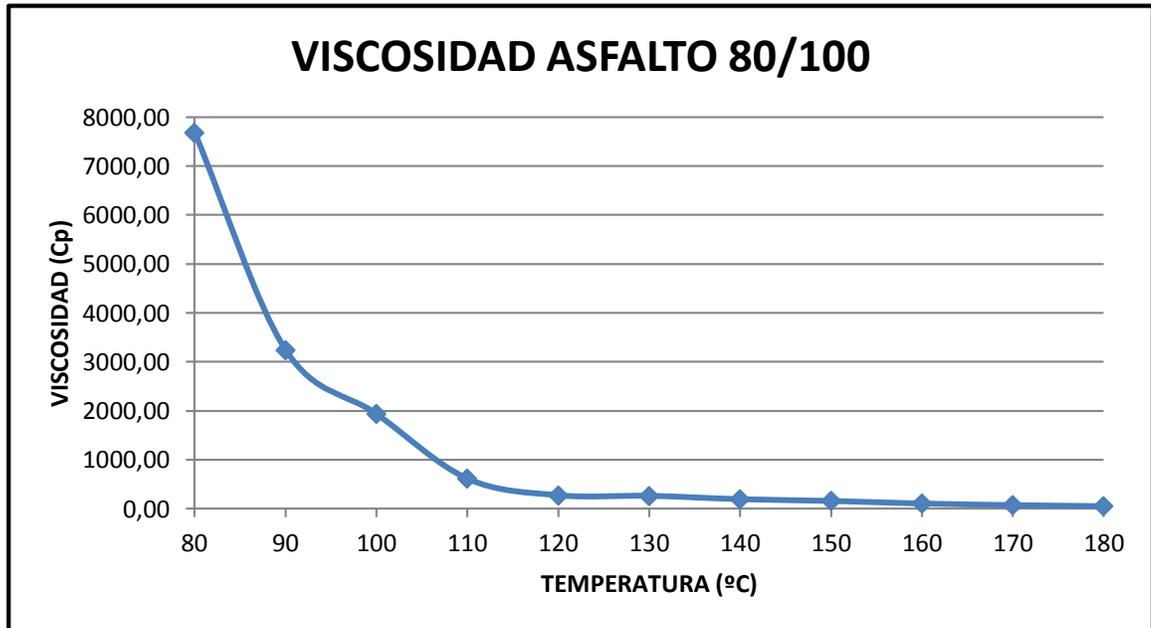
Resultados Viscosidad Rotacional

Viscosidad asfalto 80-100.

TABLAS PROGRAMA WINGATHER							
#	Viscosidad (mPas)	Velocidad (RPM)	Torque (%)	S S (N/m ²)	S R (1/sec)	Temperatura (°C)	Intervalo de tiempo (mm:ss.t)
1	7763,63	22	67,2	57,12	7,48	80,1	00:59,8
2	7658,46	22	67,2	57,12	7,48	80,1	00:59,9
3	7636,36	22	67,2	57,12	7,48	80	00:59,9
PROMEDIO	7686,15						
1	3355	50	67,1	57,04	17	90,1	08:15,9
2	3245	50	64,9	55,17	17	90,1	00:59,9
3	3145	50	62,9	53,46	17	90,2	00:59,9
PROMEDIO	3248,333						
1	1944	25	67,1	31,2	23,25	100	01:33,6
2	1942	25	67,2	31,25	23,25	100	00:59,9
3	1936	25	67,1	31,2	23,25	100	00:59,9
PROMEDIO	1940,667						
1	715,56	45	64,4	29,95	41,85	110	01:17,9
2	595,56	45	53,6	24,92	41,85	110	00:59,9
3	546,67	45	49,2	22,88	41,85	110	00:59,9
PROMEDIO	619,2633						

	1	310	40	24,8	11,53	37,2	120	12:58,0
	2	228	40	24,6	11,53	37,2	120	00:59,9
	3	300	40	24,7	11,53	37,2	120	00:59,9
PROMEDIO		279,3333						
	1	268	50	44,7	20,79	46,5	130	02:18,9
	2	270	50	41,9	19,48	46,5	130	00:59,9
	3	267	50	41,7	19,39	46,5	130	00:59,9
PROMEDIO		268,3333						
	1	203	50	26,3	12,23	46,5	140	01:04,3
	2	200	50	25,4	11,81	46,5	141	00:59,9
	3	195	50	25,4	11,81	46,5	140	00:59,9
PROMEDIO		199,3333						
	1	163	50	16,3	7,58	46,5	150	16:28,7
	2	164	50	16,4	7,63	46,5	151	00:59,9
	3	164	50	16,4	7,63	46,5	151	00:59,9
PROMEDIO		163,6667						
	4	111	50	14	5,16	46,5	160	17:57,2
	5	110	50	14	5,12	46,5	160	00:59,9
	6	110	50	14	5,12	46,5	161	00:59,9
PROMEDIO		110,3333						
	1	78	50	12	3,63	46,5	170	00:23,0
	2	78	50	12	3,63	46,5	170	00:59,9
	3	78	50	12	3,63	46,5	170	00:59,9
PROMEDIO		78						
	1	57	50	11	2,65	46,5	180	15:31,3
	2	56	50	11	2,6	46,5	180	00:59,9
	3	56	50	11	2,6	46,5	181	00:59,9
PROMEDIO		56,33333						

RESUMEN VISCOSIDADES		
TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (mPas)	VISCOSIDAD (g/cm*s)
80	7686,15	76,86
90	3248,33	32,48
100	1940,67	19,41
110	619,26	6,19
120	279,33	2,79
130	268,33	2,68
140	199,33	1,99
150	163,67	1,64
160	110,33	1,10
170	78,00	0,78
180	56,33	0,56

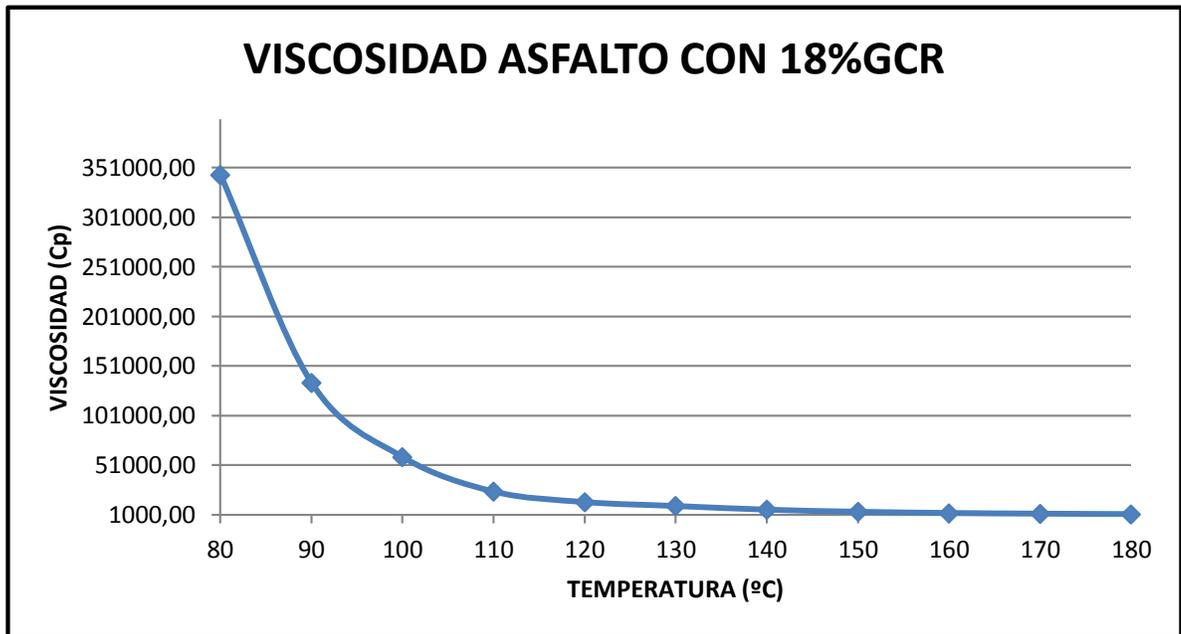


Viscosidad asfalto 80-100 + Grano de Caucho Reciclado (GCR).

TABLAS PROGRAMA WINGATHER							
#	Viscosidad (mPas)	Velocidad (RPM)	Torque (%)	S S (N/m ²)	S R (1/sec)	Temperatura (°C)	Intervalo de tiempo (mm:ss.t)
1	341200	2,5	85,3	213,25	0,63	80,2	19:04,0
2	344800	2,5	86,2	215,5	0,63	80,2	00:59,9
3	345600	2,5	86,4	216	0,63	80,2	00:59,9
PROMEDIO	343866,7						
1	135500	6	81,3	203,25	1,5	90,1	17:07,7
2	134333,3	6	80,6	201,5	1,5	90,2	00:59,9
3	132833,3	6	79,7	199,25	1,5	90,4	00:59,9
PROMEDIO	134222,2						
1	59600	10	59,6	149	2,5	100	14:33,4
2	59400	10	59,4	148,5	2,5	100	00:59,9
3	58800	10	58,8	147	2,5	100	00:59,9
PROMEDIO	59266,67						
1	24685,71	35	86,4	216	8,75	110	13:27,0
2	24400	35	85,4	213,5	8,75	110	00:59,9
3	24171,43	35	84,6	211,5	8,75	110	00:59,9
PROMEDIO	24419,05						
1	13925	40	55,7	139,25	10	120	14:20,9
2	13850	40	55,4	138,5	10	120	00:59,9
3	13725	40	54,9	137,25	10	120	00:59,9
PROMEDIO	13833,33						
1	9862,5	20	78,9	67,07	6,8	130	21:37,8
2	9887,5	20	79,1	67,23	6,8	130	00:59,9
3	9837,5	20	78,7	66,9	6,8	130	00:59,9
PROMEDIO	9862,5						
1	6183,33	30	74,2	63,07	10,2	140	16:34,7
2	6166,67	30	74	62,9	10,2	140	00:59,9
3	6116,67	30	73,4	62,39	10,2	141	00:59,9
PROMEDIO	6155,557						

	1	4068,75	40	65,1	55,34	13,6	150	15:58,7
	2	4043,75	40	64,7	55	13,6	150	00:59,9
	3	4006,25	40	64,1	54,48	13,6	150	00:59,9
PROMEDIO		4039,583						
	1	2840	50	56,8	48,28	17	160	07:52,2
	2	2820	50	56,4	47,94	17	160	00:59,9
	3	2820	50	56,4	47,94	17	161	00:59,9
PROMEDIO		2826,667						
	1	2175	50	43,5	36,98	17	170	18:08,4
	2	2145	50	42,9	36,47	17	170	00:59,9
	3	2130	50	42,6	36,21	17	171	00:59,9
PROMEDIO		2150						
	1	1710	50	34,2	29,07	17	180	14:58,4
	2	1700	50	34	28,9	17	181	00:59,9
	3	1685	50	33,7	28,65	17	181	00:59,9
PROMEDIO		1698,333						

RESUMEN VISCOSIDADES		
TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (MPAS)	VISCOSIDAD (G/CM*S)
80	343866,67	3438,67
90	134222,22	1342,22
100	59266,67	592,67
110	24419,05	244,19
120	13833,33	138,33
130	9862,50	98,63
140	6155,56	61,56
150	4039,58	40,40
160	2826,67	28,27
170	2150,00	21,50
180	1698,33	16,98

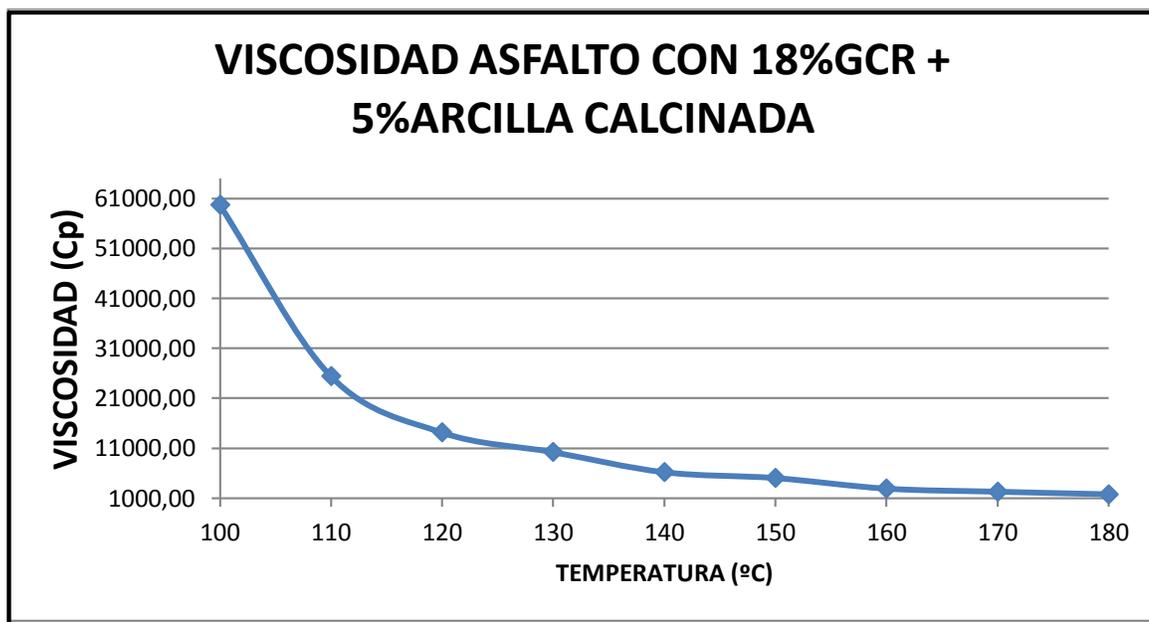


Viscosidad asfalto 80-100 + GCR + 5% Arcilla Calcinada.

TABLAS PROGRAMA WINGATHER							
#	Viscosidad (mPas)	Velocidad (RPM)	Torque (%)	S S (N/m ²)	S R (1/sec)	Temperatura (°C)	Intervalo de tiempo (mm:ss.t)
1	357000	3	95,1	237,75	0,75	80,3	14:08,5
2	356666,7	3	95	237,5	0,75	80,1	00:59,9
3	358666,7	3	95,6	239	0,75	80,1	00:59,9
PROMEDIO	357444,4						
1	146333,3	6	69,8	174,5	1,5	90,2	15:56,3
2	147166,7	6	70,3	175,75	1,5	90,2	00:59,9
3	147166,7	6	70,3	175,75	1,5	90,3	00:59,9
PROMEDIO	146888,9						
1	59750	12	64,5	161,25	3	100	14:52,0
2	59250	12	63,9	159,75	3	100	00:59,9
3	59916,67	12	63,5	158,75	3	100	00:59,9
PROMEDIO	59638,89						

1	25314,29	35	78,1	195,25	8,75	110	13:00,6
2	25371,43	35	78,3	195,75	8,75	110	00:59,9
3	25371,43	35	78,3	195,75	8,75	110	00:59,9
PROMEDIO	25352,38						
1	14140	50	60,7	151,75	12,5	120	02:28,7
2	14100	50	60,5	151,25	12,5	120	00:59,9
3	14060	50	60,3	150,75	12,5	120	00:59,9
PROMEDIO	14100						
1	10264,71	17	69,8	59,33	5,78	130	03:18,3
2	10161,76	17	69,1	58,73	5,78	130	00:59,9
3	10088,24	17	68,6	58,31	5,78	130	00:59,9
PROMEDIO	10171,57						
1	6200	25	62	52,7	8,5	140	14:49,3
2	6140	25	61,4	52,19	8,5	140	00:59,9
3	6140	25	61,4	52,19	8,5	141	00:59,9
PROMEDIO	6160						
1	5021,43	35	56,3	47,86	11,9	150	14:23,1
2	4992,86	35	55,9	47,52	11,9	150	00:59,9
3	4964,29	35	55,5	47,18	11,9	150	00:59,9
PROMEDIO	4992,86						
1	2955	50	59,1	50,23	17	160	06:32,0
2	2875	50	57,5	48,88	17	160	01:00,2
3	2805	50	56,1	47,69	17	161	00:59,7
PROMEDIO	2878,333						
1	2265	50	41,3	35,11	17	170	24:31,8
2	2255	50	41,1	34,94	17	170	00:59,9
3	2250	50	41	34,85	17	171	00:59,9
PROMEDIO	2256,667						
1	1755	50	33,1	28,14	17	180	14:57,6
2	1740	50	32,8	27,88	17	180	00:59,9
3	1735	50	32,7	27,8	17	181	00:59,9
PROMEDIO	1743,333						

RESUMEN VISCOSIDADES		
TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (mPas)	VISCOSIDAD (g/cm*s)
80	357444,45	3574,44
90	146888,89	1468,89
100	59638,89	596,39
110	25352,38	253,52
120	14100,00	141,00
130	10171,57	101,72
140	6160,00	61,60
150	4992,86	49,93
160	2878,33	28,78
170	2256,67	22,57
180	1743,33	17,43

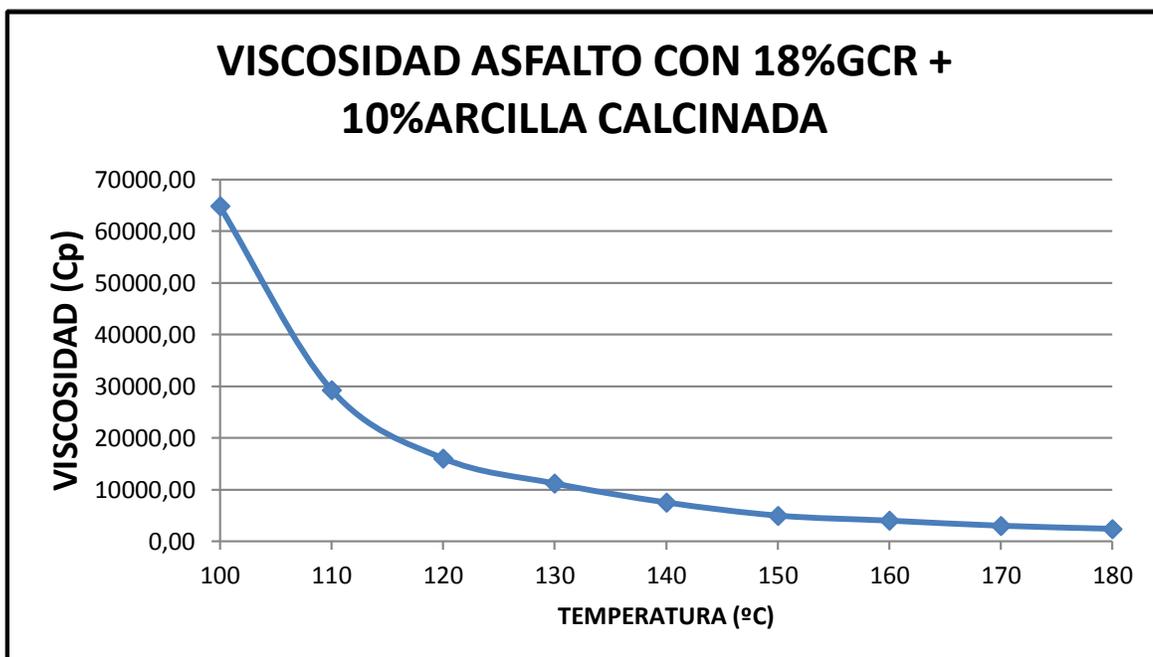


Viscosidad asfalto 80-100 + GCR + 10% Arcilla Calcinada.

TABLAS PROGRAMA WINGATHER							
#	Viscosidad (mPas)	Velocidad (RPM)	Torque (%)	S S (N/m²)	S R (1/sec)	Temperatura (°C)	Intervalo de tiempo (mm:ss.t)
1	377500	2	75,5	188,75	0,5	80,2	26:25,6
2	382000	2	76,4	191	0,5	80,2	00:59,9
3	386000	2	77,2	193	0,5	80,2	00:59,9
PROMEDIO	381833,3						
1	157500	6	94,5	236,25	1,5	90,2	14:26,5
2	153500	6	92,1	230,25	1,5	90,3	00:59,9
3	151500	6	90,9	227,25	1,5	90,4	00:59,9
PROMEDIO	154166,7						
1	65583,33	12	78,7	196,75	3	100	15:02,6
2	64916,67	12	77,9	194,75	3	100	00:59,9
3	63833,33	12	76,6	191,5	3	100	00:59,9
PROMEDIO	64777,78						
1	29440	25	73,6	184	6,25	110	15:24,3
2	29320	25	73,3	183,25	6,25	110	00:59,9
3	29120	25	72,8	182	6,25	110	00:59,9
PROMEDIO	29293,33						
1	16200	40	64,8	162	10	120	17:21,0
2	16025	40	64,1	160,25	10	120	00:59,9
3	15900	40	63,6	159	10	120	00:59,9
PROMEDIO	16041,67						
1	11250	15	79,5	67,58	5,1	130	11:34,8
2	11200	15	79,2	67,32	5,1	130	00:59,9
3	11083,33	15	78,5	66,72	5,1	130	00:59,9
PROMEDIO	11177,78						
1	7608,33	30	91,3	77,61	10,2	140	15:06,6
2	7500	30	90	76,5	10,2	140	00:59,9
3	7425	30	89,1	75,73	10,2	141	00:59,9
PROMEDIO	7511,11						

1	5006,25	40	80,1	68,09	13,6	150	14:58,0
2	4968,75	40	79,5	67,58	13,6	150	00:59,9
3	4931,25	40	78,9	67,07	13,6	151	00:59,9
PROMEDIO	4968,75						
1	4015	50	80,3	68,26	17	160	29:17,7
2	3975	50	79,5	67,58	17	161	00:59,9
3	3960	50	79,2	67,32	17	161	00:59,9
PROMEDIO	3983,333						
1	2925	50	58,5	49,73	17	170	14:56,5
2	3070	50	61,4	52,19	17	171	00:59,9
3	3000	50	60	51	17	171	00:59,9
PROMEDIO	2998,333						
1	2460	50	49,2	41,82	17	180	14:55,7
2	2390	50	47,8	40,63	17	181	00:59,9
3	2355	50	47,1	40,04	17	181	00:59,9
PROMEDIO	2401,667						

RESUMEN VISCOSIDADES		
TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (mPas)	VISCOSIDAD (g/cm*s)
80	381833,33	3818,33
90	154166,67	1541,67
100	64777,78	647,78
110	29293,33	292,93
120	16041,67	160,42
130	11177,78	111,78
140	7511,11	75,11
150	4968,75	49,69
160	3983,33	39,83
170	2998,33	29,98
180	2401,67	24,02

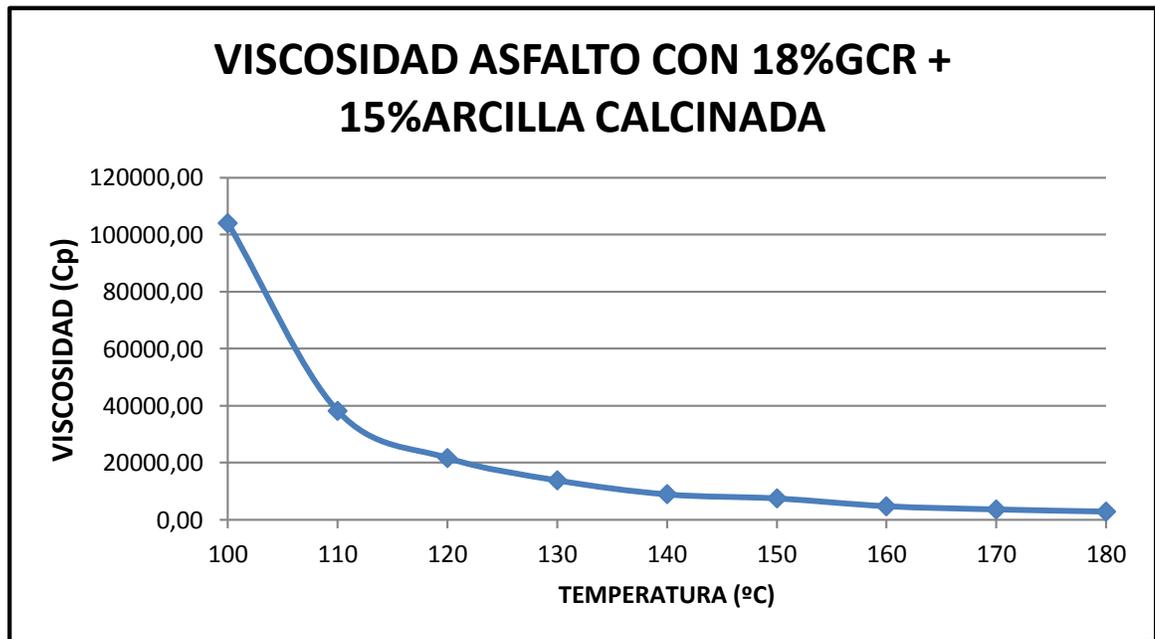


Viscosidad asfalto 80-100 + GCR + 15% Arcilla Calcinada.

TABLAS PROGRAMA WINGATHER							
#	Viscosidad (mPas)	Velocidad (RPM)	Torque (%)	S S (N/m ²)	S R (1/sec)	Temperatura (°C)	Intervalo de tiempo (mm:ss.t)
1	747500	1,2	89,7	224,25	0,3	80,1	03:36,4
2	737500	1,2	88,5	221,25	0,3	80,1	00:59,9
3	720833,3	1,2	86,5	216,25	0,3	80,1	00:59,9
PROMEDIO	735277,8						
1	261200	2,5	65,3	163,25	0,63	90,2	15:05,1
2	259600	2,5	64,9	162,25	0,63	90,4	00:59,9
3	258000	2,5	64,5	161,25	0,63	90,3	00:59,9
PROMEDIO	259600						
1	102250	8	81,8	204,5	2	100	00:47,6
2	104500	8	83,6	209	2	100	00:59,9
3	105250	8	84,2	210,5	2	100	00:59,9
PROMEDIO	104000						

	1	37440	25	93,6	234	6,25	110	06:53,8
	2	38240	25	95,6	239	6,25	110	00:59,9
	3	38640	25	96,6	241,5	6,25	110	00:59,9
PROMEDIO		38106,67						
	1	21850	40	87,4	218,5	10	120	14:51,1
	2	21550	40	86,2	215,5	10	120	00:59,9
	3	21475	40	85,9	214,75	10	120	00:59,9
PROMEDIO		21625						
	1	13950	10	75,8	64,43	3,4	130	07:52,1
	2	13725	10	74,9	63,67	3,4	131	00:59,9
	3	13575	10	74,3	63,16	3,4	130	00:59,9
PROMEDIO		13750						
	1	8823,53	17	87,2	74,12	5,78	140	03:00,3
	2	8808,82	17	83,7	71,15	5,78	140	00:59,9
	3	8888,24	17	85,6	72,76	5,78	140	00:59,9
PROMEDIO		8840,197						
	1	7475	30	89,7	76,25	10,2	150	16:37,7
	2	7391,67	30	88,7	75,4	10,2	150	00:59,9
	3	7391,67	30	88,7	75,4	10,2	150	00:59,9
PROMEDIO		7419,447						
	1	4685	50	93,7	79,65	17	160	00:33,2
	2	4675	50	93,5	79,48	17	160	00:59,9
	3	4700	50	94	79,9	17	161	00:59,9
PROMEDIO		4686,667						
	1	3625	50	72,5	61,63	17	170	14:56,6
	2	3585	50	71,7	60,95	17	170	00:59,9
	3	3475	50	69,5	59,08	17	171	00:59,9
PROMEDIO		3561,667						
	1	2820	50	56,4	47,94	17	180	14:56,3
	2	2820	50	56,4	47,94	17	180	00:59,9
	3	2760	50	55,2	46,92	17	181	00:59,9
PROMEDIO		2800						

RESUMEN VISCOSIDADES		
TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (mPas)	VISCOSIDAD (g/cm*s)
80	735277,78	7352,78
90	259600,00	2596,00
100	104000,00	1040,00
110	38106,67	381,07
120	21625,00	216,25
130	13750,00	137,50
140	8840,20	88,40
150	7419,45	74,19
160	4686,67	46,87
170	3561,67	35,62
180	2800,00	28,00

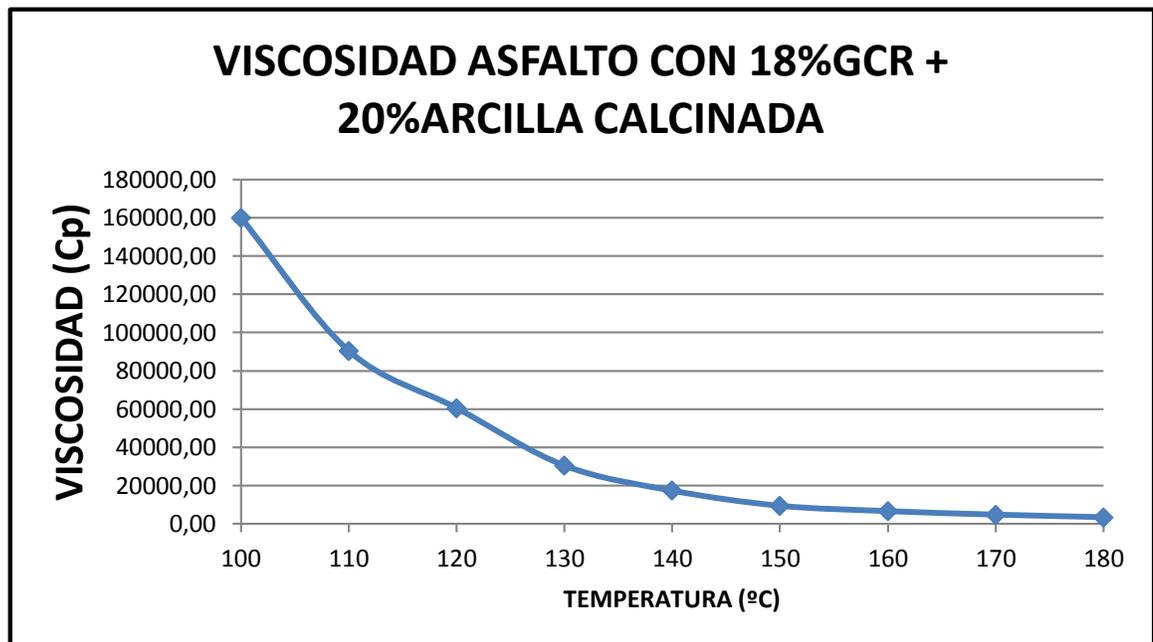


Viscosidad asfalto 80-100 + GCR + 20% Arcilla Calcinada.

TABLAS PROGRAMA WINGATHER							
#	Viscosidad (mPas)	Velocidad (RPM)	Torque (%)	S S (N/m²)	S R (1/sec)	Temperatura (°C)	Intervalo de tiempo (mm:ss.t)
1	798333,3	1,2	95,8	239,5	0,3	83,6	14:45,9
2	797500	1,2	94,9	212,25	0,3	81,7	00:59,9
3	795833,3	1,2	93,9	184,75	0,3	80,7	00:59,9
PROMEDIO	797222,2						
1	280666,7	3	84,2	210,5	0,75	90,1	03:36,5
2	281000	3	84,3	210,75	0,75	90,1	00:59,9
3	282000	3	84,6	211,5	0,75	90,1	00:59,9
PROMEDIO	281222,2						
1	162000	2,5	40,5	101,25	0,63	100	11:48,0
2	160000	2,5	40	100	0,63	100	00:59,9
3	158000	2,5	39,5	98,75	0,63	100	00:59,9
PROMEDIO	160000						
1	88200,66	2,5	67,8	184	3,4	110	00:08,8
2	92150	2,5	67,4	183,25	3,4	110	00:59,9
3	91083,22	2,5	54,6	182	3,4	110	00:59,9
PROMEDIO	90477,96						
1	62000	6	81,5	218,5	6,25	120	11:48,0
2	60000	6	84	215,5	6,25	120	00:59,9
3	59700	6	79,5	214,75	6,25	120	00:59,9
PROMEDIO	60566,67						
1	28250	6	67,8	57,63	2,04	130	00:08,8
2	32250	6	77,4	65,79	2,04	131	00:59,9
3	31083,33	6	74,6	63,41	2,04	130	00:59,9
PROMEDIO	30527,78						
1	16979,17	12	81,5	69,28	4,08	140	15:33,6
2	17520,83	12	84,1	71,48	4,08	140	00:59,9
3	17854,17	12	85,7	72,84	4,08	141	00:59,9
PROMEDIO	17451,39						

	1	9460	25	94,6	80,41	8,5	150	14:58,1
	2	9500	25	95	80,75	8,5	150	00:59,9
	3	9600	25	96	81,6	8,5	151	00:59,9
PROMEDIO		9520						
	1	6975	30	83,7	71,15	10,2	160	28:36,8
	2	6525	30	78,3	66,56	10,2	160	00:59,9
	3	6666,67	30	80	68	10,2	161	00:59,9
PROMEDIO		6722,223						
	1	5042,86	35	70,6	60,01	11,9	170	14:58,8
	2	4921,43	35	68,9	58,57	11,9	170	00:59,9
	3	4692,86	35	65,7	55,85	11,9	171	00:59,9
PROMEDIO		4885,717						
	1	3606,25	40	57,7	49,05	13,6	180	14:55,8
	2	3568,75	40	57,1	48,54	13,6	180	00:59,9
	3	3506,25	40	56,1	47,69	13,6	181	00:59,9
PROMEDIO		3560,417						

RESUMEN VISCOSIDADES		
TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (mPas)	VISCOSIDAD (g/cm*s)
80	797222,22	7972,22
90	281222,22	2812,22
100	160000,00	1600,00
110	90477,96	904,78
120	60566,67	605,67
130	30527,78	305,28
140	17451,39	174,51
150	9520,00	95,20
160	6722,22	67,22
170	4885,72	48,86
180	3560,42	35,60

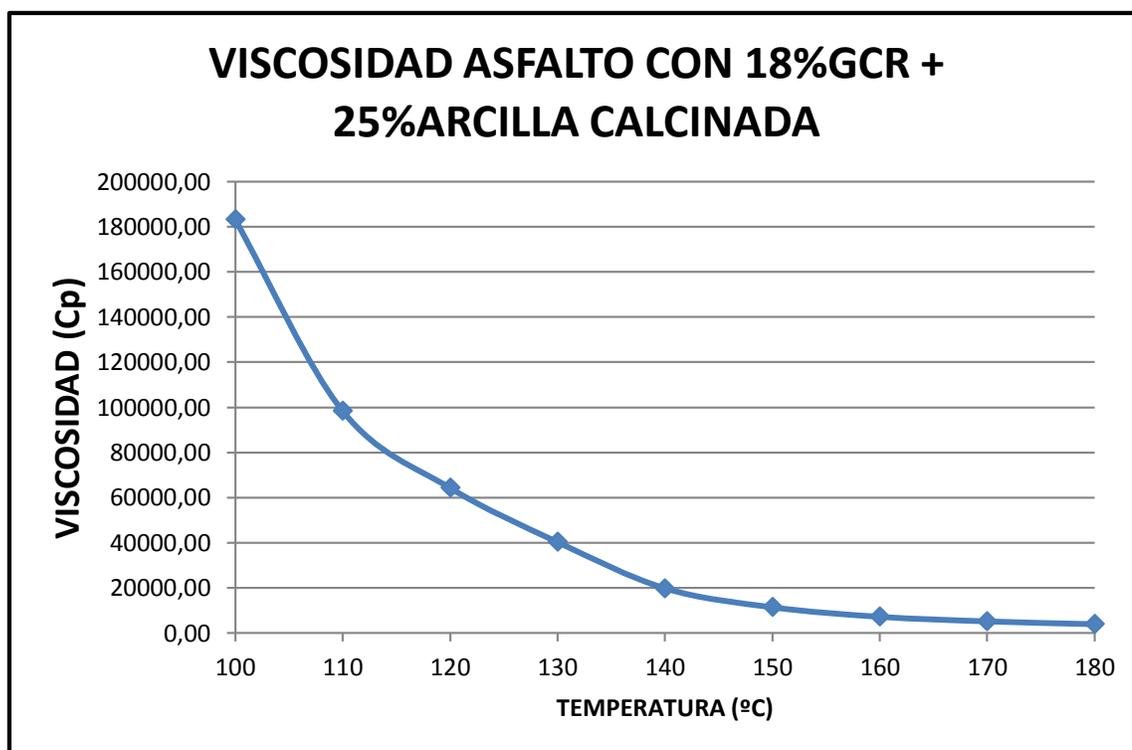


Viscosidad asfalto 80-100 + GCR + 25% Arcilla Calcinada.

TABLAS PROGRAMA WINGATHER							
#	Viscosidad (mPas)	Velocidad (RPM)	Torque (%)	S S (N/m ²)	S R (1/sec)	Temperatura (°C)	Intervalo de tiempo (mm:ss.t)
1	962000	1	96,2	240,5	0,25	80	01:00,5
2	931000	1	93,1	232,75	0,25	80,1	00:59,9
3	901000	1	90,1	225,25	0,25	80,1	00:59,9
PROMEDIO	931333,3						
1	333200	2,5	83,3	208,25	0,63	90	01:36,6
2	344800	2,5	86,2	215,5	0,63	90,1	00:59,9
3	338400	2,5	84,6	211,5	0,63	90,1	00:59,9
PROMEDIO	338800						
1	183500	8	82,8	207	2	100	01:17,8
2	183750	8	83	207,5	2	99,9	00:59,9
3	182500	8	83,6	209	2	100	00:59,9
PROMEDIO	183250						

	1	98450	20	96,9	242,25	5	110	01:00,6
	2	98430	20	96	240	5	110	00:59,9
	3	98420	20	95,3	238,25	5	110	00:59,9
PROMEDIO		98433,33						
	1	64400	35	85,4	213,5	8,75	120	00:47,9
	2	64228,57	35	88,3	220,75	8,75	120	00:59,9
	3	64314,29	35	92,1	230,25	8,75	120	00:59,9
PROMEDIO		64314,29						
	1	40175	10	92,7	78,8	3,4	130	01:58,6
	2	40750	10	91	77,35	3,4	130	00:59,9
	3	40075	10	95,5	81,18	3,4	130	00:59,9
PROMEDIO		40333,33						
	1	19850	25	98,5	83,73	8,5	140	01:00,5
	2	19850	25	98,5	83,73	8,5	140	00:59,9
	3	19820	25	98,2	83,47	8,5	140	00:59,9
PROMEDIO		19840						
	1	11180	25	83,8	71,23	8,5	150	05:58,6
	2	11580	25	85,8	72,93	8,5	150	00:59,9
	3	11520	25	85,2	72,42	8,5	150	00:59,9
PROMEDIO		11426,67						
	1	7188,89	45	93,4	79,39	15,3	160	01:09,2
	2	7144,44	45	92,6	78,71	15,3	160	01:00,0
	3	7266,67	45	94,8	80,58	15,3	160	00:59,9
PROMEDIO		7200						
	1	5195	50	63,9	54,31	17	170	07:57,3
	2	5145	50	62,9	53,46	17	170	00:59,9
	3	5140	50	62,8	53,38	17	170	00:59,9
PROMEDIO		5160						
	1	3890	50	57,8	49,13	17	180	07:56,3
	2	3930	50	58,6	49,81	17	180	00:59,9
	3	3940	50	58,8	49,98	17	180	00:59,9
PROMEDIO		3920						

RESUMEN VISCOSIDADES		
TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (mPas)	VISCOSIDAD (g/cm*s)
80	931333,33	9313,33
90	338800,00	3388,00
100	183250,00	1832,50
110	98433,33	984,33
120	64314,29	643,14
130	40333,33	403,33
140	19840,00	198,40
150	11426,67	114,27
160	7200,00	72,00
170	5160,00	51,60
180	3920,00	39,20



**ANEXO B.
MANUAL DE PROCEDIMIENTOS DEL VISCOSÍMETRO ROTACIONAL
BROOKFIELD.**

PRESENTACIÓN

Los ensayos de viscosidad rotacional describen el comportamiento reológico de las partículas, a través de las relaciones de temperatura, torque y velocidad radial, complementando el análisis de las propiedades físicas y la comprensión de los cambios de estado de la materia. Estos resultados son utilizados de manera útil para diversos estudios, como por ejemplo, controles de calidad debido a que los patrones de fluidez y consistencia son de carácter fundamental para asegurar la preservación y vencimiento de los productos. En los estudios del comportamiento de flujo también aportan gran importancia; ya que la evaluación directa de la procesabilidad de un líquido de alta viscosidad, requiere mayor energía de la bomba que la de una viscosidad baja, siendo un parámetro indispensable para el diseño de sistemas de bombeo y tuberías⁹⁴. Otro uso fundamental del parámetro de viscosidad se deriva en el área de asfaltos; debido a que con este resultado se obtienen la temperatura de mezclado y de compactación, necesarias para el diseño de mezclas asfálticas usadas en las vías.

Por estos y tantos motivos, es de gran importancia para la ejecución apropiada de los ensayos de viscosidad, conocer el procedimiento y el buen uso de los instrumentos que se requieren. De esta manera como valor agregado en la elaboración del proyecto *"Efecto de la arcilla calcinada en un asfalto 80/100 modificado con grano de caucho reciclado"*⁹⁵ se realiza este manual práctico, donde inicialmente se describen las partes del viscosímetro rotacional, explicando con detalle la función principal de cada una de estas. Se realizan consideraciones previas y se procede a explicar el montaje del equipo.

El manual contiene dos procedimientos diferentes para realizar el ensayo de viscosidad rotacional, empleando el viscosímetro Brookfield DV-II. En el primero se ofrece la posibilidad de programar y ejecutar el ensayo sin software del equipo, en el segundo se describe detalladamente la programación y ejecución a través del software, optimizando así la realización del ensayo.

⁹⁴ More Solutions to Stick problems. [online]. Brookfield. United States. December 2005. (System of access public).

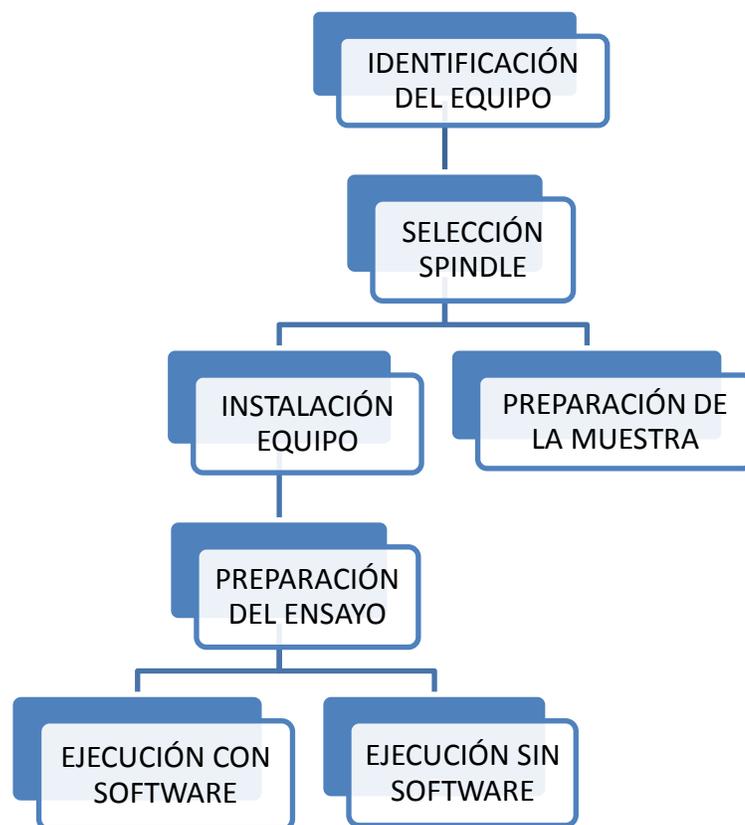
⁹⁵ Andrade, William y Murcia, Diego. Efecto de la arcilla calcinada en un asfalto 80/100 modificado con grano de caucho reciclado. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C. Universidad Piloto de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2013.

Se recomienda leer las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) a través de la norma *I.N.V. E – 717 – 07*⁹⁶, el manual del viscosímetro⁹⁷ y del controlador de temperatura⁹⁸.

OBJETIVO

Calcular mediciones de viscosidad de los materiales, a través de una metodología eficiente para la utilización del *viscosímetro Brookfield DV-II*.

Metodología



⁹⁶Método para determinar la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional. INVIAS. 2007

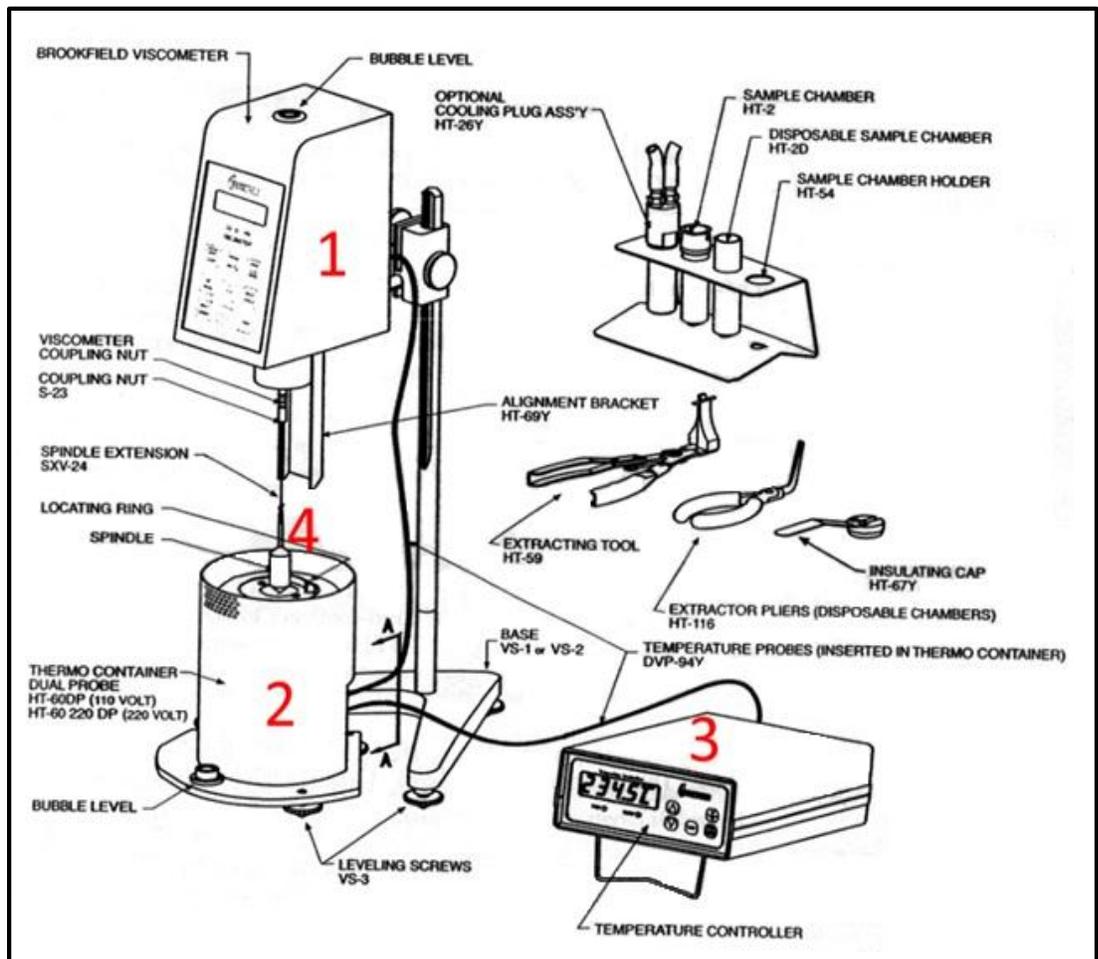
⁹⁷Operating Instructions. BROOKFIELD. Manual No.M/94 – 204 – G0107.

⁹⁸ Operating Instructions. BROOKFIELD. Manual No.M/02 – 207 – C0109.

INICIACIÓN EN EL MANEJO DEL VISCOSÍMETRO BROOKFIELD DV-II

Uno de los puntos de partida es tener en cuenta que el viscosímetro rotacional Brookfield calcula la viscosidad como una medida de la resistencia al flujo, involucrando la búsqueda de un torque necesario para vencer dicha resistencia al movimiento inducida por el spindle⁹⁹ (**).

Para su implementación es necesario conocer sus partes fundamentales:



Fuente: Manual No. M/94 – 204 – G0107

⁹⁹ More Solutions to Stick problems. [online]. Brookfield. United States. December 2005. (System of access public).

(**) Spindle: Husillo. Esta definición en español sugiere que es un tornillo sin cabeza, muy largo en relación a su diámetro.

1. Viscosímetro Brookfield: Aquí **se encuentra** el “Display” en donde se selecciona las diferentes opciones necesarias para la programación y ejecución de los dos métodos. Algunas de las opciones son:

FLECHA ARRIBA/ABAJO: esta tecla se utiliza para desplazarse hacia la dirección deseada (en un sentido cada vez mayor valor o en dirección valor decreciente) a través de la velocidad disponible, husillo y tablas del menú de opciones.

MOTOR ON / OFF / ESCAPE: Enciende o apaga el motor; *ESCAPE*, sale el menú Opciones, inicia y detiene la velocidad programada.

OPCIONES / TAB: Presenta el menú de Opciones, TAB, Alterna entre elementos seleccionables que indican

SELECT SPINDLE: Despliega los diferentes tamaños de husillos que puede usar. Para seleccionar determinado husillo oprima de nuevo.

SET SPEED: Despliega las velocidades del husillo.

SELECT DISPLAY: Permite visualizar los resultados como viscosidad, torque, temperatura, velocidad, entre otras.

2. Contenedor térmico: A través de una termocelda conserva la temperatura programada para la muestra.

La muestra se vierte en uno de los moldes que trae el viscosímetro en la cantidad especificada en manual del equipo, según el husillo seleccionado.

Como se puede observar en la figura consta de una burbuja de nivelación y perillas para ajuste de alturas.

Se recomienda realizar el ensayo en un lugar aislado de corrientes de viento, ya que puede afectar la temperatura de la termocelda.



el

3. Controlador de temperatura: A través de este aparato se controla la temperatura de la termocelda para todo el ensayo.

Consta de los siguientes botones:

PROG: Se oprime necesariamente para que reconozca que va empezar a programar en los diferentes puestos.

SET: Después de estar activado PROG, este botón sirve para pasar por todos los puestos (0 – 9). El número de puesto es el último número que se muestra al modificar la temperatura

Con el botón que se oprime en la figura se cambia de unidades de temperatura °C a °F y viceversa. Finalmente con el botón RUN/STBY se inicia y se detiene la ejecución de la programación establecida.

Manejo del Controlador de Temperatura

Este aparato es el que se encarga de subir o bajar la temperatura, de acuerdo a los tiempos programados para realizar el ensayo. Posee una programación diferente, en la que se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Consta de 10 puestos para programación de temperaturas en determinado tiempo. Permite también especificar en qué puesto inicia y termina la programación. De esta manera oprima “Prog” y a continuación “Set” y a través de las flechas se suben y bajan los parámetros.
- Constan de 2 unidades de programación de temperaturas °C y °F. El tiempo va en unidades de minutos.
- Cuando desee iniciar el ensayo, debe hacerlo al mismo tiempo que el programa del Viscosímetro, siempre dejando 0.2º por encima en la programación del controlador.

- Al programar los tiempos de las temperaturas, debe tener en cuenta los tiempos de estabilización y duración del cambio de cada temperatura. Regularmente este ciclo dura 15 minutos.

4. Extensión y husillo: Este viscosímetro puede tomar diferentes medidas de viscosidades empleando el mismo spindle a diferentes velocidades, pero a ciertas temperaturas es necesario hacer el cambio de spindle; debido a que cuando la temperatura se eleva, la muestra se hace más fluida y el torque empieza a disminuir, esto altera significativamente la medición de la viscosidad. Por ejemplo cuando tenemos una temperatura alta ($>120^{\circ}\text{C}$) y se usa un spindle de menor tamaño (SC4-29), el fluido o ligante tiende a tener las partículas más disueltas lo que ocasiona una menor resistencia al flujo sobre el área de contacto del spindle y se obtiene valores erróneos.

El siguiente cuadro ayuda a entender; tomando como ejemplo los tipos de asfalto, a qué temperaturas y volúmenes del ligante es adecuado cada spline.

Spindle	Temperatura (°C)	Tipo asfalto	Volumen muestra (ml)
SC4-21	>120	Sin modificar	7.1 - 8
SC4-27	60 a 200	Sin / Modificado	10.4 - 11
SC4-29	< 120	Modificado	13.5 - 14



Debido a que el enfoque de este manual es el conocimiento necesario para realizar el ensayo de Viscosidad, se recomienda que para conocer detalles

técnicos del aparato, consulte los manuales de operaciones citados anteriormente. Por otro lado, en cuanto se refiere a la realización del ensayo se recomienda las siguientes consideraciones:

- *Tomar el torque más cercano a 100, ya que a medida que sube al torque más alto se obtiene la medición más precisa de la viscosidad para cada temperatura*¹⁰⁰. Para esto se prueba varias velocidades en cada temperatura.
- No exceder la velocidad de 50 RPM ya que el torque puede bajar o simplemente el resultado se conserva igual. En el caso de que se obtenga un torque por debajo del 10% con una velocidad de 50 RPM, se procede a cambiar de husillo y repetir el ensayo¹⁰¹.
- Es necesario tomar 3 lecturas de 1 minuto para cada velocidad y temperatura constante.
- Para el cambio de velocidades, se recomienda esperar un tiempo de estabilización mínimo de 10 minutos en *0 RPM*.
- Para el caso de asfaltos, usar temperaturas entre 60° - 200° centígrados. Teniendo en cuenta que para asfaltos modificados, se recomienda que la temperatura inicial del ensayo sea de 80°C o superior dependiendo de la modificación. En estos casos se puede tener dificultad al introducir el Spindle en la muestra modificada, por tal motivo se recomienda elevar la temperatura hasta 110°C y proceder a disminuirla hasta la inicial.
- Para el cambio de temperaturas se recomienda conservar un tiempo de estabilización de 20 minutos sin velocidad en la temperatura a ensayar.
- Tomar intervalos de temperaturas máximo de 10°C, para observar mejor el comportamiento de la curva de Viscosidad vs Temperatura.

¹⁰⁰ More Solutions to Stick problems. [online]. Brookfield. United States. December 2005. (System of access public).

¹⁰¹ More Solutions to Stick problems. [online]. Brookfield. United States. December 2005. (System of access public).

MONTAJE DEL EQUIPO BROOKFIELD DV-II

Se arma el viscosímetro Brookfield DV-II con sus correspondientes accesorios como se presenta en la siguiente imagen:



1. Principalmente se estabiliza el equipo dejándolo totalmente en equilibrio, para ello se guía con las burbujas de nivel que se encuentran en la parte superior del equipo Brookfield DV-II y en la parte frontal de la base, donde están los tres tornillos para ajustar la altura del contenedor de temperatura.

2. Se coloca el contenedor de temperatura o termocelda en la parte inferior del viscosímetro, en donde se debe acoplar perfectamente para que el spindle o husillo pueda ser instalado sobre el eje vertical. Se recomienda colocar la varillita de cobre de berilio en donde se instala el spindle a una altura apta para que con la ayuda de la perilla se pueda ajustar la altura sin desacomodar la nivelación ya hecha. Finalmente se revisa la nivelación de nuevo como se realizó en el

paso anterior.

SI VA A OPERAR EL EQUIPO BROOKFIELD DV-II CON EL SOFTWARE DEBE TENER EN CUENTA LOS SIGUIENTES REQUERIMIENTOS Y ELEMENTOS:

Computador o portátil con unidad de disco duro interna: Es indispensable saber la información general del computador, es decir saber que Windows está operando sin importar la versión de 32 bits o 64 bits este utilizando, ya que es necesario instalar manualmente los programas para que el equipo *Brookfield DV-II* sea reconocido; de igual forma debe verificar si funciona en el computador los puertos de *USB* ya sea de 2.0 o 1.1, entre otros.

Unidad de CD-ROM: Es fundamental para descargar el software del equipo *Brookfield DV-II* y del cable *TU-S9*, si posee la unidad puede instalarlos directamente al computador , si no le funciona o no posee dicha unidad se recomienda copiar los software que sean necesarios en una memoria *USB* desde otro computador que tenga a su disposición la unidad de *CD-ROM*.

Cable TU-S9 marca TRENDNET: Este cable es el elemento más importante ya que permite la interacción entre el computador o el portátil con el equipo *Brookfield DV-II*. Dentro del CD que contiene este manual encuentra los diferentes drivers necesarios para el funcionamiento del software.

El siguiente cuadro corresponde a requisitos del sistema:

<i>Compatible con sistemas operativos</i>	<i>CPU</i>	<i>Memoria</i>
Windows 7 (32/64-bit)	1GHz o superior	1GB RAM o superior
Windows Vista (32/64-bit)	800MHz o superior	512MB RAM o superior
Windows XP (32/64-bit) / 2000 / ME / 98SE	300MHz o superior	256MB RAM o superior
Mac OS X (10.6)	CPU Intel	1GB RAM o superior
Mac OS X (10.5)	867MHz o superior	512MB RAM o superior
Mac OS X (10.4)	333MHz o superior	256MB RAM o superior
Mac OS X (10.1-10.3)	300MHz o superior	256MB RAM o superior

REALIZACIÓN DEL ENSAYO SIN SOFTWARE

De esta manera se realiza el ensayo sin tener necesidad de instalar ningún software, pero se realiza un ensayo a la vez por cada temperatura establecida. *En los Viscosímetros más avanzados como el DV-III este inconveniente es solucionado y permite realizar varias temperaturas en un solo ensayo.*

Programación

Lo primero que debe tener en cuenta antes de iniciar a ejecutar el ensayo, es la programación de las temperaturas que se requieren para observar el comportamiento de la viscosidad. Un rango podría ser de 80 a 180 °C por cada 10°C; por lo tanto tendría 11 valores de temperatura. Al tener establecidas las temperaturas procedemos a llenar el formato adjunto en el CD que posee la siguiente información:

PROGRAMACIÓN PARA ENSAYOS DE VISCOSIDAD ROTACIONAL							
PASO	TEMPERTURA (°C)	TIEMPO (minutos)	RPM	TORQUE (%)	VISCOSIDAD (1cP = 1 mPa x s)	SS	SR
0	80	20	0	0	0	0	0
1		1					
2		1					
3		1					
4	80	10	0	0	0	0	0
5		1					
6		1					
7		1					

Como puede observar en el formato, en la temperatura de 80°C inicia la estabilización en un tiempo de 20 minutos con 0RPM, después se procede a tomar 3 lecturas de viscosidad de 1 minuto cada una, con una velocidad constante. Cuando va a realizar el cambio de velocidad se procede a estabilizarse 10 minutos. De esta forma estaría acercándose a un torque más alto, tomando de 2 velocidades por cada temperatura.

Para cada valor de temperatura escoge una velocidad constante que muestre un buen torque (cercano a 100%). Se puede asegurar que la relación entre velocidad (0 - 50RPM) y torque, tiende a ser directamente proporcional, de acuerdo a esto se realiza una prueba desde 80°C con determinada velocidad, y para las siguientes temperaturas escoge una velocidad más alta; si y solo sí; no se cambia de spindle. En el momento que se cambia de spindle (>120°C) se repite el paso.

Ejecución

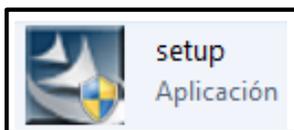
Regularmente es necesario ajustar valores al momento de programar para llegar a obtener más precisión. En la ejecución inicia por la estabilización ya descrita del aparato, seguido de los siguientes pasos:

- Al encender el viscosímetro debe estar la varillita sin ningún spindle o husillo para continuar con auto cero. Después de haber realizado el auto cero se coloca el husillo de acuerdo a las indicaciones y la programación ya establecida. Presiona una tecla para continuar.
- Oprima "OPTIONS" ubicado en el Display del viscosímetro. Aquí se busca la opción "TIME TO STOP". Al ingresar a esta opción puede indicar los 3 minutos que va a necesitar.
- Después oprima la tecla "TAB" que es la misma "OPTION" en este caso. Puede cambiar los segundos que requiera, y de la misma manera oprima de nuevo, saldrá para ingresar la velocidad. Recuerde haber programado el controlador de temperatura antes de empezarlo a ejecutar.
- Al haber realizado lo anterior, oprima "ENTER".
- Se va tomando 3 lecturas de viscosidad de 1 minuto cada una. Esto se repite para cada temperatura hasta finalizar lo programado.

REALIZACIÓN DEL ENSAYO CON SOFTWARE

El software que debe instalar para la realización del ensayo se llama Wingather V3.0, para su instalación se debe seguir los siguientes pasos:

Instalación del software Brookfield DV-II



El CD contiene un archivo de nombre Brookfield DV-II, y en el encuentra una serie de archivos, en donde solo se debe enfocar en el archivo setup de tipo aplicación.

Accediendo a esta aplicación sigue una serie de pasos para que la instalación del equipo Brookfield sea reconocida sin ningún problema, el programa de instalación carga completamente y refleja una ventana como lo presenta la imagen 1, en donde se oprime “siguiente”.

A continuación muestra una ventana, donde contiene cada uno de los programas que son requeridos, el siguiente paso se realiza para cada uno de los 10 elementos que se encuentran en la ventana, así:

Dar click en siguiente en el primer elemento denominado Wingather V3.0 en donde en la parte derecha se observa la descripción y el funcionamiento de la misma.

El programa carga y abre de nuevo una ventana, le solicita el código de contraseña para poder seguir con la instalación, en este paso ingresa el siguiente serial WG-03-020207-02A9 como lo presenta en la imagen 2 y luego se oprime “siguiente”.



A continuación aparece una ventana de confirmación de la contraseña y se oprime “siguiente” para dar paso a la instalación de la aplicación, seguida de una ventana aceptando las condiciones de uso del mismo como se presenta en la imagen 3, y se oprime “siguiente”.

Luego aparece otra ventana en donde solicita la información del cliente, como lo son el nombre del usuario y nombre de la organización, aquí puede digitar dichos requerimientos o dar click en siguiente omitiendo este pasó.

En la siguiente ventana que aparece, elige la primera opción que es completa y selecciona “siguiente”, aquí se muestra una ventana que da la opción de elegir la carpeta en la que se guarda la información de la instalación, por determinación aparece la siguiente dirección: C:\Program Files (x86)\BEL\Wingather32.

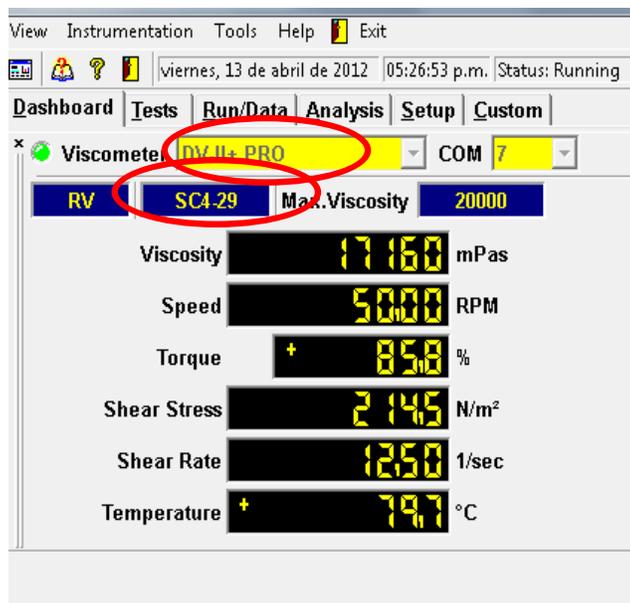
De esta forma inicia la instalación del programa con todos los parámetros determinados, luego se oprime finalizar; al dar click en la ventana se muestra instantáneamente una ventana que indica si desea instalar otra aplicación.

Luego de realizar todo lo anterior, busca el archivo para poder acceder al programa sin complicaciones; para ello se dirige a la dirección que seleccionó (C:\Program Files (x86)\BEL\Wingather32.) como se muestra en la imagen 4 y accede a la carpeta de nombre BEL, y dentro de la carpeta aparecen varios archivos, donde puede encontrar Wingather32. Al ingresar busca la aplicación que tiene el mismo nombre y oprime click derecho y envía esa aplicación como acceso directo al escritorio o al destino que desee, todo lo anterior teniendo en cuenta que se deja instalado el programa con las configuración predeterminadas.

PROGRAMACIÓN DE ENSAYO CON SOFTWARE

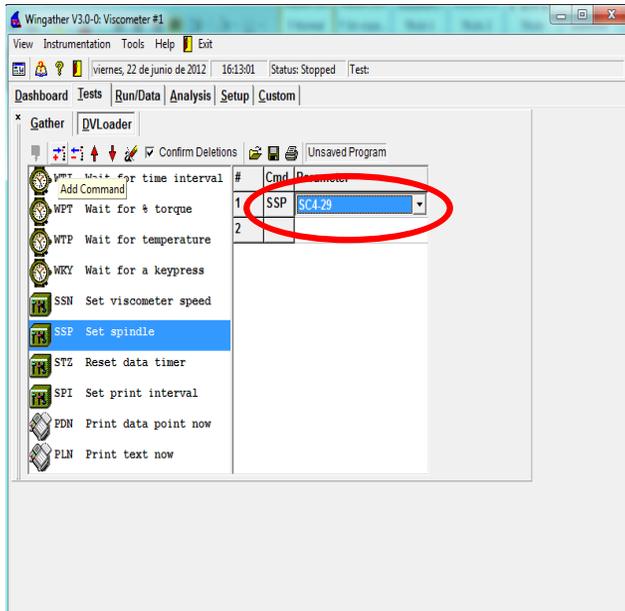
Antes de usar el programa hay que instalar el driver del cable que conecta el Viscosímetro Brookfield y el computador.

Para iniciar el programa accede a la aplicación Wingather haciendo doble click, a continuación aparece lo siguiente



Como se puede observar en la primera pestaña se reconoce el viscosímetro alumbrando la pantalla. En el caso de que no llegara a ser detectado el viscosímetro se cambia el "COM" hasta que sea reconocido

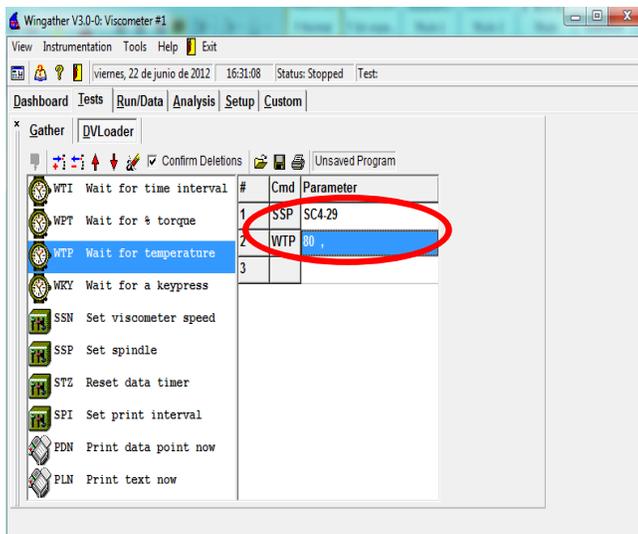
En esta imagen se observa el valor de la viscosidad en la temperatura de 79,7°C a una velocidad de 50RPM con un torque de 85,8%.



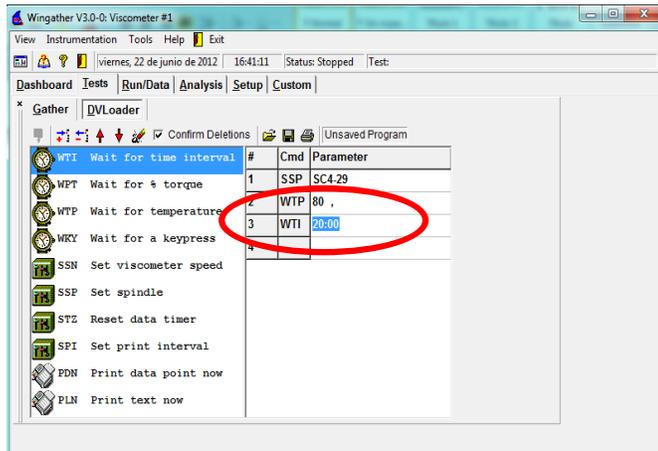
En el siguiente paso se procede a la pestaña “Test”, en donde se establece con comandos la programación requerida para el ensayo.

Señala la opción “SSP Set spindle”, este comando se utiliza para especificar el husillo que se va implementar. Se ubica en la barra inmediatamente superior y selecciona el botón “Add Comand”. El comando aparece en la columna de la derecha con una lista desplegable. Selecciona de la lista SC4 29, ya que para este ejemplo

se va a programar un asfalto caucho con arcilla calcinada al 5%.

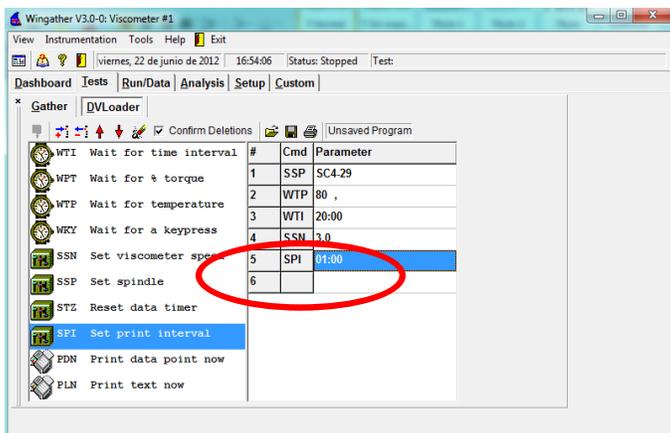


Se repite el paso anterior pero ahora señala la opción “WTP Wait for temperatura” y escribe de 80°C. Este comando está indicando que el programa espera hasta que la termocelda, a través del controlador de temperatura, llegue a 80°C



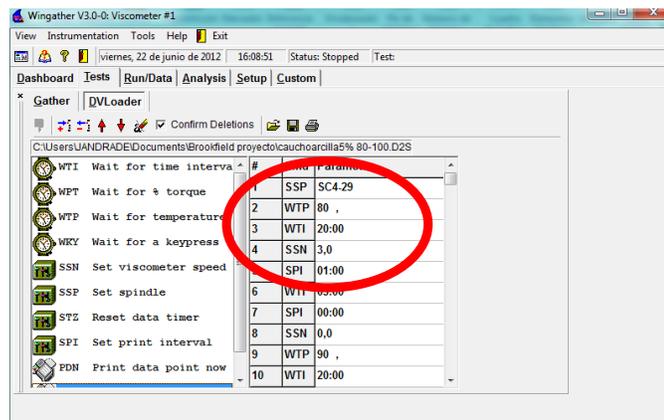
Se procede a añadir el comando “WTI Wait for time Interval” que indica que la muestra esta en reposo durante 20 minutos a 80 °C.

Se añade el comando “SSN Set viscometer speed” el cual indica la velocidad a la que el splinde o husillo va estar girando a 3RPM después de haber transcurrido los 20 minutos de estabilización.



El siguiente comando para añadir se llama “SPI Set printinterval” este comando indica cada cuánto tiempo se imprimen los datos en la tabla ubicada en la siguiente pestaña “RUN/Data”.

Se continua añadiendo de nuevo “WTI” de 3 minutos, es lo que dura el programa tomando lectura de 1 minuto a una velocidad 3RPM en una temperatura de 80°C.

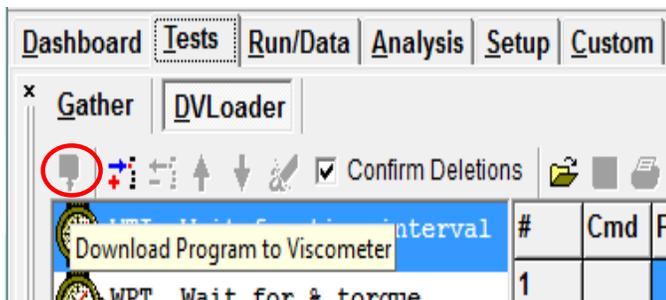


Para finalizar la programación de esta temperatura se adiciona el comando de “SPI y SSN” con valores de 0, ya que se necesita que no siga imprimiendo valores y quede de nuevo en reposo, para proceder a programar la temperatura de 90°C repitiendo los pasos anteriores.

EJECUCIÓN DEL ENSAYO CON SOFTWARE

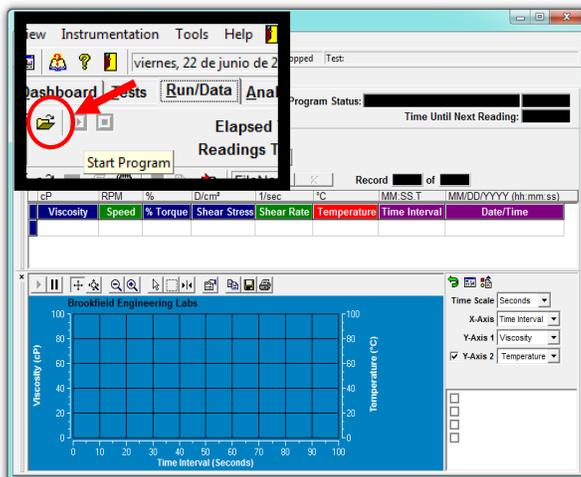
Después de haber guardado la programación de máximo 3 temperaturas, ya que es la cantidad máxima a la vez que permite realizar el viscosímetro. Se procede a oprimir en el display del viscosímetro, el botón “OPTIONS” y aquí selecciona la opción “DOWNLOAD A PROG” y se oprime “ENTER”, esta opción se usa para cargar un programa desde el computador.

Cuando se ingresa a esta opción en el display aparece “LOAD TO SLOT #1”, se oprime “ENTER” de nuevo. Este viscosímetro permite cargar hasta 4 programas.



Tan pronto se oprime ENTER en el display, inmediatamente en la pestaña “Test” se activa un botón llamado “Download Program to Viscometer”, a través de este botón se carga el programa al viscosímetro.

Al realizar este paso en el viscosímetro, se guarda el programa en el puesto que cargó.



Se procede a cargar un archivo temporal para la impresión de los datos mientras se ejecuta el programa. Está ubicado en la pestaña “Run/Data”. El botón llamado “Start Program”.

Aparece la opción de guardar este archivo, lo guarda con cualquier nombre y en cualquier ubicación, ya que al finalizar lo borra o ese mismo lo usa para todas las temperaturas.

Se ubica de nuevo en el display del viscosímetro y se oprime “OPTIONS – RUN A PROGRAM – RUN PGM SLOT#1”.

De esta manera corre el programa en el puesto que quedó cargado. Se debe tener en cuenta que se debe poner a correr al mismo tiempo el programa del viscosímetro y el del Controlador de temperatura.

Al finalizar el programa se guardan los datos obtenidos en la tabla de la pestaña "Run/Data" a través de la opción "Export Data", los datos quedan guardados como archivos de Excel. Se repite el proceso para las demás temperaturas, teniendo en cuenta que después de guardar los datos debe detener el programa que se ejecuta, incluyendo el archivo temporal.

Con esto culmina el manual, se espera que sea de gran ayuda y motivación para el buen uso de la tecnología y de esta manera se sugiere la adquisición de equipos más avanzados para la motivación a la investigación.

*EFECTO DE LA ARCILLA CALCINADA EN UN ASFALTO 80/100 MODIFICADO CON
GRANO DE CAUCHO RECICLADO*

WILLIAM ANDRADE*, DIEGO MURCIA

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA, BOGOTÁ-COLOMBIA

Resumen

La implementación de residuos sólidos inorgánicos en proyectos de ingeniería son objetos constantes de múltiples investigaciones que fomentan la conciencia del reciclaje para una solución al problema ambiental generado por el consumo y crecimiento urbano. Colombia cuenta con diversos espacios geográficos y culturales que convierten los proyectos de ingeniería en un reto arduo y constante donde el ingenio reluce en las soluciones prácticas y a veces improvisadas para los problemas de ingeniería. Este proyecto presenta un estudio comparativo de las características físicas y reológicas de una muestra de asfalto 80/100, modificada con un porcentaje óptimo de grano de caucho reciclado, e implementando como llenante mineral del ligante, diferentes porcentajes de arcilla calcinada. Para la caracterización física se realizan ensayos de penetración, punto de ablandamiento, índice de penetración, stripping y adherencia en bandeja. Para la caracterización reológica se realiza el ensayo de viscosidad rotacional Brookfield. Conocer la condición inicial de los residuos sólidos es de gran importancia, ya que de esta manera se puede determinar qué tipo de materiales se emplean en la modificación, y cómo cambian su estructura morfológica y composición química natural, debido a la transformación como residuos; para este fin se realizaron fotografías microscópicas de barrido electrónico (SEM).

Palabras claves: Asfalto, características físicas, residuos sólidos, estructura morfológica, composición química.

PHYSICAL CHARACTERIZATION AND RHEOLOGICAL CONVENTIONAL ASPHALT
MODIFIED WITH A GRAIN OF RECYCLED RUBBER AND CALCINED CLAY

Abstract

Implementation of inorganic solid waste engineering projects are constant objects of multiple investigations that promote awareness of recycling for a solution to the environmental problem caused by eating and urban growth. Colombia has diverse geographical and cultural engineering projects become an arduous and constant challenge where wit shines in practice and sometimes improvised solutions to engineering problems. This design presents a comparative study of the physical and rheological characteristics of a sample of asphalt 80/100, modified with an optimal percentage of recycled rubber grain, implemented as a mineral filler and binder, different percentages of calcined clay. For physical characterization penetration tests

*Proyecto de investigación formativo llevado a cabo por estudiantes del Programa de Ingeniería Civil de la Universidad Piloto de Colombia. Participan como investigadores principales los estudiantes de Ing. Civil de la Universidad Piloto de Colombia: Andrade, J.; Murcia, D.; asesorados por el docente Gilberto Martínez Arguelles. Correo electrónico: gibemarti@gmail.com .

are performed, softening point, penetration, adhesion and stripping tray. For rheological characterization is performed Brookfield rotational viscosity assay. Knowing the initial condition of the solid waste is of great importance, since this way it can be determined what materials are used in changing and how they change their morphological structure and chemical composition of natural, because the processing as waste, for this aim is realized scanning electron microscopic photographs (SEM).

Keywords: Asphalt, physical, solid waste, morphological structure, chemical composition.

INTRODUCCIÓN

El asfalto es uno de los materiales más usados en la construcción de vías urbanas y carreteras; sin embargo a pesar de la cantidad de investigaciones y estudios que se han realizado (Romero & Gomez, 2002), sigue siendo incomprendido en el campo práctico de la ingeniería en Colombia, debido a sus particulares propiedades físicas, reológicas y de composición química. En los proyectos viales se reflejan deficiencias posteriores, como por ejemplo, fisuramiento a temprana edad del pavimento, desprendimiento de partículas de agregado, mala adherencia asfalto-agregado y ahuellamiento (Arenas, 2009).

Por otro lado el crecimiento urbano e industrial desmedido, ha generado problemas medioambientales de gran incidencia en la sociedad actual. El descuido de la disposición y acumulación de los residuos sólidos, concibe la necesidad de implementar el reciclaje para la mitigación de la problemática en cuestión. Uno de los casos que podemos encontrar son las llantas que se desechan diariamente, ya que a pesar de que existe la normatividad para tratar de controlar la situación (El tiempo, 2011), no se aplican controles rigurosos y efectivos, como se puede evidenciar en el Valle de Aburrá (El colombiano, 2013) y otros tantos

lugares del territorio colombiano. Otro de los casos para mencionar es el de la arcilla calcinada proveniente de la fundición del ladrillo; este residuo sólido se encuentra en tamaños entre 1 a 10 μ y debido a esto pueden llegar a provocar infecciones respiratorias (Aracelly, 2006), de igual manera si es vertido en las fuentes hídricas de abastecimiento de la población, se convierte en agente infeccioso de enfermedades (Siñani & Mancilla, 2006), ya que posee un bajo índice de renovación, genera una alta permanencia y acumulación en el suelo (Universidad Nacional de Colombia, 2008).

En este marco general sobre las deficiencias del asfalto y la contaminación producida por los residuos sólidos industriales mencionados, se plantea la modificación del asfalto con grano de caucho reciclado de la llanta, y la utilización de la arcilla calcinada como llenante mineral, para observar un cambio en las propiedades físicas y reológicas del ligante.

El estudio de asfaltos modificados es un tema que ha sido motivo de múltiples investigaciones y la utilización del grano de caucho reciclado es uno de los casos que ha sido trabajado para el diseño y ejecución de vías en Colombia. El Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), a través de la especificación *ET-GE-002*

formuló la utilización de este material como agente modificador en las mezclas asfálticas en caliente (IDU, 2011). La cantidad de llanta adicionada al asfalto determina sus características físico-químicas y, por ende, el desempeño de las mezclas asfálticas elaboradas con este ligante. Entre tanto el tamaño de partícula de la llanta, cuando son añadidos al asfalto como modificadores, influyen directamente en la homogeneidad estructural del ligante y, por ende, determinan la compatibilidad y estabilidad de las fases del ligante modificado (Figueroa; Fonseca & Reyes, 2009).

La arcilla calcinada a diferencia del GCR, no ha sido regularizada por parte del sector público, debido a que su implementación como llenante mineral en el asfalto caucho no es común. Sin embargo la aplicación de las arcillas como filler genera un comportamiento mejorable en la rigidez, ya que forman las cadenas de enlace del asfalto modificado fortaleciendo las propiedades físicas y mecánicas (El-Shafie; Ibrahim & Abd El Rahman, 2012). El efecto de los asfaltos modificados con este filler es menos susceptible a los cambios de temperatura alta y también puede ser más resistente a la deformación plástica (ahuellamiento) en comparación con el asfalto sin modificar (El-Shafie; Ibrahim & Abd El Rahman, 2012).

De tal manera y de acuerdo a lo anterior, en esta investigación se utilizó un asfalto 80/100, se modificó con 18% p/p de GCR siguiendo la especificación ET-GE-002, y adicionalmente se agregó la arcilla calcinada en diferentes proporciones (5%, 10%, 15%, 20% y 25% p/p) siguiendo la especificación 400-07 de INVIAS para llenantes minerales.

Después de realizar la preparación de las muestras, se realizaron ensayos de caracterización física y reológica, para determinar un porcentaje óptimo de aplicación de la arcilla calcinada. Se analizó el cambio del comportamiento a través de los ensayos de penetración, punto de ablandamiento, índice de penetración, stripping, adherencia en bandeja y viscosidad Brookfield. Adicionalmente para determinar una condición inicial de cada uno de los residuos sólidos implementados (GCR y arcilla calcinada), se realizaron fotografías microscópicas de barrido electrónico (SEM) analizando su morfología y composición química.

Finalmente se realizó un análisis comparativo de los resultados obtenidos de los diferentes porcentajes de adición de los diferentes porcentajes de adición del filler, con la muestra de asfalto caucho al 18% P/P y el ligante sin modificar.

MATERIALES Y ELABORACION DE LA MEZCLA

Modificación de asfalto

El proceso en la modificación del asfalto se fundamentó en la mezcla del GCR (18% p/p) y arcilla calcinada (5%,10%,15%, 20% y 25% p/p), a una temperatura elevada (155 a 170 °C), durante un determinado tiempo (30 a 120 min). Esa mezcla reacciona y forma un compuesto filler/asfalto-caucho.

El grado de modificación para estas muestras depende de varios factores como el tamaño de los agentes modificadores, la temperatura y tiempo de reacción, la energía mecánica durante la mezcla, logrando que estos materiales modifiquen la mezcla mejorando el desempeño de los asfaltos en sus propiedades físicas y reológicas

(Figueroa; Fonseca & Reyes, 2009). Para modificar el asfalto se debe seguir los siguientes pasos:

Preparación de la muestra

El polímero empleado para la realización de esta investigación fue el grano de caucho reciclado proveniente de automóviles, el cual pasó por un proceso de molienda para obtener la granulometría apropiada. Este proceso de trituración y tamizado (pasa tamiz No 40) se realizó antes de ser incorporado al asfalto, en el cual se obtienen superficies con irregularidades superficiales muy bajas. La arcilla se extrae de la calcinación del ladrillo, el polvillo que queda de esta fabricación es tamizado (pasa tamiz No 200) y usado como llenante mineral en estos ensayos.

Los materiales se utilizaron de acuerdo a la especificación del IDU en donde describe el tipo de asfalto y de grano de caucho con que debemos trabajar. De acuerdo con esta especificación se tomó el 18% de caucho pasante tamiz 40 y asfalto 80/100 proveniente de Barrancabermeja. Para el caso de la llenante mineral usamos arcilla calcinada en diferentes proporciones.

El asfalto se modificó utilizando una mezcladora eléctrica. Se realizaron pruebas preliminares de penetración y punto de ablandamiento, tanto al ligante sin modificar como a los modificados, con el fin de obtener patrones comparativos y mejorar las condiciones del funcionamiento de la mezcladora en cada modificación.

Se calentó el asfalto entre 155°C y 170°C durante 20 minutos para estabilizar la temperatura. Ya pasado el tiempo de estabilización se mezcló la cantidad de grano de caucho hasta obtener una mezcla

homogénea y posteriormente se añadió el porcentaje del filler hasta obtener nuevamente una mezcla homogénea.

El mezclado se realizó durante un tiempo estimado de 1.5 horas, conservando una velocidad constante de 350 rpm según las especificaciones.

Posteriormente se vertió el ligante modificado en los recipientes adecuados para dar inicio a los ensayos. Se tuvo en cuenta que si la mezcla de asfalto caucho no es usada dentro de las primeras cuatro horas después del tiempo de reacción (después de mezclada), y no se mantuvo almacenada a una temperatura superior a 155°C, se habría pasado un ciclo de calentamiento. El número total de ciclos de calentamiento no debe ser mayor de dos. Mientras la mezcla asfalto-caucho este almacenada a altas temperaturas se debe mantener en agitación constante para evitar separación del GCR y el cemento asfáltico. En el caso de que se use más de dos ciclos los resultados de los ensayos pueden variar, debido al envejecimiento de la mezcla (IDU, 2011).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Penetración

Teniendo en cuenta que se obtuvieron 63 datos en total se calcularon los promedios para cada muestra y de esta manera en la tabla 1 se expresaron los resultados de la penetración que tiene el asfalto, el asfalto-caucho y las diferentes adiciones de arcilla calcinada. Se determinó que la muestra control o sin ninguna modificación arrojó un valor de 84.77 (mm/10) siendo la mayor penetración alcanzada.

Tabla 1. Promedio de los resultados de penetración.

PENETRACIÓN (mm/10)		
MUESTRA	PORCENTAJE DE ADICIÓN	PROMEDIO
1	SIN MODIFICAR	84,77
2	18% GCR	56,23
3	18% GCR + 5% AC	54,77
4	18% GCR + 10% AC	53,48
5	18% GCR + 15% AC	52,5
6	18% GCR + 20% AC	50,61
7	18% GCR + 25% AC	48,18

La utilización del grano de caucho reciclado ayudo a mejorar las condiciones de esta propiedad, disminuyendo la penetración significativamente obteniendo un valor de 56.23 (mm/10), así mismo, este valor indicó que la mezcla se realizó adecuadamente ya que se encuentran entre los valores establecidos por la especificación *ET-GE-002* para esta propiedad, donde los resultados de penetración están estipulados entre los 40 mm/10 y 70 mm/10.

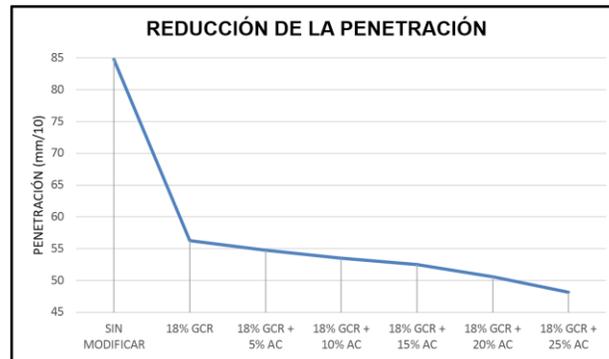
El comportamiento físico que tiene el caucho sobre el ligante, en cuanto a la resistencia a la penetración, mostró una mejora significativa ya que las partículas de caucho actúan como poros dentro la mezcla, de acuerdo con el artículo publicado en la revista de la facultad de ingeniería universidad central

de Venezuela (Albano, Camacho, Hernandez, Bravo & Guevara, 2008), se evaluó el comportamiento del GCR de diferentes tamaños en una mezcla de concreto y los resultados indicaron que los especímenes con caucho mostraban una alta capacidad para absorber la energía plástica. Dichas probetas ensayadas soportaron cargas post-fractura y manifestaron desplazamientos significativos, los cuales son parcialmente recuperables. Por esta razón el grano de caucho reciclado tiene la habilidad de experimentar grandes deformaciones elásticas antes de la falla (Topcu & Avcular, 1997).

De igual forma la mejora en esta propiedad se debe a un incremento en el contenido de aire con la concentración de caucho (Arguelles, 1980), así como a la existencia de enlaces interraciales débiles entre la pasta de cemento y el caucho recuperado (Alvarez & Alvarez, 1985).

Se presentaron también los resultados que se obtuvieron de las muestras al aumentar las adiciones de la arcilla calcinada y se analizó que mejoró la consistencia de esta propiedad; ya que para cada incremento de porcentaje, se observó una disminución en la penetración. De esta manera se denotó una reducción en la penetración del 33,7% al utilizar el GCR. Cuando se usó el 5% - 10% - 15% - 20% - 25% p/p de arcilla calcinada se denotó una reducción del 35,4% - 36,9% - 38,1% - 40,3% - 43,2% respectivamente.

Figura 1. Reducción de la penetración con los diferentes porcentajes de adición de arcilla calcinada.



Por lo anterior se determinó que en cuanto sea mayor la utilización de la arcilla calcinada como llenante mineral va a ocasionar una mejora notable en la consistencia de la mezcla asfáltica, por esta razón se pudo constatar que el porcentaje óptimo de la llenante mineral es de 25%. (Ver figura 1)

En cuanto al comportamiento físico que tiene la arcilla calcinada según el estudio de la adición de arcillas calcinadas en la durabilidad de hormigones (Castillo, Antoni, Alujas, Scrivener & Martinera, 2011), debido a la alta finura alcanzada por la adición de este filler reduce la porosidad capilar del material, destacándose el suelo arcilloso calcinado con una disminución de más del 20% respecto a la referencia de cemento puro a los 28 días. Al parecer, la alta finura de esta puzolana influye en la estructura interna de poros capilares, lo cual provoca una mayor impermeabilidad respecto al resto de los microhormigones fabricados.

Punto de Ablandamiento

Se logró evidenciar que la temperatura del punto de ablandamiento del asfalto 80/100 sin modificar fue de

47,2°C, cumpliendo con los parámetros de un asfalto convencional.

Para la mezcla asfalto caucho la temperatura aumentó considerablemente hasta llegar a 52,5°C. El comportamiento físico que tiene el caucho mejoró notablemente esta propiedad ya que las partículas pequeñas se ubican en los intersticios o huecos dejados por las partículas grandes. Esto significa que existen menos espacios vacíos en la mezcla (Albano, Camacho, Hernandez, Bravo & Guevara, 2008), lo cual influye en la plasticidad y compatibilidad de la misma, afectando la trabajabilidad y la resistencia mecánica, es decir, mejorando en forma significativa esta propiedad. De esta manera el caucho presenta componentes elásticos y viscosos, lo cual conlleva a que su deformación a altas temperaturas sea relativamente baja; es decir; cuando se calientan las mezclas asfálticas a una temperatura vítrea, el material experimenta una transformación gradual, desde el estado sólido elástico blando al líquido viscoso (Barrietos, 2010). Logrando de esta manera el aumento en la rigidez a altas temperaturas de servicio y mejorando la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación permanente.

Las mezclas con las diferentes adiciones del filler reflejaron también un aumento en la temperatura del punto de ablandamiento, obteniendo temperaturas entre 54°C y 59°C. En cuanto al comportamiento físico que tiene la arcilla calcinada, se analizó que influye en la estructura interna de poros, de igual forma favorece el proceso de hidratación y de su baja conductividad térmica por su composición química, ya que en su estado físico sólido puede compartir o adquirir calor por conducción, esto hace que sus partículas adquieran u otorguen energía estando en contacto con otras de otro material. Ya sea en su estado de arcilla seca o húmeda, así como en su estado de material cocido o cerámico, se le considera material termo-aislante por su baja capacidad de conducción de calor lo que produce una resistencia notoria a las variaciones de temperatura, todas las arcillas tienen esta propiedad pero algunas las presentan en mayor grado, esto debido al contenido químico de alumina y sílice, entre más alto sea el porcentaje de estos compuestos mayor serán sus propiedades (TUNA, 2011).

Los resultados que se obtuvieron, en donde se pudo evidenciar los promedios de las temperaturas para cada una de las muestras:

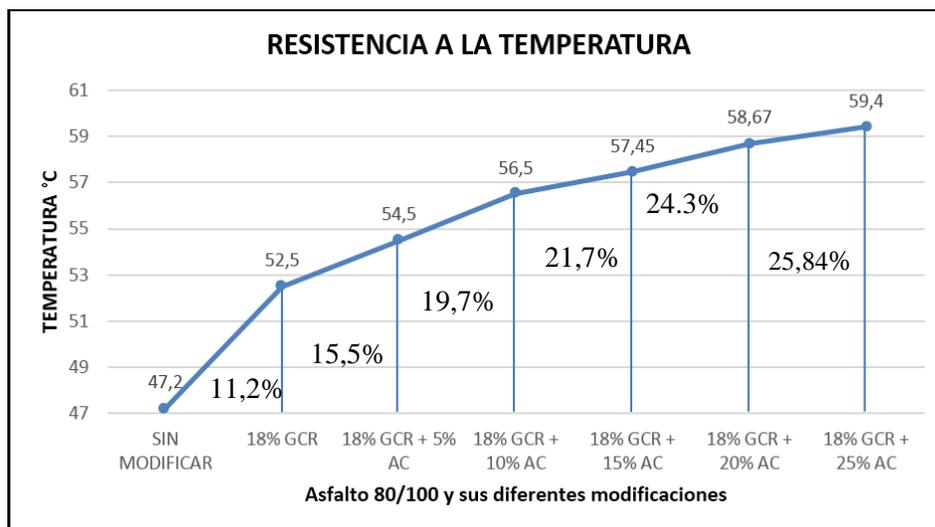
El aumento en la temperatura del punto de ablandamiento cuando se agregó el GCR fue de 11,2%. Después de haber adicionado el 5% - 10% - 15% - 20% - 25% p/p de arcilla calcinada aumentó en 15,5% - 19,7% - 21,7% - 24,3% - 25,84% respectivamente.

En la figura 2 se reflejó que a medida de que se añade el GCR y los porcentajes de la llenante mineral, el aumento de temperatura se elevó mostrando que la arcilla calcinada ayudó controlando la vulnerabilidad a altas temperaturas. Por esta razón se logró demostrar que el porcentaje óptimo de la llenante mineral es de 25%.

Índice de Penetración

Se determinó el índice que describe la susceptibilidad térmica en las modificaciones del asfalto, basándonos en los ensayos de penetración y punto de

Figura 2. Cambio de temperatura de ablandamiento del asfalto con diferentes porcentajes de adición de arcilla calcinada.



ablandamiento, aplicando la fórmula que se indica en la respectiva norma.

Los resultados que se obtuvieron de los ensayos de penetración y punto de ablandamiento estimando el índice de penetración de las diferentes muestras se presentan en la Figura 3.

Se analizó que el comportamiento que asumió el ligante y las respectivas modificaciones para esta propiedad, presentando una mayor resistencia a la deformación permanente; es decir mayor oposición por parte de las partículas, a la alteración inducida por aumento de la temperatura.

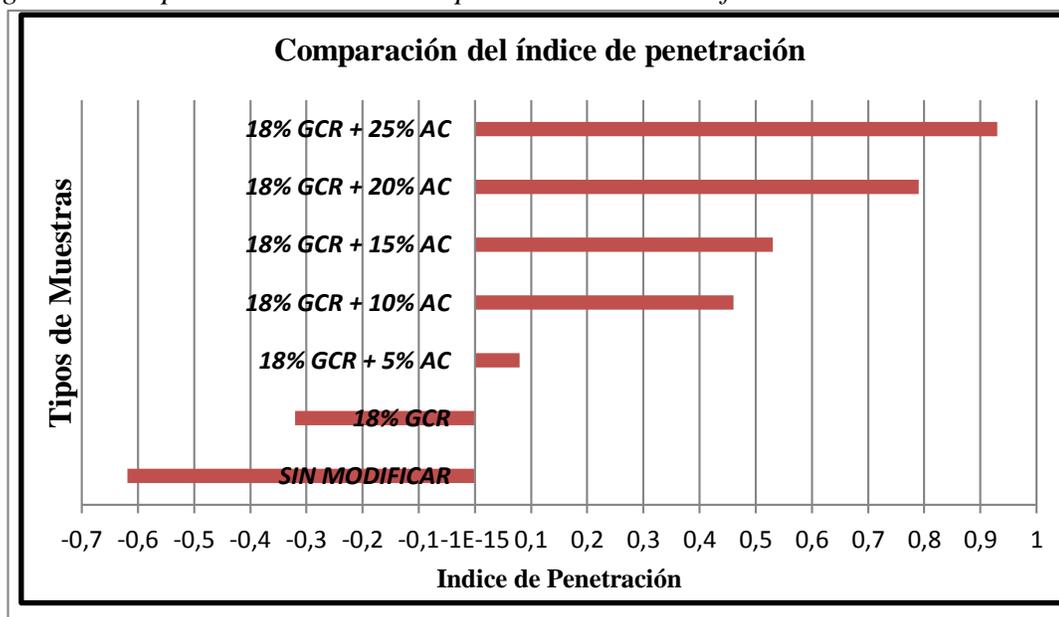
Se analizó que la muestra patrón y la muestra modificada con grano de caucho reciclado presentaron valores por debajo de 0; por el contrario, cuando se añadió los porcentajes de adición de arcilla calcinada se obtuvo valores de índice de penetración superiores a 0, logrando considerar que uno de los efectos de este filler en los asfaltos modificados es la reducción de la

sensibilidad a los cambios de temperatura alta y aumento en la resistencia de la deformación plástica (ahuellamiento) (TUNA, 2011).

Debido a que la modificación de asfalto caucho con 25% p/p de arcilla calcinada reflejó mayor rendimiento respecto a la susceptibilidad térmica se establece como porcentaje óptimo. Convirtiéndolo en una mezcla recomendable para la construcción y repavimentación de vías en condiciones calurosas

Comparando los resultados obtenidos con otros estudios se demuestra que el uso de la arcilla calcinada en mayores proporciones mejoran esta propiedad, por lo que se puede deducir que el material asfáltico con presencia de llenante mineral de arcilla presenta propiedades más estable a elevaciones de temperatura, lo que favorece la no deformabilidad excesiva a temperaturas elevadas (Romero & Sanchez).

Figura 3. Comparación del índice de penetración de las diferentes muestras.



Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua (Stripping)

Este ensayo presentó el efecto que tiene la arcilla calcinada en una mezcla asfalto-caucho siendo la película que cubre el agregado en presencia del agua. Se realizó el estudio a la muestra control evaluando que el 60% de los agregados mostraron desgaste en las esquinas considerando que hay influencia sobre el ligante asfáltico en el fenómeno de Stripping. Es decir, el comportamiento que tiene el agua sobre la película de asfalto 80/100 en los agregados provocó la separación en los extremos de los agregados.

Los efectos del Stripping en muestras de asfalto con 18% p/p caucho reciclado, no presentaron ningún desgaste por el efecto del agua, esto quiere indicar que la mezcla favoreció los agregados cubriéndolos satisfactoriamente.

El comportamiento físico que tiene el caucho frente a la película que cubre el agregado en presencia del agua, es el aumento de la cohesión que se generó en la atracción entre las moléculas que se mantuvieron unidas mientras se encontraban en su estado visco-elástico, siendo así que la mezcla cubra los agregados pétreos y al ser sometida al agente externo (agua) no modifique sus propiedades de cohesión. Por tal motivo no se presentó debilitación en la junta adhesiva y se evitó el fallo frente a esfuerzos mecánicos (Madrid, 2013).

La adición del 5% de la arcilla calcinada provocó que un 7% de los agregados fueran afectados por la presencia del agua, ya que se manifestó el

desgaste del ligante en las esquinas de estos agregados. Este resultado tal vez insinuó que la conexión de la mezcla y los agregados llegó a desprenderse ya que el material pétreo presentó un cambio de volumen por la presencia del agua generando la contracción de la mezcla.

Los resultados obtenidos al agregar el 10%, 15%, 20% y 25 % de arcilla calcinada al agregado, fueron una mejor adherencia entre las partículas y película de la mezcla impidiendo que se generara el efecto stripping. Esto quiere decir que la utilización de este filler a mayores porcentajes de adición proporcionó mejores propiedades entre la lámina de asfalto y el agregado grueso.

El comportamiento físico que tuvo la arcilla calcinada en el asfalto modificado fue mejorar las condiciones entre el agregado pétreo y la mezcla en presencia del agua, ya que estos minerales arcillosos presentan un tamaño reducido de partícula, y presencia de carga en su superficie, lo cual le otorga propiedades físico - químicas muy particulares como la retención y liberación de moléculas orgánicas e inorgánicas, logrando tener la capacidad para mantenerse dispersas o reunirse en agregados voluminosos (hinchamiento). De esta manera la finura de este filler influye en la estructura interna de poros de la mezcla asfáltica, lo cual provoca una mayor impermeabilidad: La adición de arcilla calcinada favorece la formación de fases hidratadas más estables (Lopez, Hernandez, Horta, Coronado & Castaño, 2010)

La actividad superficial de los minerales de la caolinita es pequeña. Están formadas por una lámina silícica y

otra aluminica. La unión entre todas las retículas es lo suficientemente firme para no permitir la penetración de moléculas de agua. La forma de los granos también es plana o escamosa pero la caolinita no absorbe agua en su estructura molecular, Por lo anterior, los minerales de caolinita pura no presentan el efecto de la expansión al contacto con el agua o fuerte contracción al secarse (Zeevaert, 1997)

De acuerdo con los resultados analizados en la tabla 4 se evidenció el comportamiento del ensayo de Stripping, en donde se indicaron los porcentajes de área cubierta del ligante con el agregado y su efecto con el agua.

Tabla 4. *Resultados del ensayo de Stripping.*

CUBRIMIENTO DE LOS AGREGADOS CON MATERIALES ASFALTICOS EN PRESENCIA DEL AGUA.	
MUESTRA	ESTIMADO DE ÁREA CUBIERTA
Asfalto 80/100	Inferior al 95 %
Asfalto 80/100 con GCR	Superior al 95 %
GCR + 5% Arcilla Calcinada	Inferior al 95%
GCR + 10% Arcilla Calcinada	Superior al 95%
GCR + 15% Arcilla Calcinada	Superior al 95 %
GCR + 20% Arcilla Calcinada	Superior al 95%
GCR +25% Arcilla Calcinada	Superior al 95%

Adherencia en bandeja

Este ensayo estudió el efecto de la arcilla calcinada en diferentes proporciones en el asfalto caucho, analizando el porcentaje de adherencia en agregados gruesos. Los resultados para una muestra control presentaron una

adherencia baja ya que hay poca presencia del ligante en el agregado.

Para la muestra con adición de GCR hay un aumento considerable en esta propiedad, mostrando que el asfalto modificado con GCR fortaleció la consistencia, proporcionando mayor cantidad de esta mezcla adherida al agregado grueso.

El comportamiento físico que tiene el caucho modificado, es debido a su comportamiento visco-elástico y por la adición de resinas de hidrocarburos logrando una mayor tack; es decir logrando que la adherencia forme un enlace entre la mezcla asfáltica con el agregado pétreo. La adherencia responde a las fuerzas de deformación de una manera determinada tanto en la unión como en la separación, por lo tanto el comportamiento visco-elástico proporciona un mayor agarre (Royo, 1989)

En las muestras con la adición del 5%, 10% y 15% de arcilla calcinada se logró presenciar mayor conexión sin conseguir la adherencia total de la mezcla, descartando la idea de que podría ser la morfología del agregado ya que se fijaba con la mayor superficie plana posible. La muestra con el 20% de arcilla calcinada evidenció un mayor aumento en la adherencia, logrando recubrir más la superficie expuesta.

Las muestras con el contenido del 25% de arcilla calcinada revelaron una adherencia superior a las demás muestras analizadas, encontrando que la superficie de los agregados en contacto con la mezcla se unió totalmente, sin dejar rastro de alguna parte faltante.

La ganancia de adherencia para cada muestra permitiendo inferir que el

ligante modificado con el 18 % de grano de caucho reciclado y el 25% de arcilla calcinada lograron obtener un comportamiento considerable en estas propiedades, ya que los agregados obtuvieron mayor adherencia que las demás muestras.

En cuanto al comportamiento físico que tiene la arcilla calcinada es proporcionada por la cohesión ya que permite que exista una adherencia entre las partículas debido a la tracción entre ellas en virtud de las fuerzas moleculares internas (Universidad de la Republica, 2004). Las principales características físicas de este filler dependen principalmente de la distribución del tamaño de las partículas en la mezcla asfáltica. Las arcillas dependen de la adherencia del tipo stiction (fricción estática) y la plasticidad, propiedades que están asociadas con su composición mineralógica y su contenido de humedad, y también de su textura natural o macro estructura. Por tanto, la fracción glandular de un depósito de suelo se clasifica de acuerdo con su distribución de tamaños de las partículas, en tanto que la fracción arcillosa se clasifica de acuerdo con sus características de plasticidad con los parámetros conocidos como límites de Atterberg (Campos, Gomez & Torres, 2006).

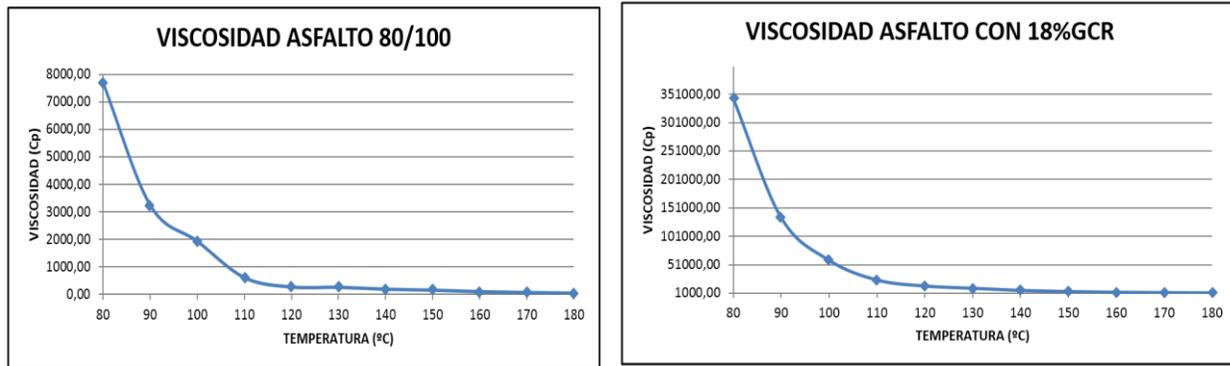
Viscosidad Rotacional

Se realizó este ensayo para obtener la resistencia que opone el asfalto-caucho con los diferentes porcentajes de la arcilla calcinada al movimiento del rotor.

La Figura 4 presentó la curva reológica obtenida del asfalto convencional sin modificación, en donde se pudo visualizar desde los 80 °C hasta los 180 °C, el comportamiento en la propiedad de la viscosidad rotacional, en intervalos de aumento de cada 10 °C.

Como se pudo observar, el ligante es susceptible a elevaciones de temperatura, clasificándolo como un material visco-elástico, es decir que es un material de comportamiento intermedio entre el sólido de Hooke (elástico) y el líquido de Newton (viscoso). A temperaturas elevadas (>100 °C), el cemento asfáltico se comporta como un fluido viscoso (muestra la consistencia de un lubricante utilizado como aceite para motores), mientras que a bajas temperaturas (< 0 °C) se comporta casi como un sólido elástico (como una banda de goma). Cuando se aplica una carga, el ligante se estira o comprime adoptando diferentes formas. Cuando se retira la carga, retorna a su forma original (Cardenas & Fonseca). A una temperatura intermedia, que es la condición prevista para el pavimento, el cemento asfáltico tiene características de fluido viscoso y sólido elástico (Velasquez, 1995; citado por Cardenas & Fonseca.)

Figura 4. Curva reológica del asfalto 80/100 y con la adición del 18% de GCR.



Según el estudio realizado por Peiliang Cong, el asfalto convencional 80/100 obtuvo una viscosidad rotacional de 290 mPa s a una temperatura de 135 °C (Cong, 2013). Cong analizó en su investigación las propiedades físicas de dos tipos de asfaltos convencionales o típicos y la incidencia del grano de caucho reciclado pulverizado en cada uno de estos. Comparando el resultado obtenido por Cong y el de esta investigación, en donde se obtuvo para una temperatura de 130 °C un valor de 268.3 mPa s, se observó que el parámetro obtenido en esta investigación es muy cercano al obtenido por Cong, haciendo de este resultado satisfactorio, ya que la viscosidad rotacional no tiene parámetros establecidos por la normatividad Colombiana para asfaltos convencionales.

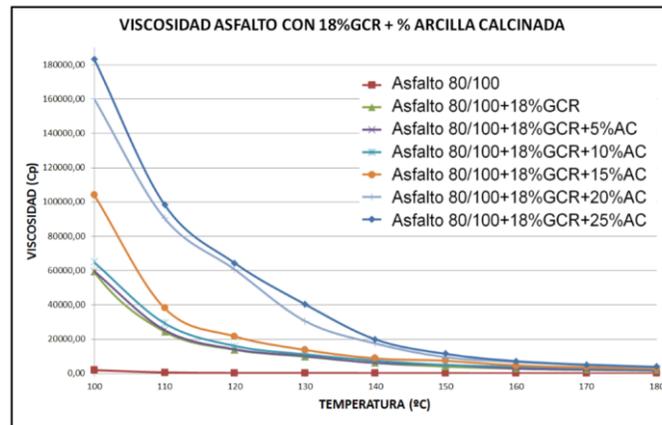
Para la muestra modificada con el 18% de grano de caucho reciclado se evidenció a una temperatura de 160 °C, un aumento considerable de la viscosidad, obteniendo un resultado de 2,82 Pa s (ver Figura 3), cumpliendo con los parámetros establecidos por el IDU en la especificación ET-GE-002, en donde se expone un rango de la viscosidad Brookfield a 163 °C entre 1.5 y 3 Pa s según lo recomendado.

El comportamiento físico que tiene el grano de caucho reciclado al reaccionar con el cemento asfáltico implica la absorción de aceites aromáticos lo cual conlleva a que el GCR se hinche y se ablande, obteniendo un aumento amplio de área superficial de este polímero. Esto hace que la mezcla asfalto-caucho también sea más flexible a bajas temperaturas mientras que a altas temperaturas logra que sea menos plástica (IDU, 2005). El GCR mejora notoriamente esta propiedad produciendo un aumento en la rigidez, la viscosidad y componentes elásticos superiores al del ligante convencional.

La figura 4 presenta la curva reológica de los resultados obtenidos en las mezclas modificadas con los diferentes porcentajes de arcilla calcinada a partir de los 100°C, ya que representaron en esta temperatura homogenización y se puede ver un mejor comportamiento de la viscosidad con respecto a la temperatura.

Al adicional el 25% de la arcilla calcinada se encontró un incremento superando las demás muestras, garantizando un crecimiento en el parámetro de viscosidad según el aumento en la cantidad de arcilla.

Figura 4. Curva reológica del asfalto 80/100 + 18% de GCR + % Arcilla Calcinada.



Cuando se analizaron las muestras independientemente se puede notar un cambio inusual a partir de los 120°C y el 130°C, esto se debe ya que a esta temperatura se realizó el cambio de spindle y por consiguiente la cantidad de la muestra ensayada, lo que altera la relación de los resultados. (Ver Figura 4)

La temperatura de mezclado para el asfalto 80/100 está entre 140°C y 150°C. La temperatura de compactación del ligante sin modificar, está entre 120°C y 130°C. Las temperaturas de mezclado y compactación de las muestras modificadas son superiores a la muestra control, lo que puede dificultar la aplicación In situ.

El comportamiento físico que tiene la arcilla calcinada es de manera eminentemente plástica, esto es debido a que este filler al ser envuelto por las partículas laminares del ligante-caucho, facilita la cohesión y evita el desplazamiento de una partícula a otras al momento de ejercer un esfuerzo sobre ellas (Delle & Lazzarino, 2012). El efecto de la arcilla es bien visible en los datos reológicos básicos: los aumentos módulo complejo y el ángulo de fase disminuye a medida que la arcilla se añade. El efecto general de arcilla por lo tanto, se puede

identificar en términos de rigidez (en relación con el aumento de temperatura) y la alteración del equilibrio visco-elástico (Delle & Lazzarino, 2012).

Otros proyectos resaltan que la presencia de arcilla sugiere que los silicatos de alguna manera pueden comportarse como activadores de compatibilidad. Afirman que la arcilla no solo es un simple relleno, siendo su presencia relacionada con variaciones muy importantes en la frecuencia de cruce y de transición vítrea. Se supone en consecuencia que la arcilla, gracias a su tamaño nanométrico, puede interactuar fenómenos de transición (Delle & Lazzarino, 2012) o como un agente tensioactivo. Su presencia puede conducir a una mayor interacción entre las fases incompatibles. Los autores argumentan que, en general, la más alta es la afinidad entre el polímero y la arcilla, mejor será la homogeneidad de la mezcla preparada (Jasso, Bakos, MacLeod & Zanzotto, 2013).

Fotografías SEM y Análisis EDX.

Aspecto Morfológico

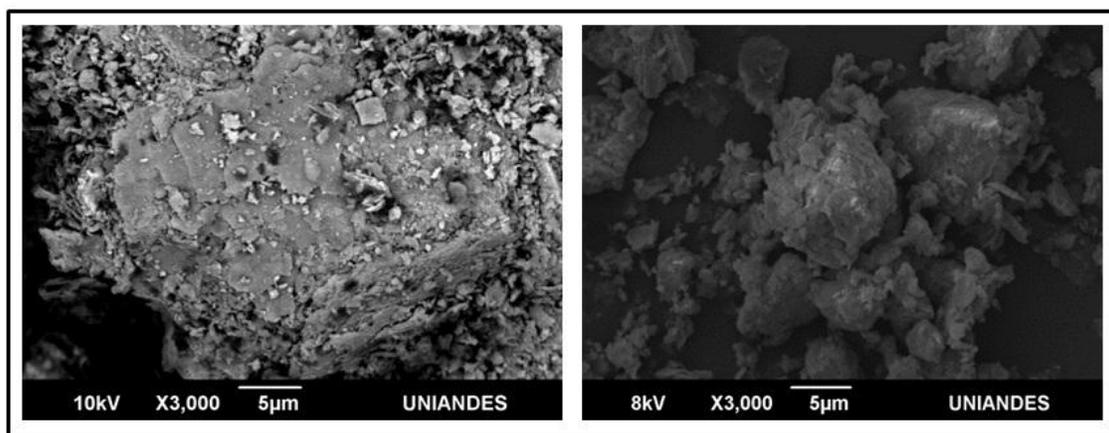
Arcilla calcinada: Se observó que el material de arcilla calcinada utilizado para cada uno de los ensayos en este proyecto; presentó diferentes tamaños de partículas y las de mayor tamaño revelaron que están constituidas por aglomerados de partículas más pequeñas. El tamaño de las partículas de arcilla calcinada generalmente se encuentran en un rango de 3 a 5 micras y esta figura tuvo una resolución de 50 y 100 micras con una aceleración de 10 y 8 Kilo electrón voltios respectivamente.

Las partículas no estuvieron uniformemente distribuidas en el interior, hay zonas superficiales en donde se encontraron aisladas. Esto se debe probablemente a la presión ejercida durante la conformación de dichos cuerpos alcanzando su finura. En ciertas partes de la muestra se pudo detallar un alto grado de calcinación. De igual forma, la arcilla calcinada presentó una distribución heterogénea y con gran detalle se visualizó la presencia de poros o espacios vacíos entre las partículas.

Grano de Caucho Reciclado (GCR): Se observó una distribución mucho más heterogénea en tamaño y forma que la de la arcilla calcinada; este tipo de partículas se encuentran compactas y no cuentan con bordes redondeados pero con ángulos marcados. También se detectó que hay un grado alto de tenacidad, esto se debe a que la muestra debió alcanzar la rotura, por acumulación de dislocaciones; es decir la resistencia a la que se expuso al momento de ser roto, molido, o desgarrado.

Se determinó que existe mayor densidad que en las fotografías de la arcilla calcinada, alcanzando proporciones mayores en cuanto a masa sobre el área analizada. También se observó presencia de un nivel alto de rugosidad superficial; esto quiere decir que en el acabado superficial hubo presencia de una película texturizada caracterizándolo así como adaptable para una mezcla con asfalto 80/100. La porosidad se halló en tamaños del rango de 5 a 1 micra de ancho, aunque este tipo de poros son prácticamente posibles de desaparecer al momento de aumentar la

Figura 5. Fotografías de arcilla calcinada a 5µm.



temperatura en el proceso de mezclado. (Ver Figura 4).

Composición Química EDX

Para analizar la composición química fue necesario exponer tres partes que describieron cada muestra conjuntamente. Así se obtuvo por un lado la "Morfología" del material anteriormente descrita; y a través de esa área específica fotografiada; los "Mapas de recorrido de elementos" y los "Espectros de emisión de rayos X". Vale la pena recalcar que los análisis químicos que se consiguió de las muestras se realizaron con la principal característica que cada escala representa. Las muestras analizadas fueron dos de arcilla calcinada y una muestra de GCR lo siguiente:

Arcilla Calcinada muestra: En esta muestra el microscopio electrónico de barrido se tomó el reflejo del oro paladio involucrándolo en el análisis. Adicionalmente se obtuvo una tabla de composición química en donde se detalló numéricamente la intensidad de cada elemento.

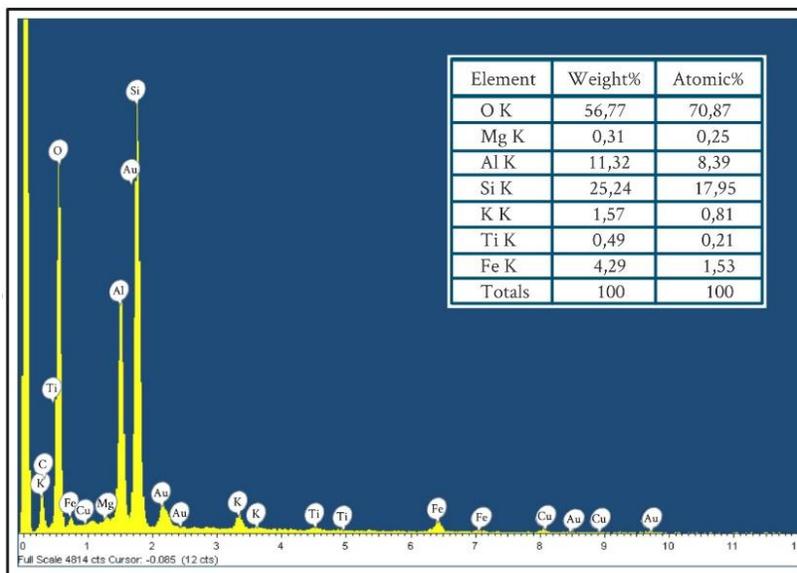
En la morfología de esta arcilla se observó de mejor manera el brillo

causado por el recubrimiento de oro paladio y los espacios oscuros en las esquinas donde el haz de electrones no alcanzó a reflejarse debido al límite de profundidad anteriormente mencionado. En las esquinas donde aparecen los espacios oscuros, se pudo observar en el mapa de recorrido de esta muestra, que el elemento que mejor se refleja es el carbono; por tal motivo se dedujo que la muestra de GCR sigue apareciendo como residuo.

Se pudo establecer que la composición es similar a la muestra anterior de arcilla calcinada, la única diferencia es la aparición del reflejo de oro paladio, aunque la intensidad es mínima comparada con los elementos estructurales de la arcilla. En el recuadro se observó que el oro paladio aparece como: "Au La1", el primer término fue el elemento "Au", el segundo el tipo de señal "L" alfa "a" 1. (Ver Figura 5).

A través de los recuadros en los mapas de recorrido del Silicio, aluminio y oxígeno se observó una deformación de la muestra en la esquina inferior derecha de la muestra. El número atómico del oro es el 79; por tal motivo presentó varias señales en el espectro hasta los 10 KeV,

Figura 5. Espectro de emisión EDX de la arcilla Calcinada.



caracterizándolo como el elemento más pesado en el análisis.

A pesar de que el hidrogeno hace parte de la composición química de la arcilla por ser el elemento más liviano no reflejó intensidad o emisión de energía que se consiguió en el espectro.

Tablas de composición química:
Se obtuvo una aproximación de la representación numérica de cada elemento en la composición química de la arcilla calcinada. En la primera columna se detalló el elemento y la señal correspondiente. En las demás columnas la concentración, la intensidad, el porcentaje del peso, la desviación del porcentaje del peso y el porcentaje atómico.

Los elementos del carbono (C), cobre (Cu) y Oro (Au) se despreciaron por los motivos anteriormente mencionados.

Para el análisis numérico se tomó las casillas de porcentaje del peso y el porcentaje atómico excluyendo los

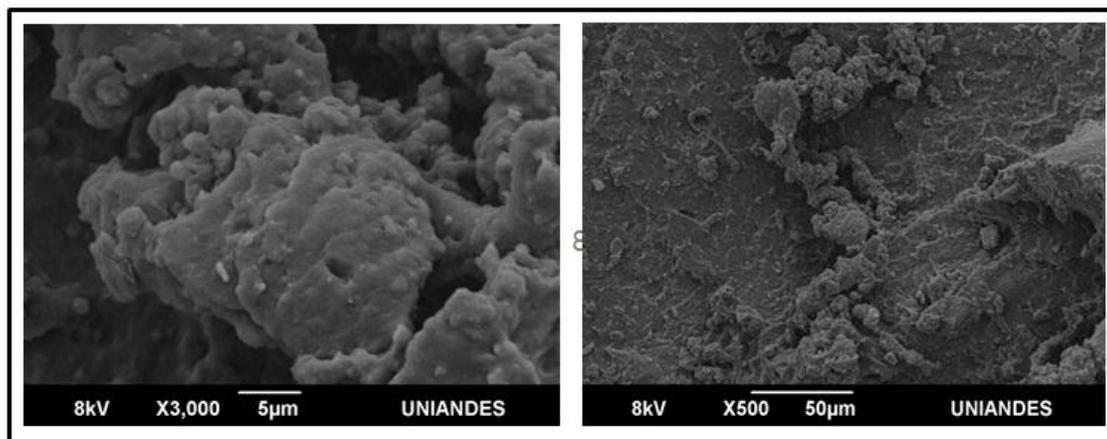
elementos que no corresponden a la estructura química de la arcilla y recalculando los valores correspondientes. (Ver Figura 6).

Se concluyó que el porcentaje de oxígeno estuvo levemente alterado también por el caucho contaminante; sin embargo se ha decidido tomarlo en su totalidad. Se obtuvo 70,87 % atómico de Oxígeno, esto reflejo la gran presencia de oxígeno actuando en el proceso de oxidación de las moléculas de Silicato de Aluminio y del hierro.

Se observó poca presencia de potasio con un 0,81% atómico debido al proceso de calcinación de la arcilla. El titanio como impureza o elemento menor en los silicatos estuvo presente con 0,21 % atómico. El silicio y el aluminio obtuvieron gran presencia en la muestra, con 17,95% y 8,39% atómico respectivamente. El Magnesio y el hierro tienen poca presencia con 0,25% y 1,53% respectivamente.

Grano de Caucho Reciclado
GCR: En la morfología aparecieron zonas

Figura 6. Fotografías de Grano de Caucho Reciclado a 5 μ m y 50 μ m.



oscuras y se identificó como poros en donde no se alcanzó a transmitir señal. La superficie se visualizó compuesta por capas aparentemente homogéneas con algunas partículas sueltas.

Presenta el mapa de recorrido de elementos se observó mayor presencia de carbono (C), esto debido a que es el elemento más abundante de los polímeros, la materia prima de la llanta, y muestra mayor intensidad punto por punto en el mapa de elementos. El Azufre (S) apareció en la composición química, debido al proceso de vulcanización de la llanta, en donde este elemento actuó como un aglutinante de las cadenas carbonadas formando una sola molécula.

El Zinc (Zn) y el Silicio (Si) se tomó como elementos que reaccionaron con el oxígeno (O) y conformaron moléculas que hacen parte de la composición química de la llanta. Se obtuvo la presencia de Cobre (Cu) y Oro (Au) como elementos conductores para la muestra de GCR.

La mayoría de los elementos reflejó señales K exceptuando el oro

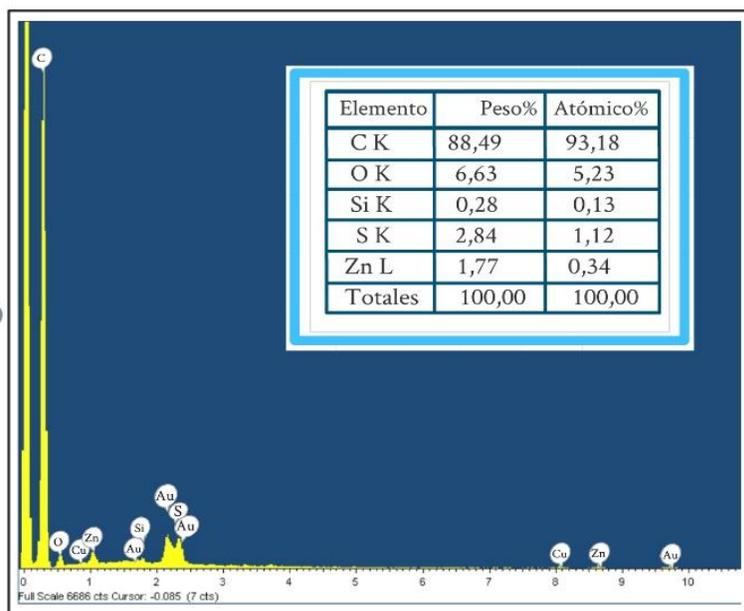
paladio que reflejó señal "M", el cobre y el Zinc con señal L. Se pudo observar a través de los mapas de recorrido la reacción del oxígeno sobre el silicio.

El rango de energía del espectro de rayos-X fue de 13KeV; sin embargo para efecto del análisis se recortó la imagen lo necesario para interpretarse de manera más clara. Cada señal correspondió a un valor de energía, los elementos respondieron a esta señal de electrones acelerados, saltando de nivel energético a otro. La energía de las transiciones tuvo que ver también con el tamaño del núcleo; por tal motivo el carbono solo se reflejó en una sola señal de gran intensidad, ya que su número atómico es 6, fue el elemento más liviano pero de mayor presencia. Las señales de oro se emiten en varios niveles; ya que fue el elemento más pesado.

Tablas de composición Química:
Al igual que el cobre, el Zinc obtuvo varias señales hasta "L" debido a que su número atómico es 30 se consideró como el elemento más pesado de la estructura química de la llanta. (Ver Figura 7).

Para este análisis también se despreciaron los valores del cobre y el

Figura 7. Espectro de emisión EDX del Grano de Caucho Reciclado.



oro, y se recalcularon los porcentajes de peso y porcentajes atómicos.

Se observó que el carbono tuvo un 93,18% atómico, lo que demostró una vez más que es elemento de mayor presencia, seguido de una poca presencia de Oxígeno 5,23% atómico y Azufre 1,12% atómico.

CONCLUSIONES

1. Los resultados de los ensayos del efecto Stripping y bandeja de adherencia permitieron concluir que al aumentar el porcentaje de adición de la arcilla calcinada mejoró favorablemente la estabilidad y consolidación de la mezcla ya que las moléculas internas de la llenante mineral interactúan entre sí, aumentando la fuerza de fricción con el agregado grueso. Por otro lado debido a su alta finura, actúan en los poros de la mezcla asfáltica logrando así una mayor impermeabilidad destacándose su capacidad de adsorción.

2. El análisis de las fotografías SEM se concluye que la composición física de la arcilla calcinada presentó un aglomerado de partículas de más pequeñas en donde se cumplió el rango de 3 a 5 micras, sin embargo la morfología de este filler no generó la uniformidad en su distribución. En cuanto a la composición química se obtuvo que debido a que la arcilla es calcinada logro obtener titanio como elemento principal en este tipo de filler, y generando una ganancia de Oxígeno (O), Silicio (Si), Aluminio (Al) y óxido de hierro y encontrando una reducción de potasio.

Así mismo composición física del grano caucho se obtuvo una uniformidad en la distribución de este polímero, la morfología de este material logro

demostrar que no presenta bordes redondos pero si ángulos marcados y presencia de poros. La composición química demostró la presencia de Magnesio (Mg) que es común encontrarlo en su estructura química, de igual forma se obtuvo el Azufre (S) debido al proceso de vulcanización, el Zinc (Zn) y el Silicio (Si) reaccionaron con el oxígeno (O) y conformaron moléculas que hacen parte de la composición química de la llanta.

3. Con los resultados obtenidos en los ensayos se logró concluir que el contenido de grano de caucho reciclado confiere a la mezcla mejoras en las propiedades físicas y reológicas con respecto al asfalto convencional, debido a que posee la capacidad de absorción de energía plástica, ofreciendo la habilidad de experimentar grandes deformaciones elásticas antes de la falla. También aumenta las resinas del ligante mejorando la adherencia y cohesión entre las partículas proporcionando mayor flexibilidad en la estructura molecular de la mezcla asfáltica. Sin embargo con la incorporación de la arcilla calcinada se obtuvo mejores rendimientos en cuanto a la compatibilidad de las partículas, proporcionando mayor capacidad de adsorción del agua y aumentando la

Resistencia a las temperaturas altas, permitiendo la prolongación de la vida útil de la carpeta asfáltica.

4. Los resultados del proyecto de investigación confirmaron que la utilización de arcilla calcinada usándola como llenante mineral ayudó satisfactoriamente mejorando las propiedades del asfalto convencional, ya que la reacción con el asfalto caucho proporcionó rigidez ofreciendo mejoras en la impermeabilidad, mayor contacto de

adherencia con agregados, alta resistencia a la susceptibilidad térmica y penetración.

Por otro lado, esta investigación halló que entre mayor sea la adición del llenante mineral en una relación filler/asfalto-caucho, mayor es el mejoramiento en las propiedades del asfalto modificado.

5. Se concluye que el porcentaje más alto de adición de arcilla calcinada mostró un comportamiento superior, es decir, el contenido del filler al 25% permitió obtener la mezcla de mayor beneficio puesto que su comportamiento muestra un mejor desempeño en las propiedades físicas y reológicas que las demás muestras.

6. La utilización de la arcilla calcinada y el grano de caucho como agentes modificadores en las mezclas asfálticas, contribuyen al medio ambiente mitigando el impacto ambiental, debido a la inadecuada disposición y almacenamiento de estos residuos sólidos. Adicionalmente los resultados de este proyecto demostraron que la adición de estos materiales en óptimos porcentajes mejoran las propiedades del asfalto convencional.

7. Se invita a la comunidad universitaria para que den continuidad al estudio de los asfaltos modificados con GCR y arcilla calcinada, evaluando y profundizando las propiedades físicas, reológicas y mecánicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Romero, C & Gomez, A. (2002). Propiedades físicas y químicas de los asfaltos colombianos tipo Barrancabermeja y de sus respectivas fracciones de asfaltenos.

Revista Academia Colombiana de Ciencias exactas, físicas y naturales. Vol 28 (98). Colombia.

Arenas, H. (2009). Propuesta Técnica para garantizar la homogeneidad de los asfaltos producidos en las refinerías colombianas. Consultoría realizada para la Cámara Colombiana de la Infraestructura. Colombia

El Tiempo. (2011). Las llantas viejas con un problema ambiental "radial". [en línea]. Bogotá, Colombia. Disponible en internet: <http://www.eltiempo.com>

El Tiempo. (2013) Buscan alternativas para las llantas usadas. Disponible en internet: <http://www.elcolombiano.com>

Gallegos, A. Lang, B. Fernandez, M & Lujan, M. (2006). Contaminación atmosférica por la fabricación de ladrillos y sus posibles efectos sobre la salud de los niños de zonas aledañas. Revista ActaNova del Departamento de Ciencias Exactas de Ingeniería de la Universidad Católica Boliviana.. Vol. 3 (2). La Paz, Bolivia.

Siñani, S & Mancilla, B. (2006). Problemática ambiental producida por las ladrilleras. La paz, Bolivia

Universidad Nacional de Colombia. (2008). Ecología Y Medio Ambiente. Disponible en internet: <http://www.virtual.unal.edu.co>. Colombia

Instituto de Desarrollo Urbano IDU (2011). Especificación técnica para la aplicación del grano de caucho reciclado (GCR) en mezclas

- asfálticas en caliente por vía húmeda. ET GE 002. Bogotá D.C
- Figueroa, A. Fonseca, E & Reyes, F. (2009). Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado. Pontificia Universidad Javeriana, Revista Ingeniería y Universidad, Vol. 13 (1). Bogotá, Colombia.
- M, El-Shafie. I.M. Ibrahim, A.M.M. Abd El Rahman. (2012). The addition effects of macro and nano clay on the performance of asphalt binder, Nasr City,: Egyptian Petroleum Research Institute (EPRI). Cairo, Egypt
- Instituto de Desarrollo Urbano IDU (2011).ET-GE-002 Para la aplicación del grano de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas en caliente por vía húmeda.
- Albano, C. Camacho, N. Hernandez, M. Bravo, A & Guevara, H. (2008). Estudio de concreto elaborado con caucho de reciclado de diferentes tamaños de partículas. Revista virtual Scielo. Vol 23 (1). Disponible en internet: <http://www.scielo.org.ve>. Caracas, Venezuela.
- Topcu, I & Avcular, N. (1997). Analysis of rubberized concrete as a composite material, Cement and Concrete research, Vol 27(8).
- Arguelles, R. (1980). Hormigones. Fabricación y Cálculo. Madrid.
- Alvarez, H & Alvarez, M. (1985). Porosidad técnica del concreto. Tesis de pregrado, UCV, Caracas.
- Castillo, R. Antoni, M. Alujas, A. Scrivener, K. Martinera, J. (2011). Estudio de la adición de arcillas calcinadas en la durabilidad de hormigones. Revista Ingeniería de Construcción Vol. 26 (1). Santiago, Chile.
- Barrietos, B. (2010). Utilización del grano de caucho proveniente de llantas en mezclas asfálticas en caliente,. universidad técnica de Oruro. Oruro, Bolivia.
- Tuna, Centro de Ceramica Contemporanea. (2001). Arcillas y tierras. Disponible en internet: <http://tunaceramica.com>. Mexico.
- Romero, J. Sanchez, M. (2011). Efecto de la arcilla calcinada en un asfalto B-60/70 y su incidencia en una mezcla asfáltica MDC-2. Trabajo de grado (Ingeniería civil). Universidad Piloto de Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. Bogota, Colombia.
- Madrid, M. (2006) Tecnología de la adhesión, Departamento técnico de Loctite. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Disponible en internet: <http://www.ulpgc.es/>.
- Lopez, T. Hernandez, J. Horta, J. Coronado, A & Castaño, V. (2010). Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas. Revista Iberoamericana de Polimeros. Vol. 11 (3). Mexico.
- Zeevaert, L. (1997). La Investigación del Suelo por su Estructura y Comportamiento Reológico. Segunda Conferencia Magistral en el Instituto Politécnico Nacional. Mexico.

- Royo, J. (1989). Manual de tecnología del caucho. Consorcio nacional de industrias del caucho, Barcelona.
- Campos, J. Gomez, S. & Torres, W. (2006). Impermeabilización de rellenos sanitarios utilizando suelos naturales aplicados a la ciudad de San Miguel y Lolotique. En: Capítulo III. Suelos y sus propiedades. El salvador, San Miguel: Universidad de oriente.
- Cardenas, J & Fonseca, E. (2009). Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 12.
- Cong, Peiliang. Xun, P. Xing, M. & Chen, S. (2012) Investigation of asphalt binder containing various crumb rubbers and asphalts. **Construction and Building Materials. Vol 40. China.**
- Instituto de Desarrollo Urbano IDU (2005). Contrato IDU – 306 – 003, Bogotá: Universidad de los Andes. Colombia
- Delle, P. Lazzarino, L. (2012) . Linear viscoelastic behaviour of asphalt binders modified with polymer/clay nanocomposites, *Italy: University of Parma, University of Pisa.*