

**MODIFICACIÓN DE UN ASFALTO CON CAUCHO RECICLADO DE LLANTA
PARA SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS**

**RICARDO ALBERTO ANGULO RODRÍGUEZ
JOSÉ LUIS DUARTE AYALA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
AGOSTO, 2005**

**MODIFICACIÓN DE UN ASFALTO CON CAUCHO RECICLADO DE LLANTA
PARA SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS**

**RICARDO ALBERTO ANGULO RODRÍGUEZ
JOSÉ LUIS DUARTE AYALA**

**Proyecto de grado presentado para optar el título de
Ingeniero Químico**

**Director:
RAMIRO SALAZAR LARROTA
Ingeniero Químico, Ph. D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA
AGOSTO, 2005**

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

1.	MARCO TEORICO	1
1.1	GENERALIDADES	1
1.2	ASFALTO	3
1.2.1	Propiedades físicas.	3
1.2.2	Composición química.	3
1.2.2.1	Asfaltenos.	4
1.2.2.2	Saturados.	4
1.2.2.3	Resinas.	5
1.2.2.4	Aromáticos..	5
1.2.3.1	Clasificación de Asfaltos.	5
1.2.4	Clasificación del asfalto para pavimentación.	6
1.2.4.1	Cemento asfáltico.	6
1.2.4.2	Asfaltos líquidos.	6
1.2.4.3	Emulsiones asfálticas.	7
1.2.5	Naturaleza reológica del asfalto.	7
1.3	CAUCHO RECICLADO DE LLANTA (CRLI)	8
1.3.1	Composición química de las llantas. L	9
1.3.2	Influencia del CRLI en el asfalto modificado.	10
1.3.3	Proceso de obtención del CRLI.	12
1.3.3.1	Obtención por reencauche de llantas.	13
1.3.3.2	Obtención por molienda ambiental.	13
1.3.3.3	Obtención por molienda criogénica.	14
1.3.3.4	Obtención por molienda húmeda.	14
1.4	COMPATIBILIZANTES	14
1.5	PROCESOS DE MODIFICACION DEL ASFALTO	15
1.5.1	Proceso por vía seca.	15
1.5.1.1	PlusRide.	15
1.5.1.2	Genérica.	16
1.5.1.3	Convencional.	16
1.5.2	Proceso por vía húmeda.	16
1.5.2.1	Tecnología por bachadas.	17
1.5.2.2	Tecnología continua.	17
1.5.2.3	Tecnología terminal.	18
2.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	19
2.1	MATERIALES Y REACTIVOS EMPLEADOS.	19
2.2	EQUIPOS EMPLEADOS.	19

2.3	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS	20
2.3.1	Caracterización del asfalto.	20
2.3.1.1	Peso Específico (INV. E-707)..	20
2.3.1.2	Penetración (INV. E-706)..	22
2.3.1.3	Punto de Ablandamiento (INV. E-712).	22
2.3.1.4	Ductilidad (INV. E-702).	22
2.3.1.5	Punto de Chispa (INV. E-709).	23
2.3.1.6	Viscosidad absoluta (INV. E-716). .	23
2.3.1.7	Envejecimiento Termoxidante en Película Fina o TFOT (Thin Film Oven Test) (INV. E-721).	23
2.3.2	Caracterización del caucho reciclado de llantas (CRLI).	23
2.3.2.1	Resistencia de polímeros a agentes químicos (ASTM. D-543).	24
2.3.2.2	Termogravimetría (TGA) (ASTM. E-1131).	24
2.3.3	Caracterización de los compatibilizantes.	24
2.4	DISEÑO DE LA MODIFICACIÓN ASFALTO-CRLL (AMC).	24
2.4.1	Variables de proceso en la elaboración del AMC.	25
2.5	DISEÑO DE LA MODIFICACIÓN ASFALTO-CRLL-COMPATIBILIZANTE (AMCA).	25
2.5.1	Acondicionamiento del CRLL.	26
2.6	PROCESO DE MODIFICACIÓN DE AMC Y AMCA.	27
2.7	PARÁMETRO DE SELECCIÓN DEL AMC ÓPTIMA.	27
2.7.1	Viscosidad dinámica.	28
2.7.2	Estabilidad al almacenamiento.	28
2.8	CARACTERIZACIÓN DE AMC OBTENIDO	28
2.8.1	Estabilidad al almacenamiento (INV. E-726).	30
2.8.2	Recuperación elástica por torsión (INV. E-727).	30
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
3.1	CARACTERIZACIÓN CRLL	31
3.1.1	Granulometría del caucho.	31
3.1.2	Resistencia del caucho a agentes químicos.	31
3.1.3	Análisis térmico del CRLL (TGA).	32
3.2	CARACTERIZACIÓN ASFALTO	32
3.3	CARACTERIZACION DE COMPATIBILIZANTES	33
3.4	OBTENCIÓN DE LOS ASFALTOS MODIFICADOS ÓPTIMOS	33
3.5	ASFALTO-CRLL (AMC).	33
3.5.1	Curvas reológicas AMC malla 50.	34
3.5.1.1	Comportamiento de las variables de proceso.	34
3.5.2	Curvas reológicas AMC malla 200.	36
3.5.2.1	Comportamiento de las variables de proceso.	37
3.6	SELECCIÓN DEL AMC ÓPTIMO.	40
3.7	ASFALTO-CRLL-COMPATIBILIZANTE (AMCA).	42
3.7.1	Acondicionamiento del CRLL.	43
3.7.1.1	Absorción CRLL-compatibilizante. (RPM)	43

3.7.1.2	Secado CRL-Compatibilizante.	44
3.7.2	Selección de parámetros de acondicionamiento de CRL.	44
3.7.3	Curvas reológicas AMCA	44
3.7.3.1	Comportamiento de las variables de proceso.	45
3.8	SELECCIÓN DEL COMPATIBILIZANTE Y AMCA ÓPTIMO.	45
3.9	EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL PARÁMETRO DE SELECCIÓN DE ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO	47
3.10	COMPARACIÓN DE ASFALTO ORIGINAL Y MODIFICADOS.	48
3.11	CARACTERIZACIÓN DEL AMC Y AMCA ÓPTIMOS.	50
3.12	VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA PARA LA PRODUCCIÓN DE AMC Y AMCA A NIVEL INDUSTRIAL.	51
4.	CONCLUSIONES	52
5.	RECOMENDACIONES	53
6.	BIBLIOGRAFIA	54
7.	ANEXOS	57

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición y características de los diferentes tipos de llantas	10
Tabla 2. Análisis químico de la llanta	11
Tabla 3. Propiedades permisibles para asfalto según su penetración	22
Tabla 4. Diseño de experimentos del proceso de modificación asfalto-CRLL	26
Tabla 5. Diseño de experimentos del proceso de modificación asfalto-CRLL- Compatibilizantes	27
Tabla 6. Datos distribución de tamaño de partícula del CRLL	58
Tabla 7. Resultados de la prueba de resistencia del caucho a agentes químicos	61
Tabla 8. Composición estimada del CRLL por el método de TGA	61
Tabla 9. Propiedades físicas y químicas determinadas al asfalto original	61
Tabla 10. Caracterización compatibilizante tipo I	62
Tabla 11. Caracterización compatibilizante tipo II	62
Tabla 12. Caracterización compatibilizante tipo III	63
Tabla 13. Caracterización compatibilizante tipo III	70
Tabla 14. Caracterización de los asfaltos modificados óptimos	71
Tabla 15. Producción y consumo interno de asfaltos en países andinos	72
Tabla 16. Capital fijo	75
Tabla 17. Costo de equipos	75
Tabla 18. Costo de materias prima	76
Tabla 19. Precio de venta del producto terminado	76
Tabla 20. Intervalos de precios en los mercados de USA y nacional.	76
Tabla 21. Nomina	76
Tabla 22. Servicios industriales	77

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Etapas metodológicas del proyecto	22
Figura 2. Diagrama de bloques del proceso utilizado para la obtención del AMC	30
Figura 3. Distribución diferencial de tamaño de partícula de CRL	32
Figura 4. Variación de la viscosidad en el AMC con el aumento de tiempo y CRL a temperatura de modificación constante 165°C	35
Figura 5. Variación de la viscosidad en el AMC con el aumento de tiempo y CRL a temperatura de modificación constante 185°C	36
Figura 6. Variación de la viscosidad en el AMC con el aumento de temperatura y CRL a tiempo de modificación constante 45 min.	36
Figura 7. Variación de la viscosidad en el AMC con el aumento de temperatura y CRL a tiempo de modificación constante 60 min	37
Figura 8. Variación de la viscosidad en el AMC con el aumento de temperatura y CRL a tiempo de modificación constante 75 min	37
Figura 9. Variación de la viscosidad en el AMC con el aumento de tiempo y CRL a temperatura de modificación constante 165°C	38
Figura 10. Variación de la viscosidad en el AMC con el aumento de tiempo y CRL a temperatura de modificación constante 185°C	39
Figura 11. Variación de la viscosidad en el AMC con el aumento de temperatura y CRL a tiempo de modificación constante 45 min	39
Figura 12. Variación de la viscosidad en el AMC con el aumento de temperatura y CRL a tiempo de modificación constante 60 min	40
Figura 13. Variación de la viscosidad en el AMC con el aumento de temperatura y CRL a tiempo de modificación constante 75 min	40
Figura 14. Variación de la viscosidad dinámica a 180°C respecto al tipo de compatibilizante y % en peso de CRL presentes en el AMCA	46

Figura 15. Curvas reologicas entre 60 y 120 °C del AMC, AMCA y asfalto original	50
Figura 16. Curvas reologicas entre 120 y 180 °C del AMC, AMCA y asfalto original	51
Figura 17. Distribución acumulada de tamaño de partícula de CRLl	59
Figura 18. Resultado del análisis termogravimétrico (TGA) para el CRLl	60
Figura 19. Comparación del caucho natural y sintético con el CRL por medio del TGA	61
Figura 20. Curva reológica asfalto original	65
Figura 21. Curvas reológicas AMC con 4 % de CRLl-malla 50	65
Figura 22. Curvas reológicas con 8 % CRLl-malla 50	66
Figura 23. Curvas reológicas con 12% CRLl-malla 50	66
Figura 24. Curvas reológicas con 8 % CRLl-malla 200	67
Figura 25. Curvas reológicas con 12% CRLl-malla 200	67
Figura 26. Curvas reológicas del AMC optimo modelado y experimental	68
Figura 27. Curvas de absorción de los compatibilizantes en el CRLl	68
Figura 28. Curvas de secado del CRLl con cada compatibilizante	69
Figura 29. Curvas reologicas asfalto-caucho y compatibilizante tipo I	69
Figura 30. Curvas reologicas asfalto-caucho y compatibilizante tipo II	70
Figura 31. Curvas reologicas asfalto-caucho y compatibilizante tipo III	70
Figura 32. Curvas reológicas del AMCA optimo modelado y experimental	71
Figura 33. Proceso de planta industrial para la elaboración de asfaltos modificado	75

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Resultados experimentales

ANEXO B. Estimación de costos y diseño de planta para la producción de AMC y AMCA a nivel industrial

TITULO: MODIFICACIÓN DE UN ASFALTO CON CAUCHO RECICLADO DE LLANTA PARA SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS *

AUTORES: Ricardo Alberto Angulo Rodríguez
José Luis Duarte Ayala **

PALABRAS CLAVES: Asfalto modificado, caucho reciclado de llantas, compatibilizantes.

RESUMEN

Este trabajo se enfocó en la elaboración de un asfalto modificado con Caucho Reciclado de Llantas (CRL), proponiendo un esquema de aprovechamiento de los residuos sólidos que representan las llantas usadas, con el fin de ofrecer una alternativa de solución a los problemas que afectan al asfalto y consecuentemente a las carpetas asfálticas. Entre los principales problemas que afectan al asfalto en el pavimento se encuentran: el envejecimiento, la deformación permanente, los fisuramientos y los altos costos. Por otra parte la contaminación causada por residuos sólidos en especial la generada por las llantas usadas de automotores es un aspecto al que no se le ha dado un manejo adecuado dentro de la problemática ambiental que actualmente afecta al país.

Para la elaboración del asfalto modificado se tuvo en cuenta las variables de proceso: temperatura de modificación, tiempo de modificación, tamaño de partícula CRL y contenido (% en peso) de CRL en el asfalto. En la selección del asfalto modificado óptimo se establecieron dos parámetros de aceptación: la viscosidad dinámica y la estabilidad al almacenamiento

Con base a los resultados cabe mencionar que con esta investigación se obtuvieron: asfalto modificado con caucho (AMC) y asfalto modificado con caucho acondicionado (AMCA) óptimos por el proceso de la vía húmeda que cumplieron con los parámetros de selección, mejorando algunas de sus propiedades como la recuperación elástica por torsión, la cual se logro aumentar en un 100 y 300 por ciento para el AMCA y AMC respectivamente, lo cual indica una alta resistencia a la deformabilidad en estos asfaltos. A nivel de laboratorio, se obtuvo una relación de aprovechamiento de 285 kilogramos de llantas desechadas por cada tonelada de asfalto modificado, lo que propone una alternativa de carácter ambiental para el manejo de estos residuos sólidos.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ciencias Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, Director:
Ramiro Salazar Larrota, Ingeniero Químico, Ph.D.

**TITLE: MODIFICATION OF ASPHALT WITH RECYCLED TIRE RUBBER
FOR THEIR APPLICATION IN PAVEMENTS ***

AUTHORS: Ricardo Alberto Angulo Rodríguez
José Luis Duarte Ayala **

KEYS WORDS: Modified asphalt, recycled tire rubber, oil extender

ASBTRACT

This work was focused in the elaboration of an modified asphalt with Recycled Tire Rubber of (CRL), proposing an outline of use of the solid residuals that represent the used tires, with the purpose of offering a solution alternative to the problems that affect to the asphalt and consequently to the asphaltic binders. Among the main problems that affect to the asphalt in the pavement are: the aging, the permanent deformation, the fissures and the high costs. On the other hand the contamination caused by solid residuals especially the one generated by the used tires of railcars is an aspect to which has not been given an appropriate handling inside the environmental problem that at the moment affects to the country.

For the elaboration of the modified asphalt one kept in mind the process variables: modification temperature, modification time, CRL particle size and content (weight %) of CRL in the asphalt. In the selection of the modified asphalt optimum two parameters of acceptance settled down: the dynamic viscosity and the storage stability.

With base to the results fits to mention that with this investigation they were obtained: modified asphalt with rubber (AMC) and modified asphalt with conditioned rubber (AMCA) optimum for the process of the wet way that fulfilled the selection parameters, improving some of their properties like the elastic recovery for torsion, the one which you achievement to increase respectively by a 100 and 300 percent for the AMCA and AMC, that which indicates a high resistance to the deformation in these asphalts. At laboratory level, a relationship of use of 285 kilograms of tires was obtained discarded by each ton of modified asphalt, what proposes an alternative of environmental character for the handling of these solid residuals.

* Grade work.

** Faculty of Physicochemical Sciences, School of Chemical Engineering, Director:
Ramiro Salazar Larrota, Chemical Engineer, Ph.D.

INTRODUCCION

En Colombia se han venido implementando cada vez más nuevas ideas que permitan el desarrollo y mejoramiento de los pavimentos, de modo que el país pueda contar con una infraestructura vial acorde a sus necesidades. Es por esto que surgen los estudios de investigación sobre modificación de asfaltos, como una forma de mejorar las propiedades del ligante y dar solución a ciertos inconvenientes que actualmente se presentan.

El envejecimiento es un problema que afecta a todos los asfaltos ^[1], debido a cambios subsecuentes en sus propiedades físicas y químicas lo cual tiene un efecto negativo en su comportamiento y durabilidad durante su vida útil.

Los altos costos que implican la producción de asfaltos es un inconveniente que depende directamente del aumento internacional en los precios del crudo, lo cual produce una inestabilidad en el mercado de los pavimentos.

Otros tipos de daños desfavorables son la *deformación permanente* que se presenta en los pavimentos, debido a la falta de consistencia que aporta el asfalto a altas temperaturas produciendo ahuellamiento, también los *fisuramientos* por fatiga afectan al pavimento debido a las frecuentes cargas de trabajo impuestas sobre el asfalto en el pavimento.

Por otra parte *la contaminación* causada por residuos sólidos en especial la generada por las llantas usadas de automotores es un aspecto al que no se le ha dado un manejo adecuado dentro de la problemática ambiental que actualmente afecta al país.

Debido lo anteriormente expuesto nace necesidad de un medio ambiente menos contaminado y la búsqueda de mejores materias primas para la pavimentación de vías. Entidades especializadas en los diferentes países del mundo, han experimentado con agregados de Caucho Reciclado de Llantas (CROLL) en el asfalto; para mejorar sus principales propiedades, obteniendo excelentes resultados. Aunque esta experimentación dio inicio alrededor de los años setenta, es en las últimas décadas que se ha venido perfeccionando las diferentes técnicas para la modificación de asfalto empleando CROLL ^[26], a este asfalto se le denomina Asfalto Modificado con Caucho (AMC).

Este trabajo se enfoca en la elaboración de la mezcla optima asfalto-caucho con el fin de que el producto obtenido se pueda utilizar como ligante en la preparación de las distintas especificaciones de pavimentos, logrando con esto dar una alternativa de solución a los problemas anteriormente mencionados que afectan a las carpetas asfálticas de las vías del país, al tiempo que se propone un esquema de solución en el manejo de los residuos sólidos que representan las llantas usadas, las cuales son un preocupante y creciente factor de contaminación.

1. MARCO TEORICO

1.1 GENERALIDADES

Por muchos años, investigadores y desarrolladores han experimentado con la modificación del asfalto agregando asbestos, fillers especiales, fibras vegetales, minerales y cauchos, con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito (peso vehicular), ello dio origen a nuevos asfaltos que genéricamente fueron denominados "Asfaltos Modificados" ^[10].

La modificación de asfalto es una técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en la pavimentación de vías. Los objetivos que se persiguen con la modificación de los asfaltos, es contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas para reducir las deformaciones permanentes (ahuellamiento) de las mezclas que componen las capas de rodamiento, aumentando la rigidez. Por otro lado disminuir el fisuramiento por efecto térmico a bajas temperaturas y por fatiga, aumentando su elasticidad. Finalmente contar con un ligante de mejores características adhesivas.

Para que un aditivo modificador sea efectivo y pueda ser utilizado debe ser práctico y económico, y a la vez cumplir con las siguientes características:

- ❖ Bajo costo
- ❖ Fácilmente aplicable
- ❖ Resistente a la degradación a altas temperaturas
- ❖ Mezclable con el asfalto

- ❖ Mejorar la resistencia a la fluencia a altas temperaturas de los pavimentos sin hacer que el asfalto sea demasiado viscoso a las temperaturas de mezcla y de compactación o demasiado "liviano" o quebradizo a bajas temperaturas.

Un material que cumple con todos estos requisitos es el caucho que se obtiene del reciclado de las llantas usadas de los automotores o CRLI el cual después de recibir un tratamiento para su adecuación y en especial para la reducción de su tamaño se puede incorporar al asfalto para de esta manera formar un asfalto modificado con caucho o AMC [2].

El AMC está constituido por dos fases, una formada por pequeñas partículas de CRLI hinchado y la otra por asfalto. En las composiciones de baja concentración de CRLI existe una matriz continua de asfalto en la que se encuentra disperso el CRLI; pero si se aumenta la proporción de CRLI en el asfalto se produce una inversión de fases, estando la fase continua constituida por el CRLI hinchado y la fase discontinua corresponde al asfalto que se encuentra disperso en ella.

El efecto principal de añadir CRLI a los asfaltos es el cambio en la relación viscosidad - temperatura (sobre todo en el rango de temperaturas de servicio de las mezclas asfálticas) permitiendo mejorar de esta manera el comportamiento del asfalto tanto a bajas como a altas temperaturas.

Para que los asfaltos con CRLI consigan las prestaciones óptimas, hay que seleccionar cuidadosamente el asfalto base, la dosificación, la elaboración y las condiciones de almacenaje. El CRLI tiene un tamaño de partícula de dispersión óptima para mejorar las propiedades reológicas, donde por encima de esta el CRLI solo actúa como un filler; y por debajo de esta, pasa a estar muy solubilizado y aumenta la viscosidad, sin mejorar la elasticidad y la resistencia.

La incorporación del CRLC en las mezclas asfálticas ha sido de buena aceptabilidad en muchos países por los buenos resultados en el desempeño de los pavimentos asfálticos. Las mejoras en las propiedades mecánicas y el incremento de la vida útil del mismo hace que la relación beneficio-costos sea mayor comparada con la de un pavimento con una mezcla asfáltica convencional.

La utilización del CRLC en los pavimentos, además de ayudar a solucionar la problemática ambiental generada por las llantas desechadas, proporciona con sus compuestos; caucho natural (látex) y cauchos sintéticos (SBS, SBR) una mayor elasticidad y resistencia a la fatiga en los pavimentos. Por otro lado, el negro de humo que estas contienen actúa como antioxidante en el ligante, atenuando su envejecimiento y por ende prolongando la capacidad cohesiva del mismo en el tiempo.

1.2 ASFALTO

1.2.1 Propiedades físicas. El asfalto es un material aglomerante, resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero; capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo acción de calor o cargas permanentes. Componente natural de la mayor parte de los petróleos, en los que existe en disolución y que se obtiene como residuo de la destilación al vacío del crudo pesado. Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se le combina usualmente. Su color varía entre el café oscuro y el negro; de consistencia sólida, semisólida o líquida, dependiendo de la temperatura a la que se exponga o por la acción de disolventes de volatilidad variable o por emulsificación.

1.2.2 Composición química. Es de mucha utilidad un amplio conocimiento de la constitución y composición química de los asfaltos, para el control de sus propiedades físicas y así obtener un mejor funcionamiento en la pavimentación. Al

igual que el petróleo crudo, el asfalto, es una mezcla de numerosos hidrocarburos parafínicos, aromáticos y compuestos heterocíclicos.

La mayoría de los hidrocarburos livianos se eliminan durante el proceso de refinación, quedando los más pesados y de moléculas complejas. Al eliminar los hidrocarburos más ligeros de un crudo, los más pesados no pueden mantenerse en disolución y se van uniendo por absorción a las partículas coloidales ya existentes, aumentando su volumen dependiendo de la destilación que se les dé. Las moléculas más livianas constituyen el medio dispersante o fase continua.

Los hidrocarburos constituyentes del asfalto forman una solución coloidal en la que un grupo de moléculas de hidrocarburos pesados (asfáltenos) se encuentran dispersas en un medio aceitoso más ligero (maltenos) compuesto por hidrocarburos saturados, resinas y aromáticos, sin que exista una separación entre estas dos fases sino una transición.

1.2.2.1 Asfaltenos. Son moléculas asociadas, altamente polares, solubles en benceno, CCl_4 y CS_2 , e insolubles en n-alcanos de bajo peso molecular, tales como hexano y heptano. Los asfaltenos son sólidos amorfos negros o marrones que contienen carbono, hidrogeno, azufre, nitrógeno, oxígeno y metales pesados como vanadio, níquel y hierro. Los átomos de azufre y oxígeno actúan como enlace entre los grupos anillados.

1.2.2.2 Saturados. Son líquidos incoloros compuestos de cadenas lineales, ramificadas con trazas de cicloparafinas. Los hidrocarburos saturados actúan como antioxidantes e impermeabilizantes, tienen menor poder de adherencia y causan deformidad al asfalto en pavimento. Estructuralmente los saturados son muy similares a los aceites lubricantes y su peso molecular semejante al de los aromáticos.

1.2.2.3 Resinas. Son compuestos solubles en n-alcános de bajo peso molecular y son retenidos por adsorbentes tales como la alúmina activada o tierras de fuller. Además son líquidos viscosos de color oscuro, son muy adhesivas y son los agentes peptizantes para los asfaltenos.

Las resinas presentan estructuras aromáticas o nafténicas con grupos polares así como de hidrocarburos infatuados y heterocíclicos; algunas moléculas contienen múltiples átomos de azufre, nitrógeno y oxígeno, también contienen grupos hidroxilos. Las resinas en general presentan pesos moleculares menores que los asfaltenos, con valores que varían entre 900-1300. Los anillos policondensados tienden a contener cadenas alquil más largas o más numerosas que los asfaltenos.

1.2.2.4 Aromáticos. Son líquidos de color amarillo o rojo a temperatura ambiente, los cuales poseen estructuras que contienen anillos aromáticos mono, di y polinucleares con conjuntos condensados de anillos nafténicos y cadenas parafinitas asociadas. Tiene un peso molecular promedio entre 600-1000.

Los anillos nafténicos condensados pueden contener átomos de azufre, los cuales hacen puente entre los anillos aromáticos y nafténicos.

1.2.3.1 Clasificación de Asfaltos. Los asfaltos se pueden clasificar según su uso o aplicación en:

- ❖ Pavimentación: Mezclas Cerradas (Stone Mastic Asphalt), Mezclas Abiertas (Gap Graded), Drenantes, Base Asfáltica.
- ❖ Riegos: Matapolvos, Imprimaciones, Riegos de Liga.
- ❖ Tratamientos y Lechadas: Sellos de arena, Tratamientos Superficiales, Slurry Seal, Cape Seal.

- ❖ Otras aplicaciones: Microaglomerados, Asfalto Espumado.

De la anterior clasificación cabe destacar que el más importante uso es sin duda, la utilización del asfalto como ligante en la pavimentación, ya que ningún otro material garantiza en mayor grado la satisfacción simultánea y económica de dos importantes funciones:

- ❖ Impermeabilizar la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra la penetración del agua proveniente de la precipitación.
- ❖ Proporcionar una íntima unión y cohesión entre agregados, capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos. Igualmente mejora la capacidad portante de la estructura, permitiendo disminuir su espesor.

Finalmente, el asfalto le confiere al pavimento una estructura con característica flexible, que permite cierto grado de acomodo sin fisurarse, a eventuales movimientos de las capas subyacentes.

1.2.4 Clasificación del asfalto para pavimentación. Este tipo de asfalto se puede dividir de la siguiente manera ^[13]:

1.2.4.1 Cemento asfáltico. Es el más ampliamente conocido y utilizado; presenta la típica apariencia de material visco-elástico rígido a bajas temperaturas y fluido a altas, por su denominación en inglés se conoce como A.C. (Asphalt Cement) y se obtiene a partir de la refinación del crudo, en la corriente de fondos de las etapas de destilación.

1.2.4.2 Asfaltos líquidos. También denominados asfaltos rebajados o “Cut Backs” están compuestos de una base asfáltica (cemento asfáltico) y un

fluidificante volátil, donde el solvente es agregado con el fin de disminuir la viscosidad del asfalto para poderlo mezclar y trabajar con los agregados.

1.2.4.3 Emulsiones asfálticas. Son un sistema heterogéneo de dos fases inmiscibles, como son el asfalto y el agua, a la que se le incorpora un activador de superficie, tensoactivo o emulsificante de base jabonosa, el cual mantiene en dispersión el sistema de fase continua (agua) y discontinua (diminutos glóbulos de asfalto). Las emulsiones asfálticas deben ser afines a la polaridad negativa o positiva, tomando el nombre de emulsiones aniónicas o catiónicas respectivamente.

1.2.5 Naturaleza reológica del asfalto. La reología es la ciencia que estudia las deformaciones y el flujo de la materia; es un aspecto muy importante de conocer en la industria del asfalto, desde su obtención hasta su aplicación. Es de mencionar que el estudio reológico del asfalto correlaciona la estructura física de sus componentes con su composición química para lograr su flujo característico.

El asfalto es un sistema coloidal en el que la fase dispersa es un conjunto de moléculas en suspensión o micelas (asfaltenos) las cuales se encuentran suspendidas en un líquido aceitoso intermicelar o fase continua (maltenos). De esta manera la agregación de moléculas o micela de asfaltenos puede formar una supermicela y a su vez estas pueden unirse para formar supermicelas gigantes y seguir creciendo hasta convertirse en cristal líquido.

De acuerdo al grado de dispersión del asfalto y sus características de flujo este puede ser:

- ❖ Asfalto sol (newtoniano): es un ligante muy blando cuya fracción de asfaltenos es pequeña comparada con la de los maltenos. Tienen un estado de agregación de asfaltenos tipo micela o supermicela; estos

asfaltos muestran un flujo viscoso sin efectos elásticos y se caracterizan por una alta susceptibilidad térmica.

- ❖ Asfalto sol-gel: su estado de agregación de asfaltenos es tipo supermicela o supermicela gigante; se diferencia del tipo sol por la presencia de cierta deformabilidad elástica, posee una susceptibilidad térmica entre el tipo sol y el gel. Es el estado mas apropiado del ligante en los pavimentos.

- ❖ Asfalto gel (no newtoniano): los asfaltenos presentan un estado de agregación tipo cristal líquido lo que hace que el ligante en general sea muy duro; se caracteriza por una deformabilidad elástica retardada con considerables deformaciones permanentes induciendo esto una baja capacidad cohesiva. Los asfaltos de este tipo tienen una fuerte formación de micelas, flujo complejo y una baja susceptibilidad térmica lo cual no garantiza la durabilidad de la mezcla asfáltica.

1.3 CAUCHO RECICLADO DE LLANTA (CRL)

El CRL es obtenido de las llantas en desuso de los automotores, las cuales de otra manera, no tendrían un destino diferente al de los sitios dispuestos como rellenos municipales o simplemente basureros a cielo abierto, cumpliendo un importante y peligroso papel en la creciente contaminación ambiental que nos afecta actualmente.

Esto se debe a que aproximadamente el 70% de las llantas son incineradas como combustible en hornos de producción panelera y de cemento entre otros, afectando el medio ambiente y la salud pública a causa de las emisiones de contaminantes carcinogénicos y mutagénicos como lo son los compuestos orgánicos volátiles (COV's) y los hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP's), además de otros elementos que causan afecciones al sistema respiratorio y circulatorio.

Por otra parte, si se opta por almacenar las llantas viejas, aparte de la contaminación visual que estas generan, también se observan múltiples inconvenientes como la proliferación de roedores o insectos; dentro de los que se encuentra el mosquito transmisor del dengue y la encefalitis, cuya tasa de reproducción se ha estimado que es 4.000 veces mayor en el agua estancada de una llanta que en la naturaleza misma.

1.3.1 Composición química de las llantas. La llanta está compuesta principalmente de tres productos: caucho (natural y sintético), un encordado de acero y fibra textil. A su vez, el caucho usado en la fabricación de neumáticos está compuesto por un grupo de polímeros (compuestos químicos de elevado peso molecular) entre los que se cuentan el polisopreno sintético, el polibutadieno y el más común que es el estireno-butadieno, todos basados en hidrocarburos. Ver *tabla 1*.

Se agregan además, otros materiales al caucho para mejorar sus propiedades, tales como: suavizantes, que mejoran el manejo del caucho antes de la vulcanización; óxido de Zinc y de Magnesio, comúnmente denominados activadores, que son mezclados para reducir el tiempo de vulcanización de varias horas a pocos minutos; 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.

Aunque suelen variar según el tipo de neumáticos y el país de fabricación, los diferentes elementos químicos que componen un neumático se muestran en la *tabla 2* junto a sus porcentajes respectivos

En el proceso de vulcanizado, en la fabricación de la llanta, la goma virgen es mezclada con otros productos (cauchos sintéticos, azufre y óxidos) y llevada a

temperaturas que provocan cambios en su estructura química interna y en sus propiedades físicas.

Tabla 1. Composición y características de los diferentes tipos de llantas

MATERIAL	LLANTAS AUTOMÓVILES Y CAMIONETAS	LLANTAS CAMIONES Y MICROBUSES
Caucho natural	14 %	27 %
Caucho sintético	27%	14%
Negro de humo	28%	28%
Acero	14 - 15%	14 - 15%
Fibra textil, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc.	16 - 17%	16 - 17%
Peso promedio:	8,6 Kg	45,4 Kg.
Volumen	0.06 m ³	0.36 m ³

Fuente: Rubber Manufacturers Association^[25]

Estos cambios son, en la práctica, irreversibles. Posteriormente, la goma del neumático, al estar sometida a ambientes agresivos como el roce con el pavimento, se desgasta y degrada.

El roce constante con el aire causa a su vez la oxidación del material, todo lo cual impide que la goma granulada recuperada a partir de neumáticos usados alcance los niveles de calidad de la goma virgen original. Este es el principal motivo por el cual no es posible reciclar neumáticos para utilizarlos como materia prima para producir nuevos neumáticos.

1.3.2 Influencia del CRLI en el asfalto modificado. El caucho de llanta se ha convertido en un elemento útil y económico en la elaboración de mezclas asfálticas gracias al creciente aumento de llantas desechadas en áreas metropolitanas. Algunas ventajas y desventajas del uso del CRLI en las mezclas asfálticas se presentan a continuación ^[2]. Entre las ventajas están:

- ❖ El caucho molido al ser vulcanizado para resistir calor y sobrecalentamiento elimina los problemas encontrados con el polímero virgen.

- ❖ No presenta solubilidad, a diferencia del caucho natural este no cambia dentro del cemento asfáltico al ser sobrecalentado.
- ❖ Al ser mezclado con el cemento asfáltico a altas temperaturas atrae componentes livianos de este último hasta producir una partícula hinchada que se enlaza dentro de la matriz del ligante, generando un manto asfalto-caucho más resistente al fisuramiento.

Tabla 2. Análisis químico de la llanta

ELEMENTO	COMPOSICIÓN
Carbono (C)	70%
Hidrogeno (H)	7%
Azufre (S)	1..3%
Cloro (Cl)	0,2-0, 6%
Hierro (Fe)	15%
Oxido de Zinc (ZnO)	2%
Dióxido de Silicio (SiO ₂)	5%
Cromo (Cr)	97 ppm
Níquel (Ni)	77 ppm
Plomo (Pb)	60-760 ppm
Cadmio	5-10 ppm
Talio	0,2-0,3 ppm

Fuente: Combustibles alternativos, Holderbank 1997. ^[25]

Finalmente el CRLL posee valiosos componentes que pueden contribuir al buen desempeño del asfalto. Algunos de estos son:

- ❖ Negro de humo: este componente se destaca por su acción específica contra el desgaste de las llantas al contacto con la superficie, permitiendo quintuplicar la duración de la llanta. Considerando como un antioxidante, este componente reduce el desgaste de la llanta al incrementar la durabilidad del caucho. En la mezcla asfáltica ha demostrado aumentar las propiedades de refuerzo del ligante y ayudar a disminuir el envejecimiento.

- ❖ Antioxidantes: compuestos que retardan el deterioro del caucho natural causado por la oxidación. Algunas de las sustancias usadas son los estabilizadores del caucho sintético, principalmente de los polímeros de butadieno, en el momento de la preparación; el CRLC contiene más del 20% de este compuesto.
- ❖ Aminas: Son adicionadas durante el proceso de vulcanizado y están estrechamente relacionadas con los de antiadherencia. Las aminas aromáticas evitan el endurecimiento progresivo del caucho, el aumento de su fragilidad y la pérdida de la elasticidad.
- ❖ Aceites aromáticos: Estos son similares a los agentes rejuvenecedores los cuales prolongan la vida del asfalto-caucho.

Las desventajas del CRLC en el asfalto son:

- ❖ La captación de aceites del cemento asfáltico por parte de las partículas de caucho afecta adversamente las propiedades de cohesividad y adhesividad del ligante, haciendo que disminuya la propiedad de la mezcla a unirse con las superficies de la estructura del pavimento o con los agregados. Este problema se puede solucionar usando ligantes más blandos ricos en aceite, sin embargo, la mezcla podría ser muy blanda y delicada.
- ❖ Al modificar el ligante con CRLC la mezcla resultante experimenta un incremento viscosidad haciéndola no apta para ser usada en ciertas aplicaciones que requieren que este ligante sea bien fluido. Este problema se puede solucionar ablandando la mezcla asfalto-caucho con el uso de kerosén.

1.3.3 Proceso de obtención del CRLC. Existen varias maneras de producir el CRLC, cada proceso debe evaluarse según los costos, distribuciones de tamaño

de partícula y morfología dependiendo del producto final que se quiera obtener. Estos procesos requieren una cantidad suficiente de llantas en desuso y deben garantizar que el CRLI este libre de aceros, fibras y otros materiales que afecten negativamente la calidad del producto.

1.3.3.1 Obtención por reencauche de llantas. Es el proceso más común y más simple para producir CRLI. Los neumáticos a reencauchar (por lo general de camiones y autobuses) son sometidos a un proceso de preparación en el que son raspados por cuchillas, produciéndose de esta manera pequeños trozos de caucho. Las partículas resultantes son de varios tamaños y formas, aunque en general se puede decir que son redondas con diámetros entre 0.3 y 2.5 cm. En este proceso la presencia de metal o fibra en los pequeños trozos de producto final es casi nula; lo que es muy bueno, sin embargo, el volumen y continuidad del producto total obtenido es limitado debido al bajo porcentaje que se recupera por llanta y al número de llantas reencauchadas.

1.3.3.2 Obtención por molienda ambiental. Se lleva a cabo en molinos abiertos como los molinos de martillo, los cuales operan a temperatura ambiente y en donde la reducción de las partículas es cumplida por acciones de rasgado, desgarre o aplastamiento. En este proceso después de pasar por una serie de molinos abiertos, el material es llevado por una cinta transportadora hacia un separador magnético, en donde se le retira cualquier alambre u otras partículas de acero. También se debe contar con un sistema para eliminar tejidos y fibras presentes en la llanta, así como piedras o demás materiales inertes. La obtención de CRLI por molienda ambiental es bastante eficaz siendo el método más antiguo utilizado para producir material grueso de caucho y normalmente el menos costoso para producir CRLI en tamaños superiores a la malla 40. Un molino comúnmente utilizado es el conocido como 'cracker', el cual consiste en dos rodillos con estrías superficiales los cuales giran a diferentes proporciones de velocidad logrando una acción de molido con un alto grado de eficacia.

1.3.3.3 Obtención por molienda criogénica. En este proceso grandes trozos de llanta se llevan hasta temperaturas criogénicas por el uso de nitrógeno líquido (LN₂). Esto causa que el caucho se ponga muy quebradizo y sea fracturado fácilmente en un molino de martillo. La superficie resultante es muy limpia, lisa y con bordes rectos, con lo que se obtiene una menor área superficial de partícula si se le compara con la obtenida en la molienda ambiental.

Además de las operaciones de enfriamiento y molienda también es necesario un sistema de separación de fibra; en general se puede decir que el costo de capital de inversión respecto al proceso ambiente es menor, porque se necesitan menos molinos y equipos relacionados con el manejo del caucho, sin embargo, los costos de operación y en especial debido al costo del nitrógeno líquido, hace que los productos criogénicos sean más costoso que el CRLl producido en proceso ambiente, sobre todo para tamaños de partículas mas finos que la malla 40 (425 u.m).

1.3.3.4 Obtención por molienda húmeda. En este proceso el caucho después de una reducción inicial entre malla 10 y 20, es pasado junto con un liquido a un molino de bolas produciéndose de esta manera unas partículas muy uniformes con gran área superficial.

En este sistema es indispensable un equipo adicional de secado para controlar el contenido de humedad, el cual no se requería para los dos procesos anteriores; con esta tecnología se puede obtener CRLl uniforme y de buena calidad.

1.4 COMPATIBILIZANTES

Estos elementos han venido siendo empleados muy recientemente en la tecnología de modificación de asfalto-caucho y en particular con CRLl; a nivel mundial se carece de investigaciones profundas en este campo y lo que se conoce es guardado celosamente por las compañías poseedoras de patentes.

La función de los compatibilizantes es acondicionar el caucho en especial su superficie para asegurar una mejor interacción de este con el asfalto, otro aspecto importante de los compatibilizantes es que evita la absorción, por parte del caucho, de aceites aromáticos presentes en el medio maltenico del asfalto, impidiendo el envejecimiento prematuro del bitumen.

1.5 PROCESOS DE MODIFICACION DEL ASFALTO

El CRLI puede ser incorporado en las mezclas asfálticas por medio de dos métodos diferentes denominados proceso húmedo y proceso seco ^[26].

1.5.1 Proceso por vía seca. El proceso seco es cualquier método donde el CRLI es adicionado directamente a la mezcla asfáltica caliente, siendo usualmente mezclado con los agregados antes de adicionar el cemento asfáltico. Este proceso se lleva a cabo cuando se quiere usar el CRLI como un agregado en la mezcla asfáltica, por lo general, como un sustituto de una pequeña parte del agregado fino, el cual puede estar entre el 1 y 3 % del peso total de los agregados en la mezcla. A diferencia del proceso húmedo, este proceso no requiere un equipo especial, solo un sistema de alimentación que proporcione la cantidad adecuada de CRLI y que sea suministrada en el momento indicado para que se mezcle con los agregados cuando estos alcancen cierta temperatura y antes de que el ligante sea adicionado.

Las dos tecnologías más comunes en Estados Unidos para el uso del CRLI por la vía seca son la tecnología PlusRide, la tecnología Genérica o sistema TAK y otra tecnología muy popular es la que emplea granulometrías convencionales, la cual fue desarrollada en España y es actualmente usada en muchos países.

1.5.1.1 PlusRide. Esta tecnología fue originalmente desarrollada en Suecia a finales de los años 1960, y registrada en los Estados Unidos bajo el nombre comercial de PlusRide por la firma Enviro Tire. El CRLI es agregado a la mezcla

asfáltica en proporciones que van desde 4.2 mm a 2.0 mm (tamiz No 10). El contenido de vacíos con aire en la mezcla asfáltica debe estar entre 2 y 4 %, y por lo general son obtenidos con contenidos de ligante entre 7.5 a 9 %.

1.5.1.2 Genérica. Esta tecnología fue desarrollada por el Dr. Barry Takallou a finales de los años 1980 para producir mezclas asfálticas en caliente con granulometría densa. Este concepto emplea tanto el CRLI grueso como fino para emparejar la granulometría de los agregados obteniendo una mezcla asfáltica mejorada. En este proceso la granulometría del CRLI es ajustada para acomodar la granulometría de los agregados. A diferencia del PlusRide, la granulometría del CRLI se divide en dos fracciones en la que la parte fina se encarga de interactuar con el cemento asfáltico mientras la parte gruesa entra a comportarse como un agregado elástico en la mezcla asfáltica.

En este sistema, el contenido de CRLI no debe exceder el 2 % del peso total de la mezcla para capas de rodadura.

1.5.1.3 Convencional. Esta tecnología fue desarrollada en España para usar el CRLI en la mejora de mezclas asfálticas empleando granulometrías convencionales que no implican consumos elevados de cemento asfáltico, pero que aportan menos cantidad de caucho, aproximadamente un 2% del peso total de los agregados. Estas mezclas asfálticas han sido evaluadas dinámicamente en el laboratorio y colocadas en la vía con buenos resultados.

El proceso seco puede ser usado para mezclas asfálticas en caliente en granulometrías densas, abiertas o discontinuas. No puede ser usado en otro tipo de aplicaciones como mezclas en frío, sellos, o tratamientos superficiales por ser un proceso en el que no se modifica el ligante.

1.5.2 Proceso por vía húmeda. En el proceso húmedo, el CRLI es mezclado con el cemento asfáltico para producir una mezcla modificada asfalto-caucho que es usada de la misma manera que un ligante modificado.

El cemento asfáltico que ha sido modificado con CRLI es llamado AMC y es el resultado de la interacción del CRLI con el ligante. Cuando el cemento asfáltico y CRLI son mezclados, el caucho interacciona hinchándose y ablandándose por la absorción de aceites aromáticos, siendo necesaria la utilización de un catalizador compatibilizante para darle un pre-tratamiento al caucho mejorando la estabilidad de la mezcla. El grado de modificación del ligante depende de muchos factores entre los cuales se encuentran el tamaño, textura y proporción del CRLI, tipo del cemento asfáltico, tiempo y temperatura de mezclado, grado de agitación mecánica durante la mezcla, el componente aromático del cemento asfáltico y el uso de otros aditivos.

Entre más usadas en el proceso húmedo están: el mezclado por bachadas o tecnología McDonald, mezclado continuo y mezclado terminal.

1.5.2.1 Tecnología por bachadas. Esta metodología consiste en una producción de mezclado de asfalto y caucho por bachadas. Las primeras aplicaciones en el proceso húmedo fueron bachadas y se basaron en la tecnología McDonald, que fue desarrollada a comienzos de los años 1960 por Charles McDonald, y patentada en los años 1970 por la Arizona Refining Company (ARCO). Hoy en día existen numerosas patentes relacionadas con la tecnología McDonald, muchas de las cuales ya han expirado y otras cuantas todavía se encuentran vigentes.

1.5.2.2 Tecnología continúa. Este proceso consiste en un sistema de producción de mezclado de asfalto y caucho de manera continua. La tecnología de mezclado en continuo fue desarrollada en Florida a finales de los años 1980 y es conocida como Florida Wet Process. En este proceso, un tamaño fino 0.18 mm (tamiz No 80) de CRLI es mezclado con el cemento asfáltico en un proceso continuo. La tecnología de Florida se diferencia del proceso McDonald en varios aspectos: emplea bajos porcentajes de CRLI, entre 8 y 10%, el tamaño de la partícula de caucho requerida es más pequeña, disminuye la temperatura y el tiempo de mezclado. El proceso húmedo de Florida aún no ha sido patentado.

1.5.2.3 Tecnología terminal. La tecnología de mezclado terminal es un proceso húmedo que brinda la capacidad de mezclar o combinar el cemento asfáltico con el CRLC y conservar el producto durante amplios períodos de tiempo. Este proceso asfalto-caucho tiene una amplia duración de almacenamiento y puede ser mezclado en la refinería donde se produce el cemento asfáltico por cualquiera de las dos tecnologías, continua o por batchadas.

Las aplicaciones del cemento asfáltico modificado con CRLC mediante el proceso húmedo ha sido usado ampliamente como ligante en la reparación de grietas y sello de juntas, tratamientos superficiales, membranas retardantes de fisuras y en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Las etapas metodológicas de este trabajo se muestran en el diagrama de bloques de la *figura 1*.

2.1 MATERIALES Y REACTIVOS EMPLEADOS.

- ❖ Recipiente de modificación
- ❖ Termómetro de 360°C
- ❖ Asfalto del complejo industrial de Barrancabermeja
- ❖ Caucho reciclado de llanta (CRLI)
- ❖ Compatibilizantes
- ❖ Prueba ataque químico: alcohol, ácido sulfúrico, gasolina, soda cáustica, tolueno, amoníaco, varsol, tetracloruro de carbono

2.2 EQUIPOS EMPLEADOS.

En el desarrollo de este proyecto se emplearon equipos especializados en la caracterización y tratamiento de materiales asfálticos y poliméricos, los cuales hacen parte de distintos laboratorios de ingeniería química e ingeniería civil.

- ❖ Horno de calentamiento (Cole Parmer)
- ❖ Balanza electrónica analítica de 0,001g de precisión (Cohaus)
- ❖ Penetrómetro (Cole Parmer)
- ❖ Equipo de punto de ablandamiento (anillo y bola)
- ❖ Ductilómetro
- ❖ Equipo de punto de chispa (copa abierta de cleveland)
- ❖ Viscosímetro-Reometro (Brookfield DV II+I)
- ❖ Equipo de tamizado (Taylor)

- ❖ Agitador (MLW MR 25)
- ❖ Equipo de estabilidad al almacenamiento
- ❖ Equipo de recuperación elástica por torsión
- ❖ Balanza termogravimetrica (TGA)
- ❖ Plancha de Calentamiento

2.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS

En Colombia los materiales utilizados en la construcción de carpetas asfálticas deben cumplir con las normas establecidas por organismos tales como: Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y/o American Society for testing and materials (ASTM) [3, 7].

Con el fin de precisar las particularidades de los elementos utilizados para esta investigación, se desarrollaron distintos ensayos para la determinación de ciertas propiedades en cada material. En la *tabla 3* se muestran los valores de las propiedades permisibles según el INVIAS.

2.3.1 Caracterización del asfalto. El cemento asfáltico que se empleó fue obtenido de la refinería de ECOPETROL Barrancabermeja que es un asfalto resultante de la mezcla de fondos de vacío, con distintas cantidades de gasóleo para ajustar sus características físicas.

Se realizaron las siguientes pruebas teniendo en cuenta la representatividad e importancia de las mismas para la investigación.

2.3.1.1 Peso Específico (INV. E-707). Es la relación entre el peso de un volumen dado del material a 25° C (77° F) o a 15.6 ° C (60° F) y el peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura; este ensayo se realiza empleando un picnómetro.

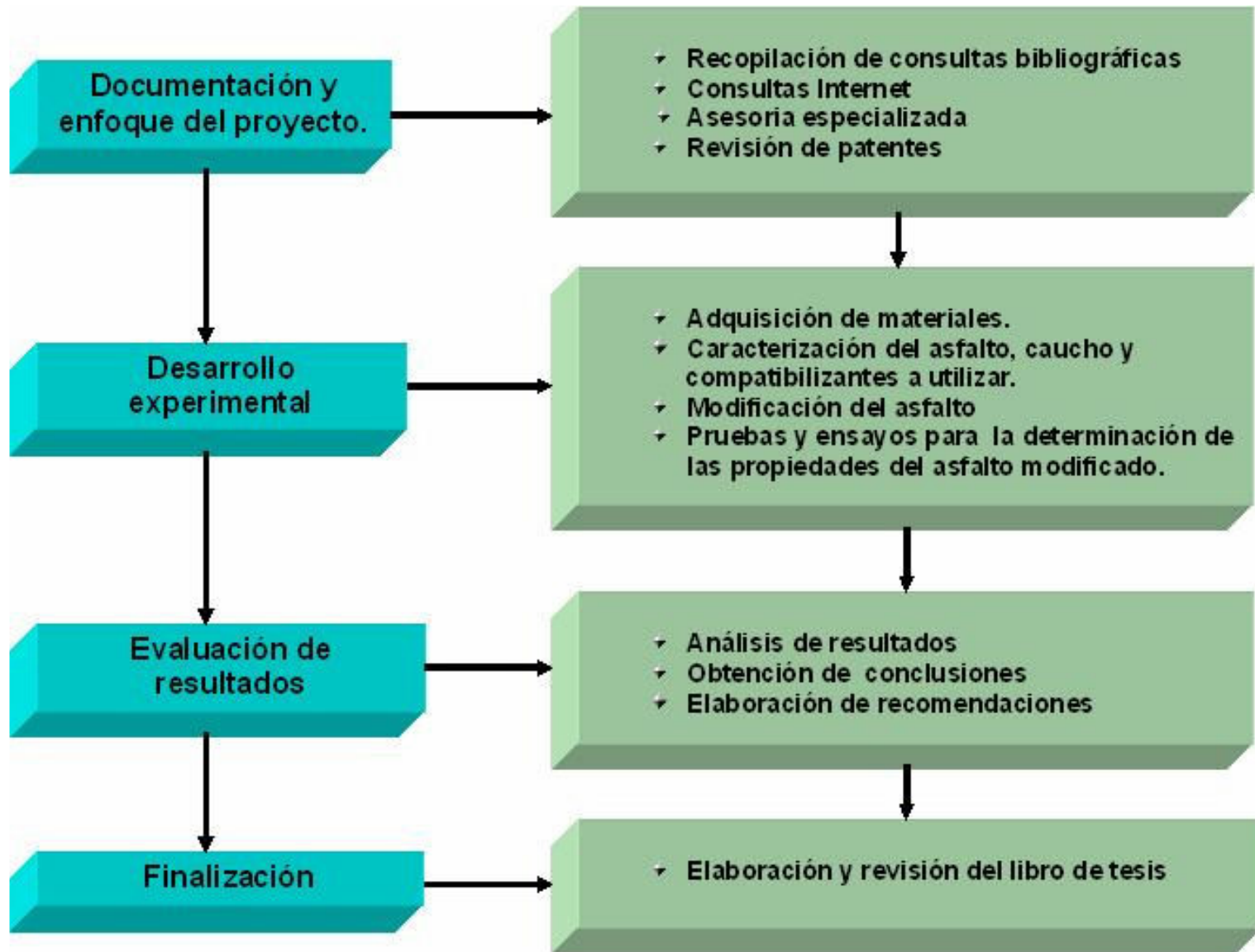


Figura 1. Etapas metodológicas del proyecto

Tabla 3. Propiedades permisibles para asfalto según su penetración

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	NORMA DE ENSAYO INV.	PENETRACIÓN			
			60-70		80-100	
			mín	máx	mín	máx
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	0.1 mm	E-706	60	70	80	100
Índice de penetración	-	E-724	-1	+1	-1	+1
Viscosidad absoluta (60° C)	P	E-716	1500		1000	
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min)	cm	E-702	100	-	100	-
Solubilidad en tridoroetileno	%	E-713	99	-	99	-
Contenido de agua	%	E-704	-	0.2	-	0.2
Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland	°C	E-709	230	-	230	-
Pérdida por calentamiento en película delgada (163°C, 5 h)	%	E-721	-	1.0	-	1.0
Penetración del residuo luego de la pérdida por calentamiento, en % de la penetración original	%	E-706	52	-	48	-

2.3.1.2 Penetración (INV. E-706). La consistencia o dureza de un asfalto hace referencia a la estabilidad, durabilidad o solidez de un asfalto; el ensayo de penetración se utiliza para medir esta propiedad y para clasificar los cementos asfálticos en diferentes clases.

2.3.1.3 Punto de Ablandamiento (INV. E-712). El asfalto es un material termoplástico, por lo que no presenta un punto de fusión propiamente dicho, por lo tanto, el punto de ablandamiento es la temperatura a la que el asfalto alcanza un determinado estado de fluidez.

2.3.1.4 Ductilidad (INV. E-702). La ductilidad es la propiedad que tienen los asfaltos de mantenerse coherentes bajo grandes deformaciones inducidas por el

tránsito; mide la resistencia a la ruptura por medio del alargamiento de una probeta de cemento asfáltico. Los asfaltos más dúctiles son más adhesivos.

2.3.1.5 Punto de Chispa (INV. E-709). El punto de chispa (flash point) es la temperatura a la cual el asfalto puede ser calentado, sin peligro a que se inflame en presencia de una llama. Esta temperatura es mas baja que la necesaria para que el material entre en combustión, por lo tanto, este análisis sirve como prueba de seguridad en la operación de las plantas de mezcla de asfalto en caliente.

2.3.1.6 Viscosidad absoluta (INV. E-716). La viscosidad es el grado de fluidez o plasticidad de un asfalto a una temperatura particular. La medición de la viscosidad busca determinar el grado de fluidez del asfalto, en el intervalo de temperaturas de operación y aplicación de una mezcla asfáltica en caliente y se puede medir mediante el viscosímetro Brookfield.

2.3.1.7 Envejecimiento Termoxidante en Película Fina o TFOT (Thin Film Oven Test) (INV. E-721). El ensayo de película delgada o ensayo TFOT es un procedimiento que trata de simular en el laboratorio, las condiciones de un endurecimiento del asfalto durante el mezclado en la planta. Este método se refiere a la determinación del efecto del calor y del aire sobre una película de materiales asfálticos semisólidos. Los efectos de este procedimiento se determinan a partir de la medición de ciertas propiedades seleccionadas del asfalto, antes y después del ensayo.

2.3.2 Caracterización del caucho reciclado de llantas (CRLI). Al ser el CRLI un caucho vulcanizado, para su caracterización se tomaron en cuenta algunos procedimientos utilizados en el análisis de sustancias de carácter polimérico; para tal fin, se realizaron las siguientes pruebas teniendo en cuenta que este es un material de tipo 'crosslinked' ^[28].

2.3.2.1 Resistencia de polímeros a agentes químicos (ASTM. D-543). Este método de prueba abarca la comprobación de todo material plástico incluidos termoplásticos, moldeados en frío o en caliente y productos resinosos laminados para la comprobación de resistencia a los reactivos químicos. Este método de prueba incluye el suministro de información en cuanto a cambios en el peso, dimensiones, apariencia, y propiedades de fuerza. Se deben especificar los reactivos utilizados para poder establecer resultados en una base comparable. Los experimentos deben ser hechos para varios tiempos de exposición y temperaturas establecidas.

2.3.2.2 Termogravimetría (TGA) (ASTM. E-1131). Este método de prueba viene dado por una técnica general que incorpora la termogravimetría para determinar la cantidad de material muy volátil, el material medianamente volátil, el material combustible y el contenido de cenizas de los compuestos. Este método será útil en análisis de composición, es aplicable a sólidos y líquidos y abarca temperaturas típicas de hasta 1000°C pudiéndose determinar composiciones individuales entre 1 y 100% en peso.

2.3.3 Caracterización de los compatibilizantes. Las propiedades de los compatibilizantes empleados en la elaboración de los asfaltos modificados fueron suministradas por sus respectivos productores.

2.4 DISEÑO DE LA MODIFICACIÓN ASFALTO-CRLL (AMC).

Un AMC debe ser diseñado en función de lo que se requiera según el destino o aplicación en que vaya a ser empleado, en nuestro caso en particular fue concebida la idea del diseño del AMC para ser usado como ligante en la construcción de carpetas asfálticas de uso común en calles y carreteras del país. Por tal motivo en la elaboración del AMC se tuvieron como objetivos:

- ❖ Disminuir la susceptibilidad térmica a temperaturas elevadas

- ❖ Aumentar la cohesión interna
- ❖ Mejorar la flexibilidad y la elasticidad a bajas temperaturas
- ❖ Mejorar el comportamiento a la fatiga
- ❖ Mejorar la adhesividad entre agregados y ligante
- ❖ Reducir el agrietamiento de los pavimentos a bajas temperaturas

2.4.1 Variables de proceso en la elaboración del AMC. Se procedió a seleccionar las variables que intervienen en la modificación de acuerdo a su grado de influencia y a la capacidad de manipulación, optando en conclusión por las siguientes:

- ❖ Temperatura de modificación
- ❖ Tiempo de modificación
- ❖ Tamaño de partícula CRL
- ❖ Contenido (% en peso) de CRL en el AMC

Basados en la revisión de material bibliográfico y en diferentes estudios realizados con AMC se tomaron en cuenta los rangos de trabajo de las diferentes variables del proceso, como se ilustra en la *tabla 4*.

Para la experimentación se utilizó un reactor batch atmosférico con sistema calentamiento eléctrico a nivel de laboratorio. El agitador utilizado fue de tipo propulsor marino y se empleó a una velocidad constante de 200 revoluciones por minuto (RPM) en la realización de todas las modificaciones. ^[6]

2.5 DISEÑO DE LA MODIFICACIÓN ASFALTO-CRL-COMPATIBILIZANTE (AMCA).

Una vez concluidos los experimentos asfalto-CRL se procedió a implementar el uso de compatibilizantes en las mezclas con el fin de evaluar algunas características del AMC en cuanto a aspectos como:

- ❖ Interacción asfalto-CRLL
- ❖ Estabilidad
- ❖ Envejecimiento
- ❖ Elasticidad

Tabla 4. Diseño de experimentos del proceso de modificación asfalto-CRLL

VARIABLES	INTERVALOS	SEGMENTACIÓN DEL INTERVALO	NIVELES DE VARIABLE
Temperatura de modificación (°C)	165-185	20	2
Tiempo de modificación (min)	45-75	15	3
Contenido de CRLL en el AMC (% en peso)	4-12	4	3
Tamaño de partícula CRLL (Nº tamiz)	50-200	150	2
Total experimentos			36

Para el desarrollo de esta parte experimental de la investigación y búsqueda de la mejor mezcla se utilizaron tres tipos diferentes de compatibilizantes, para así seleccionar el que ofreciera resultados superiores para las características antes mencionadas, ellos son:

- ❖ **Compatibilizante tipo I:** Aceite liviano
- ❖ **Compatibilizante tipo II:** Aceite medio
- ❖ **Compatibilizante tipo III:** Aceite pesado

2.5.1 Acondicionamiento del CRLL. Seleccionados los compatibilizantes, estos fueron usados cada uno por aparte en la adecuación del CRLL previo a su adicionamiento al asfalto para conformar el AMCA. El CRLL inicialmente se llevó a una etapa de absorción del compatibilizante en donde se utilizó un montaje de laboratorio similar al descrito en la sección 2.4.1 aunque sin calentamiento, con agitación constante de 280 RPM y por un periodo de tiempo de 90 min.,

posteriormente se sometió a un proceso de secado en horno durante un lapso de 70 min.

Una vez acondicionado el CRLL se hizo una nueva experimentación con base a los resultados obtenidos previamente, para obtener el asfalto modificado con caucho acondicionado (AMCA) como se muestra en la *tabla 5*.

Tabla 5. Diseño de experimentos del proceso de modificación asfalto-CRLL-compatibilizantes

VARIABLE	INTERVALO	SEGMENTACIÓN DEL INTERVALO	NIVELES DE VARIABLE
Temperatura de modificación (°C)	165	-	1
Tiempo de modificación (min)	45	-	1
Contenido de CRLL en el AMC (% en peso)	2-14	4	4
Tamaño de partícula CRLL (Nº tamiz)	50	-	1
Compatibilizante	Liviano – pesado	cAu	3
Total experimentos			12

2.6 PROCESO DE MODIFICACIÓN DE AMC Y AMCA.

En la figura 2 se muestra el diagrama de bloques del proceso utilizado en la obtención del AMC y AMCA

2.7 PARÁMETRO DE SELECCIÓN DEL AMC ÓPTIMA.

En la determinación de la mezcla óptima para nuestra investigación se precisaron dos parámetros fundamentales los cuales son, la viscosidad cinemática y la estabilidad al almacenamiento

2.7.1 Viscosidad dinámica. Esta es una de las principales propiedades que se debe tener en cuenta como parámetro en la selección adecuada del asfalto modificado. En este trabajo nos centramos en encontrar un AMC apto para ser utilizado en infraestructura vial empleando equipos convencionales, para tal fin hay que tener muy presente que la temperatura de mezcla normal del ligante con los agregados y aditivos es de 180 °C, y según las especificaciones del INVIAS, la viscosidad del asfalto a esta temperatura debe estar comprendida en el intervalo de 150-190 cP.

2.7.2 Estabilidad al almacenamiento. Esta propiedad es importante determinarla en los asfaltos modificados, en particular con polímeros, cuando estos son utilizados en la construcción de carreteras. Durante el almacenamiento a temperaturas elevadas se pueden producir, en los ligantes modificados, fenómenos de sedimentación o separación de fases, enriqueciéndose el ligante en polímeros en la parte inferior o superior del tanque en función de sus densidades respectivas. Este fenómeno puede ser propiciado por dispersión incorrecta del polímero en el ligante o por incompatibilidad entre ambos.

Para evaluar esta prueba se efectúa sobre las dos submuestras tratadas tope y fondo, el ensayo de punto de ablandamiento anillo y bola y se expresa como la diferencia de temperaturas en grados centígrados, la cual no debe ser superior a 5 °C, según normas INVIAS, para AMC sea aceptado.

2.8 CARACTERIZACIÓN DE AMC OBTENIDO

Finalmente después de obtener el AMC que cumplió los parámetros de selección de mezcla óptima, se procedió a evaluar las propiedades físicas básicas con el fin de establecer la calidad del producto obtenido.

Entre las propiedades evaluadas algunas son las mismas que se determinaron en la caracterización del asfalto original:

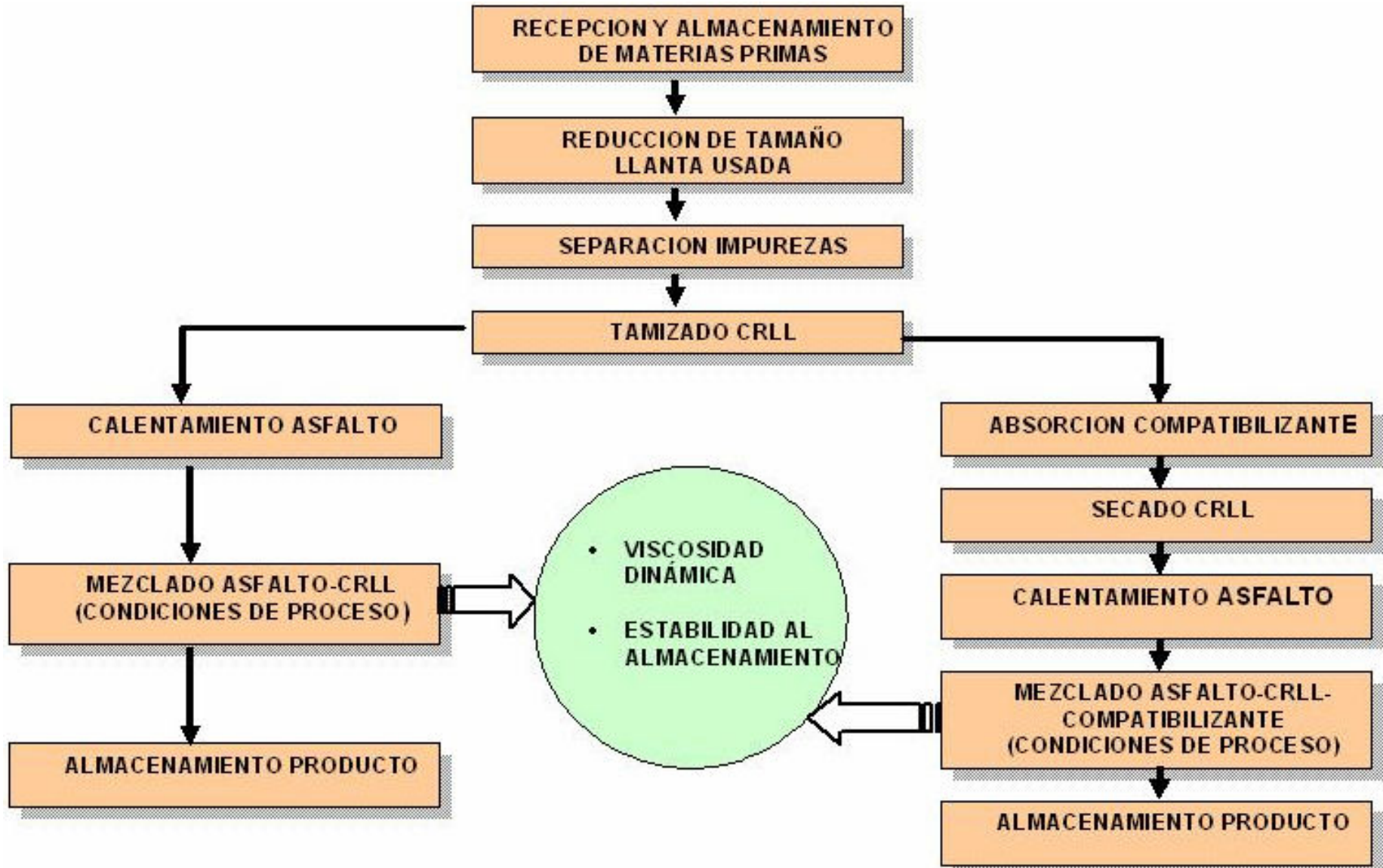


Figura 2. Diagrama de bloques del proceso utilizado para la obtención del AMC

- ❖ Peso Específico.
- ❖ Penetración
- ❖ Punto de Ablandamiento
- ❖ Punto de Chispa.
- ❖ TFOT
- ❖ Viscosidad Cinemática.
- ❖ Ductilidad.

2.8.1 Estabilidad al almacenamiento (INV. E-726). Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la estabilidad al almacenamiento que presentan los asfaltos modificados, debido a que a temperaturas elevadas se pueden producir, en los ligantes modificados, distintas fases inestables.

2.8.2 Recuperación elástica por torsión (INV. E-727). Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para determinar el grado de elasticidad que presentan los asfaltos modificados en particular con polímeros, de aplicación en construcción de carreteras. La incorporación al ligante de algunos tipos de polímeros proporciona a aquél una elasticidad mayor que la que presenta sin el polímero.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CARACTERIZACIÓN CRL

3.1.1 Granulometría del caucho. El CRL se tamizo y se obtuvo su clasificación según la distribución de tamaño de partícula, como se observa en la *figuras 3* así como en el *anexo A (Tabla 6 y figura 17)*.

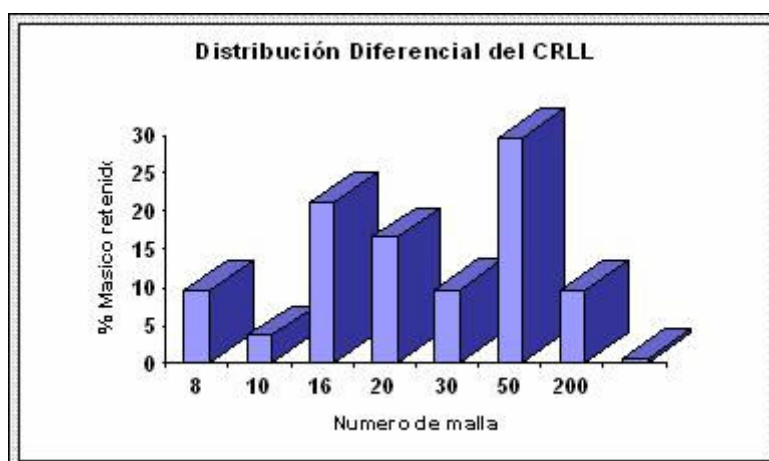


Figura 3. Distribución diferencial de tamaño de partícula de CRL

Se pudo determinar que el tamaño medio de partícula de CRL fue de 0.595 mm correspondiente al tamiz N° 30 por lo cual se alcanzo un mayor acumulamiento de materia en el tamiz N° 50, esto indica un resultado similar al trabajo desarrollado por otras entidades como el IDU en Colombia y CALTRANS en USA [2]. De manera general se aprecio una tendencia en los tamaños de partícula del material empleado, que indica la presencia de un mayor porcentaje de gruesos en comparación con los finos presentes.

3.1.2 Resistencia del caucho a agentes químicos. Esta prueba se aplico para determinar el grado de resistencia y/o compatibilidad del CRL con algunas sustancias químicas comunes, los resultados se muestran en el *anexo A (Tabla 7)*.

El CRLI presenta una estructura de tipo polímero entrecruzado (crosslinked) de fuertes enlaces entre sus moléculas ^[27], lo que hace imposible que este material pueda ser solubilizado completamente por las sustancias químicas utilizadas en esta prueba, sin embargo, el ácido sulfúrico atacó al CRLI causando algún desprendimiento de materia, mientras el etanol y el amoníaco no produjeron ningún cambio, las demás sustancias ocasionaron un hinchamiento al material probado lo cual es algo esperable debido a la afinidad del CRLI con los hidrocarburos.

3.1.3 Análisis térmico del CRLI (TGA). Se efectuó un análisis de componentes para el CRLI mediante la técnica termogravimétrica, obteniéndose los resultados mostrados en el *anexo A (Figuras 18 y 19)*

Del análisis termogravimétrico se observaron dos cambios relevantes en la curva de pérdida de masa, los cuales delimitan tres zonas principales correspondientes a elementos volátiles, mezcla de cauchos-negro de humo y cenizas ^[20]. Teniendo en cuenta lo anterior, se pudo elaborar una aproximación cuantitativa de la composición del CRLI mostrada en el *anexo A (Tabla 8)*

También se pudo verificar la existencia de la mezcla de caucho natural y sintético en el CRLI lo cual se evidenció en la comparación realizada con otros cauchos, en donde la tendencia de la zona correspondiente en el CRLI presentó una degradación a temperaturas intermedias entre el caucho natural y el sintético.

3.2 CARACTERIZACIÓN ASFALTO

Previo a la ejecución de la modificación se realizó la de determinación de las características físicas y químicas del asfalto original procedente de ECOPETROL-Complejo Industrial Barrancabermeja (GCB), *anexo A (Tabla 9)*.

3.3 CARACTERIZACION DE COMPATIBILIZANTES

Se obtuvo información sobre algunas propiedades fisicoquímicas de interés de los compatibilizantes a emplear ^[8], ver *anexo A (Tablas 10, 11 y 12)*

3.4 OBTENCIÓN DE LOS ASFALTOS MODIFICADOS ÓPTIMOS

Teniendo en cuenta el parámetro de selección de viscosidad dinámica se realizaron las curvas reológicas en el reómetro Brookfield DV-III+, para cada especificación contenida en el diseño de experimentos y elaborada previamente en el laboratorio.

Se partió de la curva reológica del asfalto Barrancabermeja, que fue la base sobre la cual se realizó la experimentación y sirvió como permanente referente en el desarrollo del proyecto y puede apreciarse en el *anexo A (Figura 20)*

Para claridad en la presentación de los resultados posteriores se utilizó una nomenclatura de tres dígitos para designar cada especificación de asfalto modificado realizada; el primero de ellos hace referencia a la temperatura de modificación en grados centígrados (no debe confundirse con la temperatura de medición reológica a la cual se determinan las viscosidades dinámicas en el reómetro), el segundo al % en peso de CRLC adicionado al asfalto y el tercero al tiempo de modificación en minutos, además, en las figuras de curvas reológicas se incluyó una región delimitada por líneas discontinuas horizontales dentro de la cual deben converger los AMC a 180 °C, para que cumplan con el parámetro de viscosidad

3.5 ASFALTO-CRLC (AMC).

Se comenzó la realización de experimentos con la modificación de asfalto a partir del CRLC previamente clasificado como se propuso en la *tabla 4*.

3.5.1 Curvas reológicas AMC malla 50. De este análisis de viscosidad que puede apreciarse en el *anexo A (Figuras 21, 22 y 23)*, se obtuvieron resultados donde se observó que existe un cambio sustancial de viscosidad a medida que varía el contenido de CRLI en el AMC, manteniéndose una proporcionalidad directa.

3.5.1.1 Comportamiento de las variables de proceso. Se realizó un análisis de tendencia para determinar la influencia de cada una de las variables de elaboración del AMC con respecto a la viscosidad dinámica medida a 180 °C.

Se analizó el comportamiento de los AMC tomando como parámetro la temperatura de modificación como se muestra en las *figuras 4 y 5*.

Contrario a la variable % en peso de CRLI, el tiempo de mezclado no tuvo una clara tendencia de comportamiento en relación con la viscosidad, también se apreció que las diferencias entre los valores de viscosidad cinemática son relativamente pequeñas para los tres tiempos de mezclado utilizados, cuando se dejan constantes el porcentaje de CRLI y la temperatura de modificación

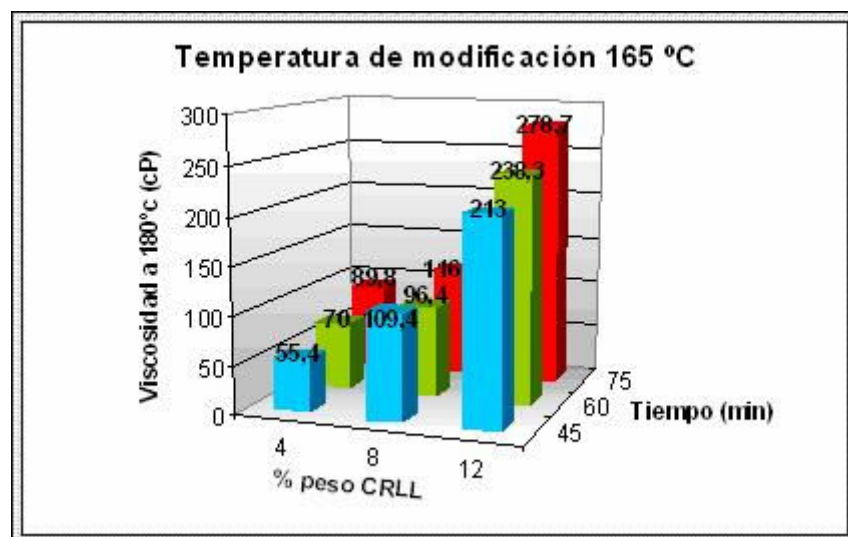


Figura 4. Variación de la viscosidad en el AMC con el aumento de tiempo y CRLI a temperatura de modificación constante 165°C

Seguidamente se analizó el comportamiento de los AMC tomando como parámetro el tiempo de modificación como se muestra en las *figuras 6, 7 y 8*.

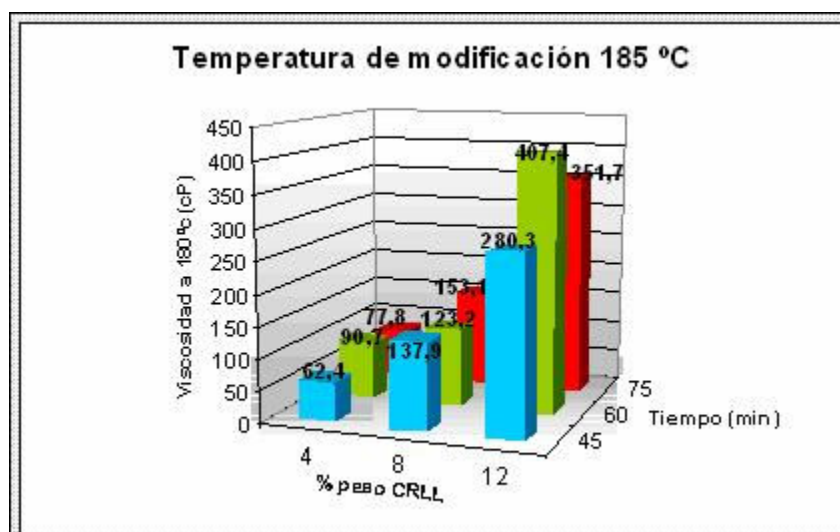


Figura 5. Variación de la viscosidad en el AMC con el aumento de Tiempo y CRL a temperatura de modificación constante 185°C

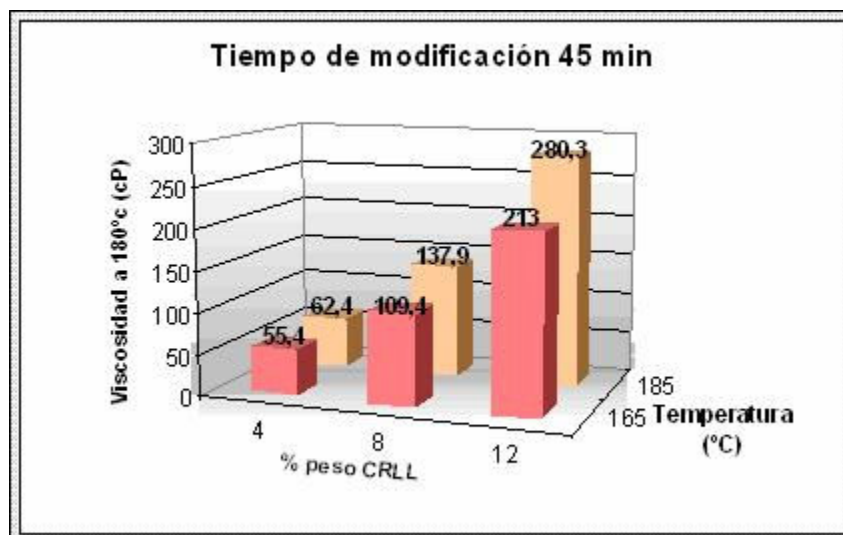


Figura 6. Variación de la viscosidad en el AMC con el aumento de temperatura y CRL a tiempo de modificación constante 45 min.

En cuanto la temperatura de mezclado la proporcionalidad directa respecto a la viscosidad dinámica se conservó y solo se identificó una excepción que puede ser atribuida a errores experimentales, con un margen de error del 10 %. Otro aspecto que se pudo observar fue que al aumentar el porcentaje de CRL en la mezcla,

hubo una marcada variación de la viscosidad cinemática entre una temperatura de mezclado y otra.

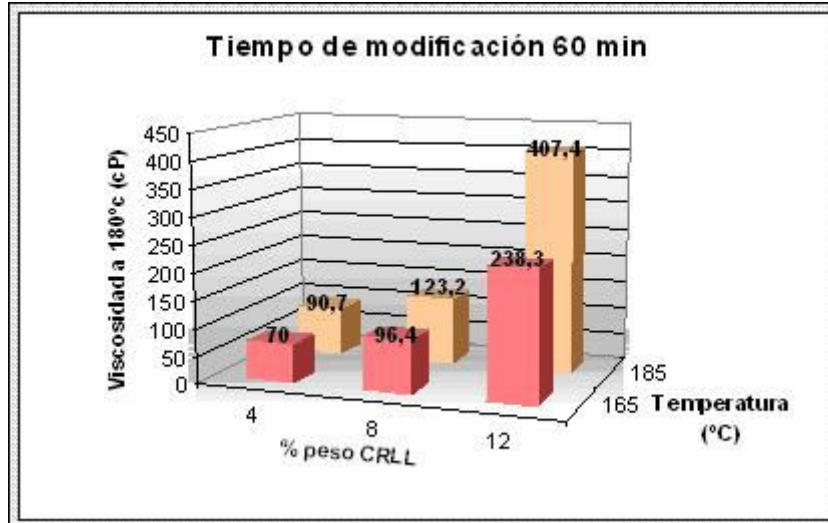


Figura 7. Variación de la viscosidad en el AMC con el aumento de temperatura y CRLL a tiempo de modificación constante 60 min.

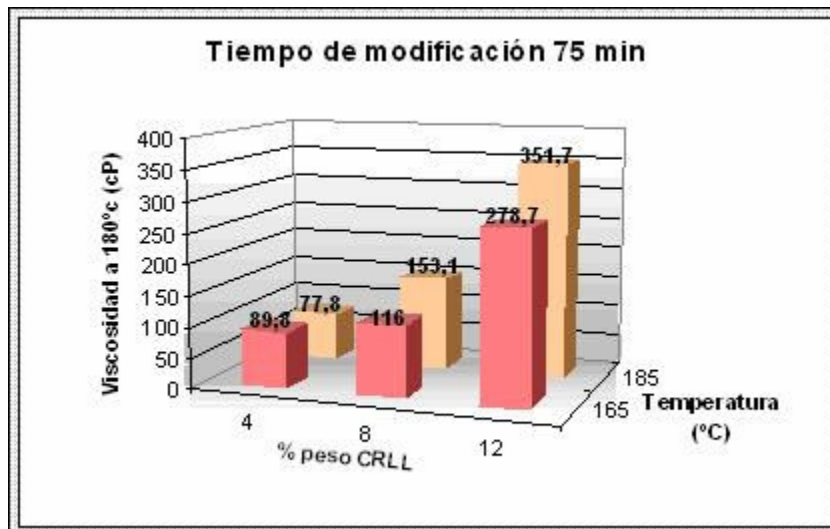


Figura 8. Variación de la viscosidad en el AMC con el aumento de temperatura y CRLL a tiempo de modificación constante 75 min.

3.5.2 Curvas reologicas AMC malla 200. Para esta experimentación y basados en los resultados con CRLL de tamaño de malla 50, se decidió no utilizar el contenido de CRLL de 4 %, debido a la poca incidencia que sobre la viscosidad

dinámica tuvo esta cantidad de caucho en las pruebas anteriores. Los resultados en general mantuvieron la misma relación entre la viscosidad y el contenido de CRLI en el AMC, ver *anexo A (Figuras 24 y 25)*

3.5.2.1 Comportamiento de las variables de proceso. Se realizó un análisis de tendencia para determinar la influencia de cada una de las variables de elaboración del AMC con respecto a la viscosidad dinámica medida a 180 °C.

Se analizó el comportamiento de los AMC tomando como parámetro la temperatura de modificación como se muestra en las *figuras 9 y 10*,

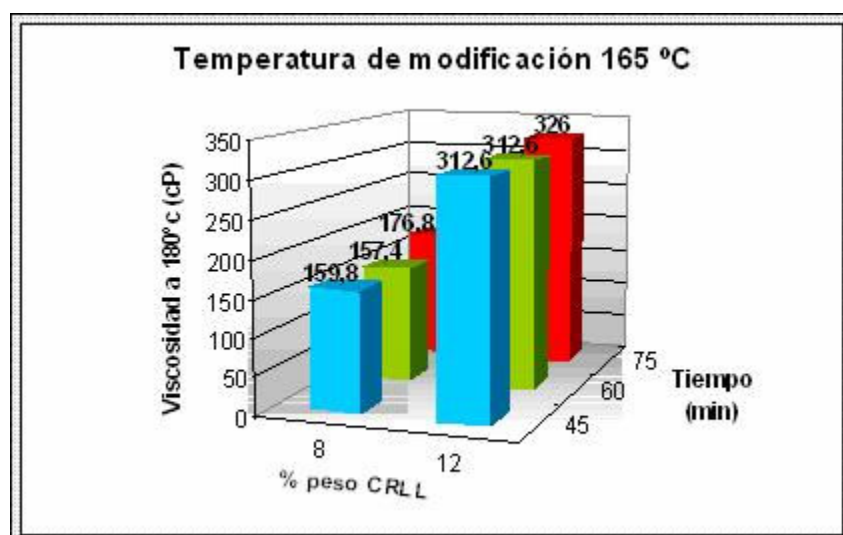


Figura 9. Variación de la viscosidad en el AMC con el aumento de Tiempo y CRLI a temperatura de modificación constante 165°C

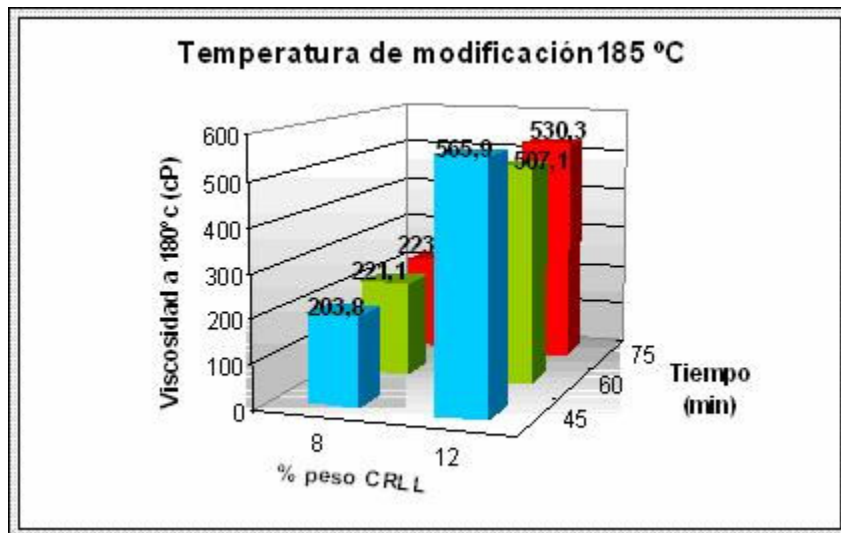


Figura 10. Variación de la viscosidad en el AMC con el aumento de Tiempo y CRL a temperatura de modificación constante 185°C

También se analizó el comportamiento de estos asfaltos respecto al parámetro de tiempo de modificación como se muestra en las figuras 11, 12 y 13.

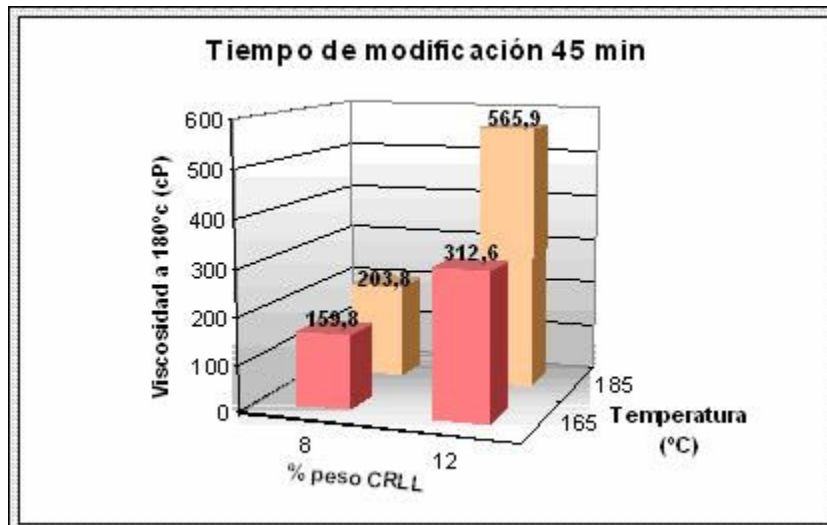


Figura 11. Variación de la viscosidad en el AMC con el aumento de temperatura y CRL a tiempo de modificación constante 45 min.

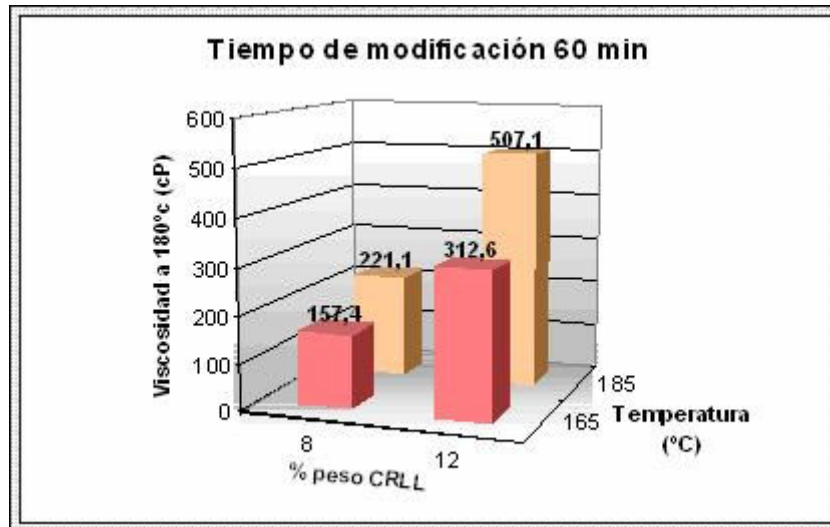


Figura 12. Variación de la viscosidad en el AMC con el aumento de temperatura y CRL a tiempo de modificación constante 60 min.

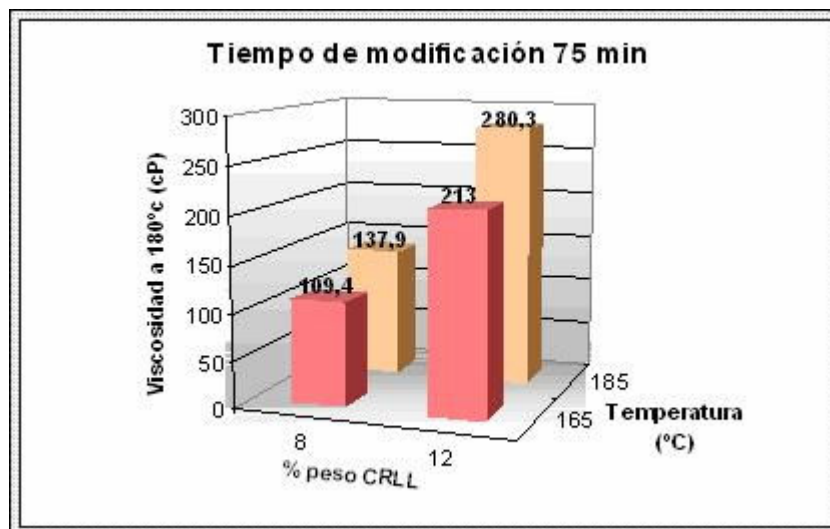


Figura 13. Variación de la viscosidad en el AMC con el aumento de temperatura y CRL a tiempo de modificación constante 75 min.

Todos los resultados obtenidos con este tamaño de partícula fueron correspondientes a los de malla 50, es decir; el % en peso de CRL y la temperatura de mezclado mantuvieron su tendencia de proporcionalidad directa con respecto a la viscosidad cinemática, mientras que el tiempo de mezclado nuevamente tuvo una influencia casi nula sobre esta misma propiedad medida.

3.6 SELECCIÓN DEL AMC ÓPTIMO.

Del análisis hecho sobre el comportamiento de las variables en el proceso de elaboración del AMC se pudo determinar que las especificaciones que cumplieron con el parámetro de selección de la viscosidad cinemática fueron:

- ❖ 185-8-75 (malla 50)
- ❖ 185-8-45 (malla 200)
- ❖ 185-8-60 (malla 200)
- ❖ 185-8-75 (malla 200)

Sin embargo, se optó por descartar de la selección los AMC's constituidos por CRLM malla 200, debido a que el tamaño de partícula malla 50 fue el que se obtuvo en mayor cantidad al realizarse la distribución de tamaño de partícula, por lo tanto el costo de producción de tamaño malla 50 se estima como menor en relación a la malla 200, además, del análisis del comportamiento de las variables de mezcla se constató que el tamaño de CRLM empleado no afectó de manera sustancial la viscosidad cinemática.

Por otra parte, se decidió llevar la especificación de AMC óptimo al tiempo de mezclado de 45 min. debido al análisis que de esta variable se hizo anteriormente, en donde se observó una leve influencia sobre viscosidad dinámica. De esta manera se podrían reducir costos de producción en un proceso a gran escala.

De acuerdo a lo ya mencionado se tendría un AMC óptimo a condiciones de proceso de 185-8-45 (malla 50). No obstante, se sabe que a altas temperaturas el asfalto pierde material volátil, a la vez que se ve acelerado su proceso oxidación, lo que conlleva a un envejecimiento prematuro y a un cambio desfavorable en sus propiedades originales. Es por esto que se resolvió fijar la temperatura de mezcla a 165°C.

Lo siguiente fue establecer un nuevo % en peso de CRLI malla 50 en la mezcla, para una temperatura de 165°C y un tiempo de mezclado de 45 min. de tal forma que el AMC cumpliera con un valor de viscosidad comprendido entre 150 y 190 cP tomada a la temperatura de medición reológica de 180 °C en el reómetro.

Partiendo de los resultados obtenidos con los distintos % en peso de CRLI malla 50, se busco un modelo matemático que permitiera determinar la cantidad de masa de CRLI requerida en el AMC, sin embargo, debido a la no linealidad del comportamiento no fue posible ajustar un único modelo, por lo que se realizaron varios modelos independientes para cada temperatura de medición reológica a condiciones constantes de elaboración de 165°C y 45 min.

Con la *ecuación (1)* se determino el % en peso de CRLI que cumpliera con el parámetro de selección de viscosidad dinámica:

$$\mu_{180^{\circ}C} = 30,32e^{0,1683C} \quad (1)$$

Donde:

$\mu_{180^{\circ}C}$: viscosidad dinámica a la temperatura de medición reológica de 180 °C [cP]

C: porcentaje en peso de CRLI en la mezcla

Para lo cual se obtuvo como resultado un 10 % en peso de CRLI en la mezcla con una viscosidad cinemática de 163,2 cP.

Se procedió a calcular otras dos viscosidades dinámicas a distintas temperaturas de medición reológica con el porcentaje óptimo de 10 % en peso de CRLI.

$$\mu_{150^{\circ}C} = 8,98C^2 - 56,76C + 327,1 \quad (2)$$

$$\mu_{120^{\circ}C} = 64,39C^2 - 494,67C + 2442 \quad (3)$$

Donde se obtuvo de cada una de las respectivas ecuaciones los siguientes valores:

$$\mu_{150\text{ }^{\circ}\text{C}} = 657,9 \text{ cP}$$

$$\mu_{120\text{ }^{\circ}\text{C}} = 3934,7 \text{ cP}$$

Ahora se utilizo un modelo de predicción de viscosidades a distintas temperaturas de medición reológica, bajo las mismas condiciones de elaboración de AMC (165-10-45) con tamaño de CRLM malla 50, de manera que se pudo completar la curva reológica del AMC de especificación óptima.

$$\mu = 2,1432 \times 10^{19} T^{-7,4873} \quad (4)$$

Donde:

μ : viscosidad dinámica a cualquier temperatura de medición reológica del AMC óptimo (165-10-45) [cP].

T : Temperatura de medición reológica [°C]

Todos los modelos utilizados se validaron en el laboratorio con la elaboración del AMC óptimo correspondiente (165-10-45), evaluando experimentalmente las viscosidades para obtener la curva reológica como se ve en el *anexo A (Figura 26)*, donde se compara con la curva reológica que se obtuvo de la modelación y que se distingue con la letra *m*.

3.7 ASFALTO-CRLM-COMPATIBILIZANTE (AMCA).

En esta parte del proceso experimental, se utilizaron los tres tipos de compatibilizantes antes mencionados en la sección 2.5 y *anexo A (Tablas 10,11 y 12)*, se dejó como parámetros preestablecidos las condiciones de las variables encontradas para el AMC óptimo en lo que tiene que ver con la temperatura

(165°C), el tiempo de mezclado (45 min.) y el tamaño de partícula de CRLI (malla 50).

Hay que aclarar que debido a la interacción de un nuevo elemento presente en el asfalto modificado como lo es el compatibilizante, se hace necesario reestablecer el porcentaje de CRLI presente en el asfalto, el cual para este caso se tomo como un porcentaje de CRLI acondicionado. Este CRLI acondicionado es el producto de la adecuación del CRLI bruto con el compatibilizante antes de ser adicionado al asfalto original en condiciones de proceso.

3.7.1 Acondicionamiento del CRLI. Este proceso de interacción entre el CRLI y el compatibilizante, consto de dos operaciones:

- ❖ Absorción CRLI-compatibilizante.
- ❖ Secado CRLI-compatibilizante.

3.7.1.1 Absorción CRLI-compatibilizante. Se realizo el seguimiento de la absorción de cada compatibilizante por parte del CRLI, como se ve en el *anexo A (Figura 27)*, con el fin de determinar el tiempo que debería establecerse como parámetro de proceso.

De las curvas de absorción obtenidas se determinó como 90 minutos, el tiempo en el que todas las muestras alcanzaron la estabilidad en su peso.

El compatibilizante tipo I permitió la mayor absorción por parte del CRLI, pudiendo este incrementar su peso en un 50% respecto al valor original, de igual forma este mismo compatibilizante es el que presento un mayor gradiente de absorción, lo cual conlleva a que el proceso alcance de una forma mas rápida el estado estacionario y por consiguiente su estabilidad.

Estos resultados también se pueden interpretar desde el punto de vista de la naturaleza de los compatibilizantes y más concretamente en lo que tiene que ver con el contenido de aromáticos, de esta manera el compatibilizante tipo I que es más rico en esta clase de compuestos químicos, fue el que propició la mayor absorción seguido del tipo III y tipo II respectivamente.

3.7.1.2 Secado CRL-compatibilizante. Luego de la absorción, el CRL-compatibilizante se sometió a un proceso de secado para eliminar el exceso de compatibilizante que pudo quedar distribuido en la superficie del caucho, y así evitar la posterior rebaja del asfalto por parte de esta cantidad residual de compatibilizante *anexo A (Figura 28)*.

Se eligió como temperatura de secado 170 °C para garantizar que no ocurriera una pérdida de masa por parte del compatibilizante durante el proceso de elaboración del asfalto modificado con caucho acondicionado (AMCA) ya que la temperatura de mezclado fue establecida como 165 °C.

Como era de esperarse el secado del CRL-compatibilizante siguió un comportamiento lógico de acuerdo a las características de cada compatibilizante, si se tienen en cuenta algunas propiedades como la densidad, °API, y % de aromáticos. Todas las curvas alcanzaron su estabilidad alrededor de los 70 min.

3.7.2 Selección de parámetros de acondicionamiento de CRL. De los resultados y análisis anteriores se tomaron 90 y 70 minutos como los valores de proceso para la absorción y el secado respectivamente.

3.7.3 Curvas reológicas AMCA. Después de haber acondicionado CRL con cada uno de los compatibilizantes se procedió a agregarlo al asfalto a las condiciones de proceso ya fijadas anteriormente y con distintos porcentajes de CRL, los resultados se pueden apreciar en el *anexo A (figura 29, 30 y 31)*.

3.7.3.1 Comportamiento de las variables de proceso. Se realizó un análisis de tendencia para determinar la influencia tanto del % en peso de CRLL como de los compatibilizantes empleados, con respecto a la viscosidad dinámica del AMCA medida a 180 °C.

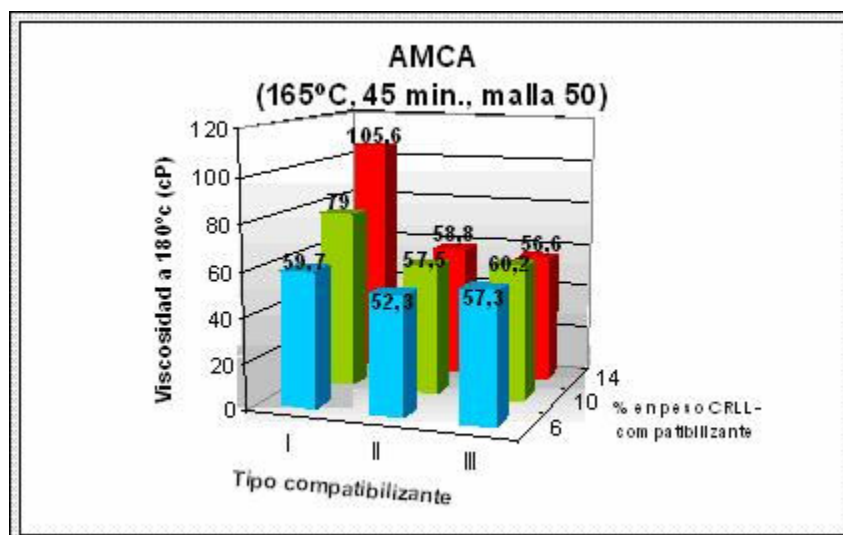


Figura 14. Variación de la viscosidad dinámica a 180°C respecto al tipo de compatibilizante y % en peso de CRLL presentes en el AMCA

En los compatibilizantes Tipo II y Tipo III, el efecto generado por la utilización de los distintos porcentajes CRLL-compatibilizante no causó una marcada influencia sobre sus viscosidades cinemáticas medidas a 180 °C; una posible causa a esto pudo ser la existencia de una alta relación compatibilizante/CRLL después de su acondicionamiento, lo que evito que cambiara la viscosidad en el AMCA.

En el compatibilizante Tipo I se observó una clara tendencia, esto quedó evidenciado en un cambio aproximado del 25% en la viscosidad cinemática al incrementarse cada % en peso del CRLL-compatibilizante utilizado en la elaboración del AMCA.

3.8 SELECCIÓN DEL COMPATIBILIZANTE Y AMCA ÓPTIMO.

Después de analizar los datos, se decidió elegir el compatibilizante tipo I, para la realización de la mezcla óptima del AMCA, el cual presentó un mejor desempeño

en el comportamiento reológico comparado con los demás, es decir, se encontró una concordancia entre la cantidad de CRLL-compatibilizante adicionado en el asfalto y la viscosidad dinámica que presentó el AMCA.

Luego de haber descartado los AMCA's con los compatibilizantes Tipo II y Tipo III, se inició la búsqueda del porcentaje de CRLL-compatibilizante que se ajustara al parámetro de selección de viscosidad cinemática medida a 180 °C, para esto se hizo un modelamiento con un tratamiento similar al empleado en la *sección 3.6*

Con la *ecuación (5)* se determinó el % en peso de CRLL-compatibilizante que cumpliera con el parámetro de selección de viscosidad cinemática para las condiciones de proceso ya preestablecidas.

$$\mu_{180^{\circ}\text{C}} = 0,047C^2 + 3,563C + 37,303 \quad (5)$$

Donde:

$\mu_{180^{\circ}\text{C}}$: viscosidad dinámica medida a 180 °C [cP]

C: porcentaje en peso de CRLL acondicionado en la mezcla

Para lo cual se obtuvo como resultado un 27 % en peso de CRLL-compatibilizante en la mezcla con una viscosidad cinemática de 167,84 cP.

Igualmente se determinaron las viscosidades a dos temperaturas diferentes con el porcentaje óptimo de 27 % en peso de CRLL-compatibilizante.

$$\mu_{150^{\circ}\text{C}} = -1 \times 10^{-0,4} C^2 + 20,041C + 112,07 \quad (6)$$

$$\mu_{120^{\circ}\text{C}} = -1,0454C^2 + 142,75C + 395,69 \quad (7)$$

Donde se obtuvo de cada una de las respectivas ecuaciones los siguientes valores: $\mu_{150^{\circ}\text{C}} = 657,9 \text{ cP}$ y $\mu_{120^{\circ}\text{C}} = 3934,7 \text{ cP}$

Ahora se utilizó un modelo de predicción de viscosidades a distintas temperaturas reológicas, bajo las mismas condiciones de elaboración de mezcla óptima (165-27-45), de manera que se pudo completar la curva reológica del AMCA de especificación óptima.

$$\mu = 1 \times 10^{19} T^{-7,4841} \quad (8)$$

μ : viscosidad dinámica [cP] a cualquier temperatura a condiciones de la mezcla óptima (165-27-45).

T : Temperatura [°C]

Los modelos utilizados se validaron con la elaboración del AMCA óptimo correspondiente (165-27-45), evaluando experimentalmente su viscosidad dinámica a diferentes temperaturas para obtener la curva reológica como se ve en el *anexo A (Figura 32)* donde 165-27-45 (m) fue la curva reológica que se obtuvo de la modelación.

3.9 EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL PARÁMETRO DE SELECCIÓN DE ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO

Después de la selección de los AMC y AMCA óptimos que cumplieron con el primer parámetro de selección correspondiente a la viscosidad dinámica, seguidamente se valoró la propiedad de estabilidad al almacenamiento la cual se vale del ensayo de punto de ablandamiento de anillo y bola como criterio de conformidad. *Vease anexo A (Tabla 13)*.

Ambos resultados estuvieron dentro del rango de aceptación de la norma, que establece como 5 °C la diferencia máxima de temperaturas que debe existir entre las submuestras del fondo y tope en el equipo de estabilidad, por lo tanto estos asfaltos modificados también son óptimos desde el punto de vista de la estabilidad al almacenamiento.

3.10 COMPARACIÓN DE ASFALTO ORIGINAL Y MODIFICADOS.

Una vez establecidos los asfaltos modificados óptimos se pudo cotejar los resultados obtenidos con respecto al asfalto original. Se comenzó por observar sus curvas reológicas como se observa en las *figuras 15 y 16*.

Para analizar la susceptibilidad térmica (VTS) de los asfaltos modificados obtenidos, se procedió a calcularla por medio de la siguiente ecuación:

$$VTS = \frac{\log(V_{135}) - \log(V_{60})}{\log 135 - \log 60} \quad (9)$$

Donde:

VTS: índice de susceptibilidad térmica

V: viscosidad dinámica medida a la temperatura indicada en grados centígrados [cP].

Se obtuvieron los correspondientes valores:

VTS_{asfalto original}: 7,85

VTS_{AMC}: 7,45

VTS_{AMCA}: 5,68

Estos resultados indican que el AMCA fue el asfalto menos susceptible a los cambios térmicos, algo que es favorable y que siempre se busca obtener en los asfaltos modificados, sin embargo vale la pena hacer un análisis más minucioso en este aspecto y diferenciar entre el comportamiento del asfalto modificado por si solo y su comportamiento en un pavimento ya aplicado.

Tomando dentro del rango de servicio de un pavimento las temperaturas bajas (<15 °C), es conveniente que el asfalto modificado a estas condiciones tenga viscosidades mas bajas en relación al asfalto original con el propósito de evitar el fisuramiento del pavimento por alta rigidez, la cual es una característica que

frecuentemente se observa a estas condiciones climatológicas, el AMCA cumpliría con este requerimiento si se tiene en cuenta la tendencia de la curva reologica observada en la *figura 15*.

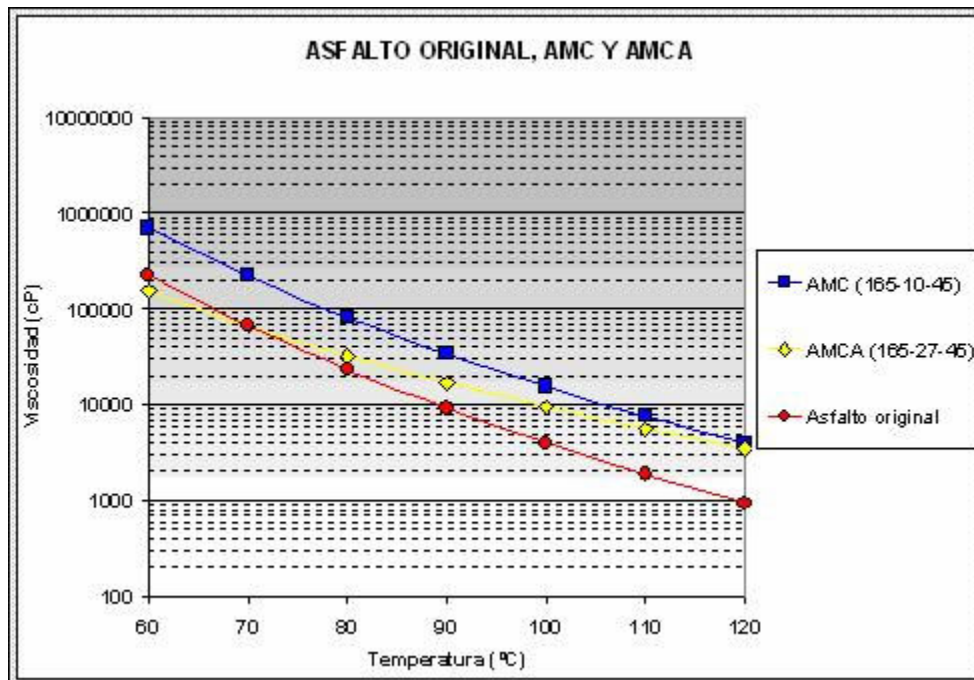


Figura 15. Curvas reológicas entre 60 y 120 °C del AMC, AMCA y asfalto original.

Ahora, analizando el comportamiento del pavimento a altas temperaturas de servicio (>25°C) es apropiado que el asfalto modificado presente una viscosidad mas alta con respecto al asfalto original, condición que es importante en el desempeño del bitumen en el pavimento, para evitar el ahuellamiento y la exudación del asfalto, y por consiguiente la disgregación de los áridos que constituyen la carpeta asfáltica. Para este caso el AMCA puede considerarse que no cumple con este requisito debido a que su viscosidad recién comienza a ser mayor a la del asfalto original alrededor de los 70 °C, temperatura que es poco probable que alcance un pavimento en servicio.

El AMC tuvo un índice de susceptibilidad muy cercano referente al asfalto original, lo cual indica que no hubo una mejora considerable, no obstante este asfalto modificado muestra un comportamiento ideal para su aplicación en pavimentos a

altas temperaturas de desempeño (> 25 °C), debido a que su curva reológica presenta viscosidades mayores a la del asfalto original.

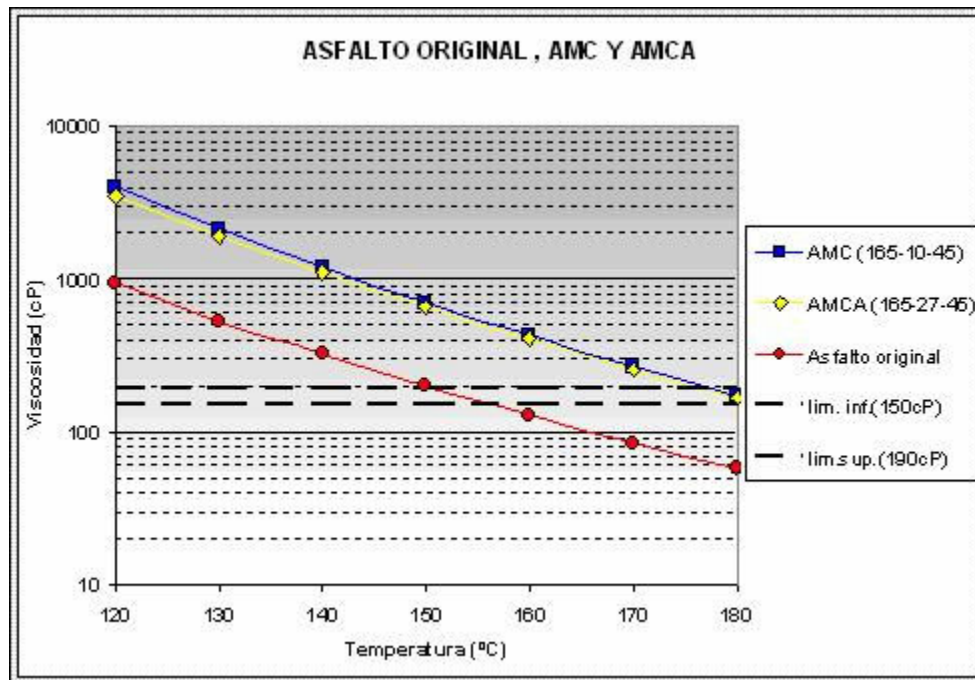


Figura 16. Curvas reológicas entre 120 y 180 °C del AMC, AMCA y asfalto original

3.11 CARACTERIZACIÓN DEL AMC Y AMCA ÓPTIMOS.

Se realizó la determinación de las características físicas de los asfaltos modificados y se comparó con el asfalto original como se muestra en el *anexo A (Tabla 14)*

La ductilidad en el AMC y AMCA no cumplió con la norma y se redujo sustancialmente respecto al asfalto original lo que puede significar una baja compatibilidad entre el asfalto y el CRL. De todas maneras cabe mencionar que según este resultado el AMCA presentó una mejor compatibilidad que el AMC producto del acondicionamiento del CRL.

Los valores de penetración estuvieron fuera de la norma, sin embargo este ensayo sirvió para constatar resultados anteriores. El AMC presento una mayor dureza con relación al asfalto original lo que corrobora su aptitud para la elaboración de pavimentos en regiones calidas, contrario sucede con el AMCA que por ser blando resulta ideal para pavimentos en climas fríos.

Se evidenció una mejora en la recuperación elástica por torsión de los asfaltos modificados, lo cual es importante ya que esta propiedad es una medida de la resistencia a la deformabilidad presente en el asfalto, por consiguiente el AMC y el AMCA tendrán como características un mejor desempeño y durabilidad frente a las deformaciones permanentes o ahuellamientos, aunque los resultados obtenidos no cumplan con la norma.

El punto de ablandamiento como criterio de evaluación de la estabilidad al almacenamiento para los asfaltos modificados obtenidos cumplieron con la norma, sin embargo en las mezclas pudieron diferenciarse ciertos dominios o fases por lo que seria recomendable evaluar en otra forma los AMC's después de obtener las submuestras provenientes del equipo de estabilidad.

Por ultimo es de aclarar que las especificaciones para los AMC's contenidas en el *anexo A (Tabla 14)* si bien es cierto son parte de la actual normatividad colombiana formulada por el INVIAS, son especificaciones generales para asfaltos modificados con distintos materiales poliméricos que no describen particularmente el comportamiento del asfalto-caucho o asfalto-caucho-compatibilizante.

3.12 VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA PARA LA PRODUCCIÓN DE AMC Y AMCA A NIVEL INDUSTRIAL.

El desarrollo completo de esta sección se encuentra en el *anexo B*.

4. CONCLUSIONES

- ❖ Con esta investigación se obtuvieron los AMC (165-10-45) y AMCA (165-27-45) óptimos por el proceso de la vía húmeda que cumplieron con los parámetros de selección de viscosidad dinámica y de estabilidad al almacenamiento propuestos en este trabajo.

- ❖ Con la adición de CRLI al asfalto original Barrancabermeja se comprobó la mejora de algunas de sus propiedades como la recuperación elástica por torsión, la cual se logro aumentar en un 100 y 300 % para el AMCA y AMC respectivamente, lo que indica una alta resistencia a la deformabilidad en estos asfaltos.

- ❖ El acondicionamiento del CRLI por parte el agente compatibilizante tipo I permitió en el AMCA un incremento de hasta 2 veces el contenido de caucho reciclado de llantas con respecto al AMC, sin embargo, la utilización de este aditivo no mejoro significativamente la interacción asfalto-CRLI, como se corrobora en los resultados de estabilidad al almacenamiento y la ductilidad.

- ❖ Con base a la experimentación realizada en este trabajo a nivel de laboratorio, y teniendo en cuenta el porcentaje de caucho presente en las llantas así como la cantidad de este usado en el AMC y AMCA, se obtuvo una relación de aprovechamiento de 285 kilogramos de llantas desechadas por cada tonelada de asfalto modificado producido, lo que propone una alternativa de carácter ambiental para el manejo de estos residuos sólidos

5. RECOMENDACIONES

- ❖ Realizar un análisis de tipo molecular en donde se pueda establecer detalladamente la interacción entre asfalto, CRLI y compatibilizante, con el propósito de conocer de manera precisa los cambios que se suceden durante el proceso de elaboración de los AMC's.

- ❖ Hacer los respectivos ensayos de mezclas asfálticas empleando los asfaltos modificados obtenidos en este trabajo.

- ❖ Realizar la pavimentación de un tramo de experimental empleando los AMC'S óptimos obtenidos para verificar las propiedades mejoradas.

- ❖ Probar nuevos compatibilizantes y/o aditivos para la mezcla asfalto-CRLI con el objeto de seguir mejorando las propiedades que están fuera de las normas exigidas.

- ❖ Formular normas de conformidad específicas para elaboración de los asfaltos modificados.

6. BIBLIOGRAFIA

1. AFANASIEVA, N & ALVAREZ, M. COLCIENCIAS. Estudio del proceso de envejecimiento de los asfaltos colombianos bajo la acción de algunos factores climáticos. Informe de Investigación Parte 1, 2 y 3, Bogota, Colombia, 2000.
2. ALCALDIA MAYOR DE BOGOTA DC. INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO y UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Bogota. 2002.
3. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standards compilations. USA. 2005.
4. BIRD, R; STEMART W. N. y LIGHFOOT E. N. Fenómenos de transporte, 2 edición, Barcelona, Reverté, 1992, pag 1-3, 1-10.
5. CORASFALTOS. Proyecto de investigación transferencia y desarrollo de tecnología para la construcción de una planta de modificación de asfaltos utilizados en pavimentos. Bucaramanga. 2004.
6. CORASFALTOS; SENA; ECOPETROL ICP; MINA SAN PEDRO; TEXPAR ENERGY INC; INVIAS; MPI. Manuales para uso de asfaltos naturales, crudos pesados y asfaltos modificados. 4as Jornadas internacionales del asfalto. Cartagena. 2004.
7. INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (INV), MINISTERIO DE TRANSPORTE. Artículos 400 y 450, Especificaciones generales de construcción de carreteras, Construcción de carreteras, Contenido general, tomo 1, capítulo 1. Colombia: INV, 1998.
8. ECOPETROL-ICP, Datos de control de operación de la planta UOP II, Estudio investigativo, Barrancabermeja, 2005.

9. PEREA, Oscar y VILLABONA, Adriana. Inventario Nacional de plantas mezcladoras de asfalto en caliente, Tesis de grado. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 1998.
10. PERRY, Robert H. y GREN, Don W. Chemical Engineers' Handbook, 7 edición, Mexico, McGraw-Hill, 1997, pag 20-5, 20-7.
11. PETERS, Max S. y TIMMERHAUS, Klaus D. Plant Design and Economics for Chemical Engineers, 4 edición, Singapore, 1991, pag 150-165, 295-310.
12. RAY, Martins S. y JOHNSTON, David W. Chemical Engineering Design Project, 1 edición, Glasgow, Bell and Bain, 1989, pag 87-97
13. REY, Mauricio y HERNANDEZ, Robinson, Diseño de una planta a nivel semipiloto para la preparación de mezclas azufro-asfálticas, tesis de grado. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 1999.
14. ROBERTS, Freddy L; KANDHAL, Printhri S. y DUNNING, Robert L. Investigation and evaluation of ground tire rubber in hot mix. 1989
15. TREYBAL, Robert E. Operaciones de Transferencia de Masa, 2 edición, Mexico, McGraw-Hill, 1992, pag 723-742.
16. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA. GRUPO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES DE INGENIERÍA. Estudio del comportamiento de mezclas densas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con policloruro de vinilo, latex natural y caucho reciclado. 4as Jornadas internacionales del asfalto. Cartagena. 2004.
17. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN ASFALTOS GIAS. Asfaltos modificados: reología, química y su relación con propiedades mecánicas en mezclas densas fabricadas en Caliente. 4as Jornadas internacionales del asfalto. Cartagena. 2004.
18. US Patent 5,835,401. Recycled rubber in a polymer modified asphalt and a method of making same.

19. US Patent 5,938,832. Crumb rubber modifier asphalt with enhanced setting characteristics.
20. US Patent 5,990,207. Mixtures of bitumen, of powdered rubber waste and of polymer, employed as road binder.
21. USMANI, Artur M. Asphalt science and Technology. 1997, pag. 385-341.
22. <http://www.arqhys.com/arquitectura/asfalto-composicion.html>
23. <http://www.construaprende.com/Trabajos/T7/T7pag09.html>
24. <http://www.ecopetrol.com.co>
25. http://www.invias.gov.co/info/manuales/Normas/especificaciones_construccion/especificaciones/Art400.htm
26. <http://www.monografias.com/trabajos13/neuma/neuma.shtml>
27. http://www.rubberizedasphalt.org/ar_design_guide/Vol_1.pdf
28. http://www.tytlabs.co.jp/english/review/rev381epdf/e381_039fukumori.pdf
29. <http://www.matche.com/>

7. ANEXOS

ANEXO A RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tabla 6. Datos distribución de tamaño de partícula del CRLl

MALLA	ABERTURA TAMIZ (mm)	% MASICO RETENIDO	% MASICO PASA	% MASICO A CUMULADO RETENIDO	% MASICO A CUMULADO PASA
8	2,362	9,4889	90,5111	9,4889	90,5111
10	1,651	3,5684	96,4316	13,0573	86,9427
16	1,19	21,0803	78,9197	34,1376	65,8624
20	0,841	16,4872	83,5128	50,6248	49,3752
30	0,595	9,8004	90,1996	60,4252	39,5748
50	0,297	29,5219	70,4781	89,9471	10,0529
200	0,074	9,5115	90,4885	99,4686	0,5414
Fondo	0	0,5414	99,4686	100	0

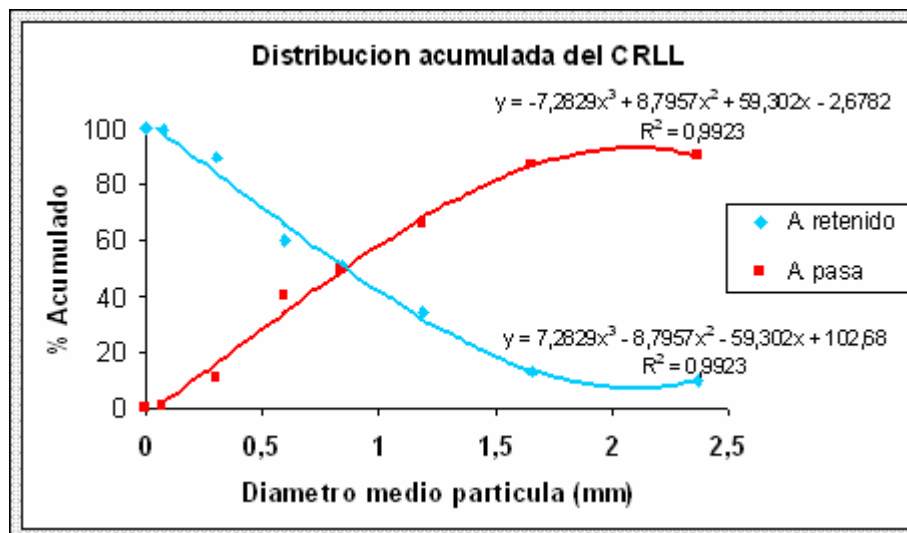


Figura 17. Distribución acumulada de tamaño de partícula de CRLl

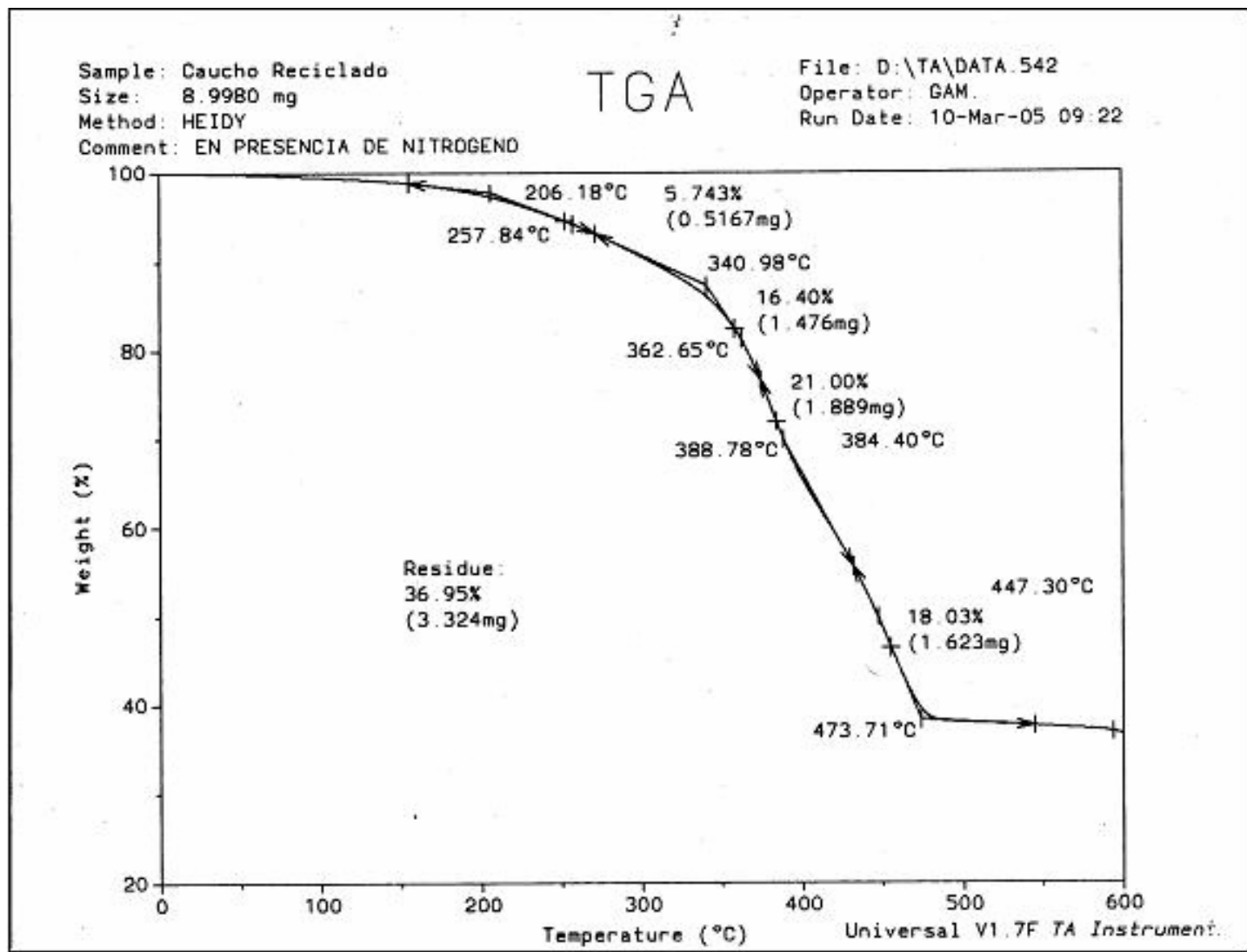


Figura 18. Resultado del análisis termogravimétrico (TGA) para el CRL

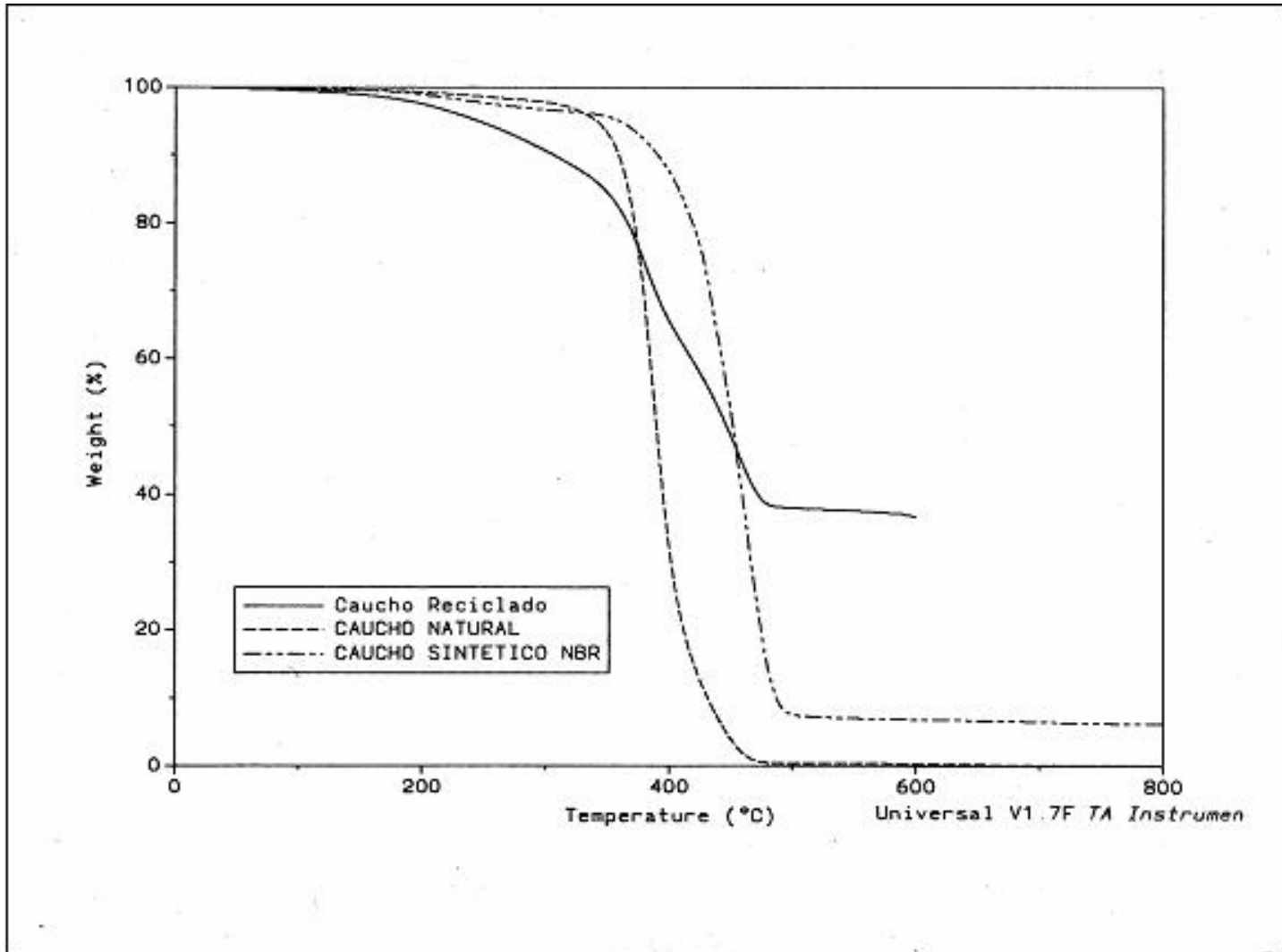


Figura 19. Comparación del caucho natural y sintético con el CRLI por medio del TGA

Tabla 7. Resultados de la prueba de resistencia del caucho a agentes químicos

SUSTANCIAS	PESO INICIAL DEL CRLI(g)	PESO FINAL DEL CRLI(g)	% VARIACION RESPECTO AL PESO INICIAL	OBSERVACIONES
Etanol (90%)	0,10	0,10	Ninguna	Igual apariencia y peso
Varsol (Comercial)	0,11	0,22	Aumento 100	Hinchamiento de partícula
Gasolina (Corriente)	0,15	0,31	Aumento 107	Hinchamiento de partícula
Ácido Sulfúrico (70%)	0,17	-	-	Desintegración parcial
Amoniaco (85 %)	0,08	0,08	Ninguna	Igual apariencia y peso
Tolueno (80 %)	0,11	0,26	Aumento 136	Hinchamiento de partícula
Tetracloruro de Carbono (80 %)	0,10	0,40	Aumento 300	Hinchamiento de partícula

Tabla 8. Composición estimada del CRLI por el método de TGA

COMPONENTES	INTERVALO DE TEMPERATURAS	% EN PESO DE MUESTRA
Volátiles	0 - 341 °C	16,4
Caucho natural y sintético	341 - 474 °C	47,7
Negro de humo y cenizas	474 - 600 °C	36,9

Tabla 9. Propiedades físicas y químicas determinadas al asfalto original

PROPIEDADES	ASFALTO ORIGINAL BARRANCABERMEJA
Peso específico (g/cm ³)	0,923
Punto ablandamiento (°C)	41
Punto chispa (°C)	308
Ductilidad (cm)	> 100
Penetración (0,1 mm)	78
Viscosidad absoluta (cP)	2,26E+05
Envejecimiento - pérdida de masa (% variación respecto peso inicial)	0,579
Envejecimiento - Penetración residual (% penetración original)	58
Recuperación elástica por torsión (% ángulo recuperado)	6
Solubilidad en tridoroetileno (% masa)	99.90

Tabla 10. Caracterización compatibilizante tipo I

PROPIEDAD	VALOR
Density 15 C , g/ml	0,9542
°API	16,7
CCR, %w	-
Sulphur, ppm	8260
Viscosity at 40 C, cSt	2,72
Viscosity at 50 C, cSt	2,23
N total, ppm	686
Pour Point, °c	< -30
No. De Acido mg KOH/g	<0.05
Refration Index	1,5563
Color	3,4
Flammable point, C	103
Cetane index (calc.) D 4737	18,9
Saturados %	13,6
Aromaticos%	81,1
Resinas+ Asfaltenos %	5,3

Tabla 11. Caracterización compatibilizante tipo II

PROPIEDAD	VALOR
Density 15 C , g/ml	0,98
°API	6
Viscosity at 50 C, cSt	23
Parafinas %	45-76
Naftenos %	13-45
Aromaticos %	13-30
Antioxidantes Detergentes Anticorrosivos % Antiespumantes Antisépticos	15-25

Tabla 12. Caracterización compatibilizante tipo III

PROPIEDAD	VALOR
Density 15 C, g/ml	1,0782
°API	-0,8
CCR, %m	6,4
Sulphur, ppm	12540
Viscosity at 50 C, cSt	91,35
Viscosity at 100 C, cSt	8,52
N total, ppm	2696
Flammable point, C	-
Pour point, C	-3
BSW	0,15
Contenido de cenizas	0,14
Insolubles en n-C7	1,23
Nickel, ppm	2,32
Vanadium, ppm	4,02
Sodium, ppm	11,66
Iron, ppm	4,26
Silice, ppm	173,2
Aluminium, ppm	113,6
Saturados %	13,3
Aromaticos%	71,4
Resinas+ Asfaltenos %	12.9+2.0

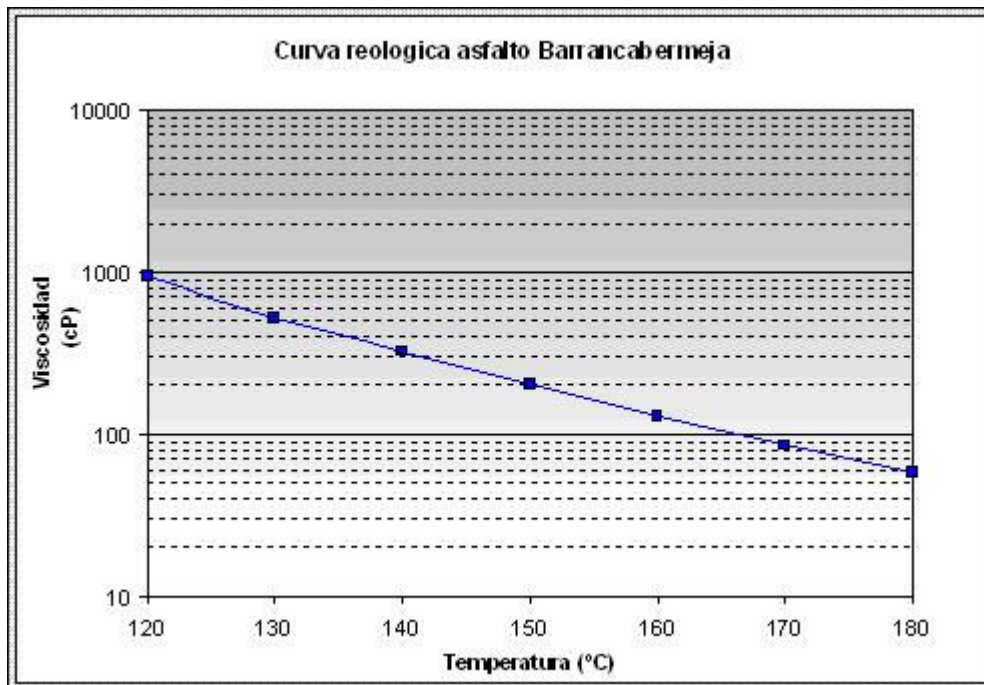


Figura 20. Curva reológica asfalto original

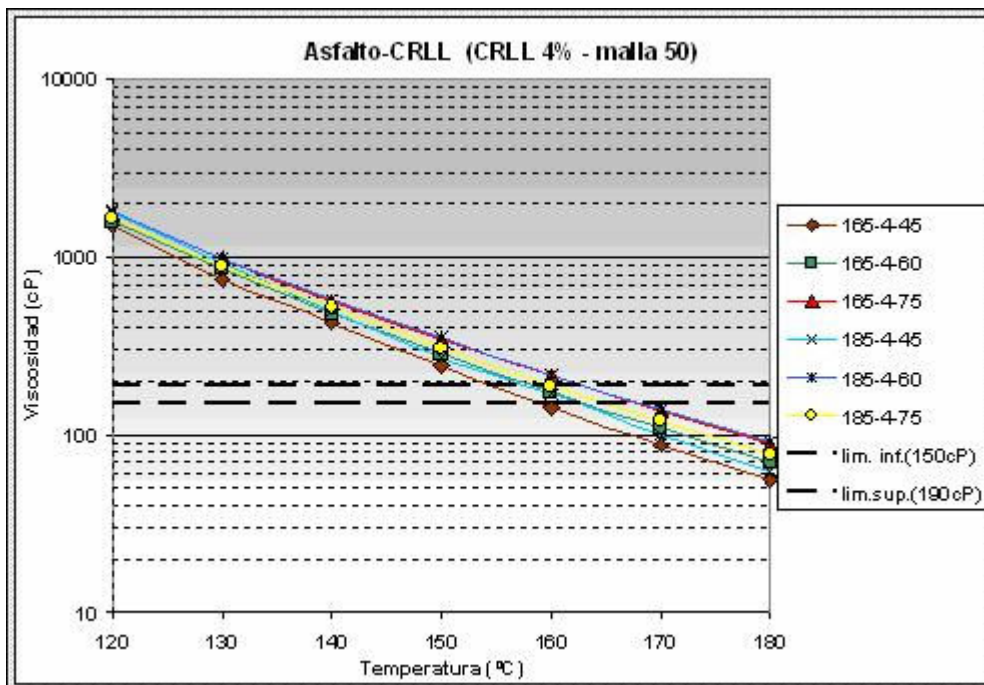


Figura 21. Curvas reológicas AMC con 4 % de CRLL-malla 50

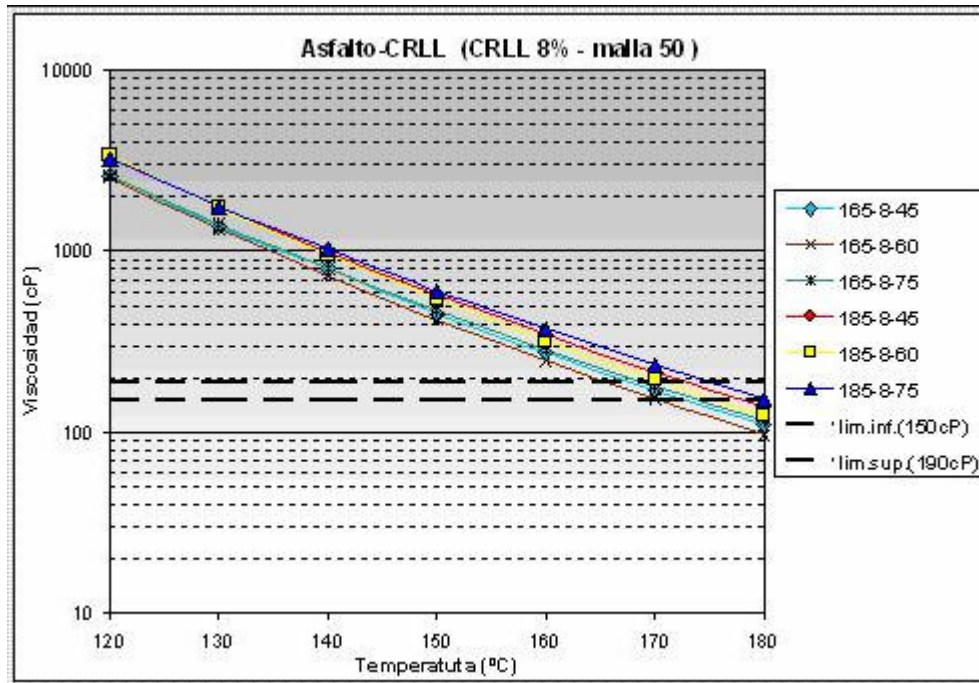


Figura 22. Curvas reológicas con 8 % CRLL-malla 50

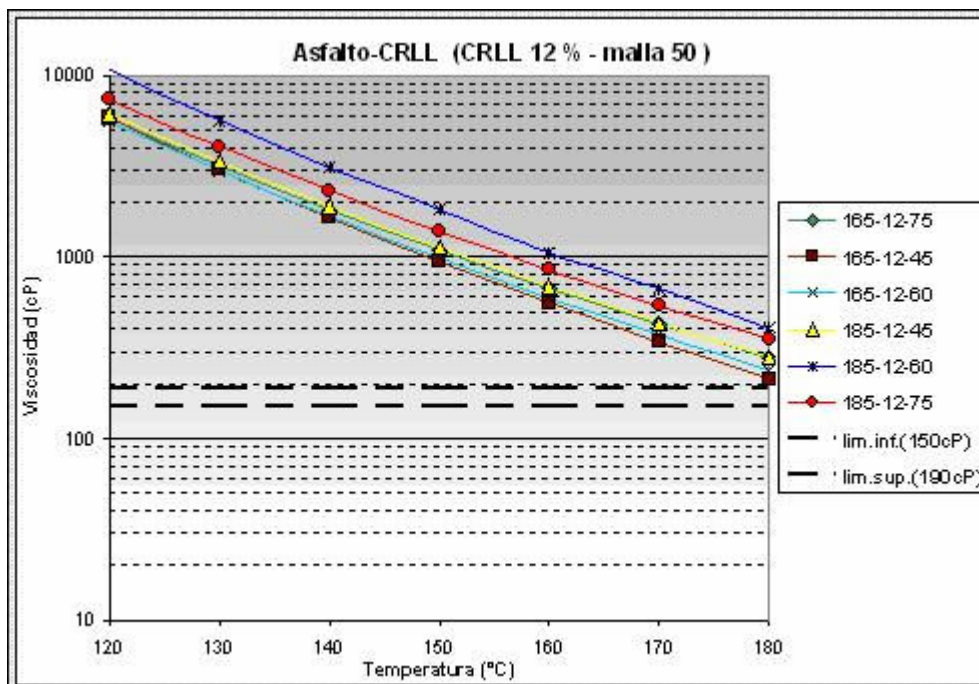


Figura 23. Curvas reológicas con 12% CRLL-malla 50

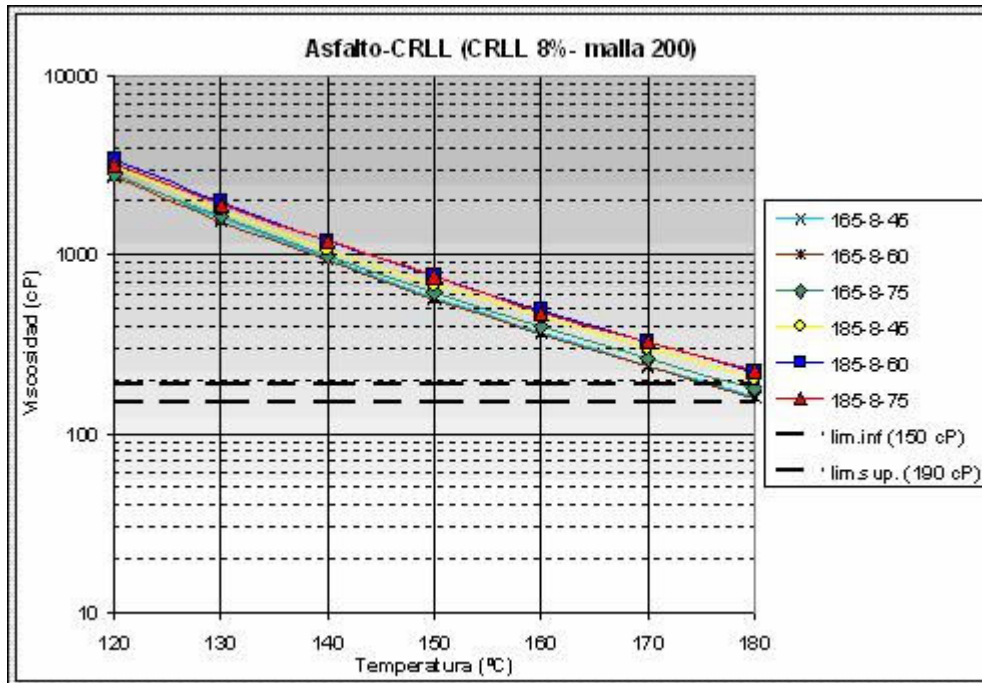


Figura 24. Curvas reológicas con 8 % CRLL-malla 200

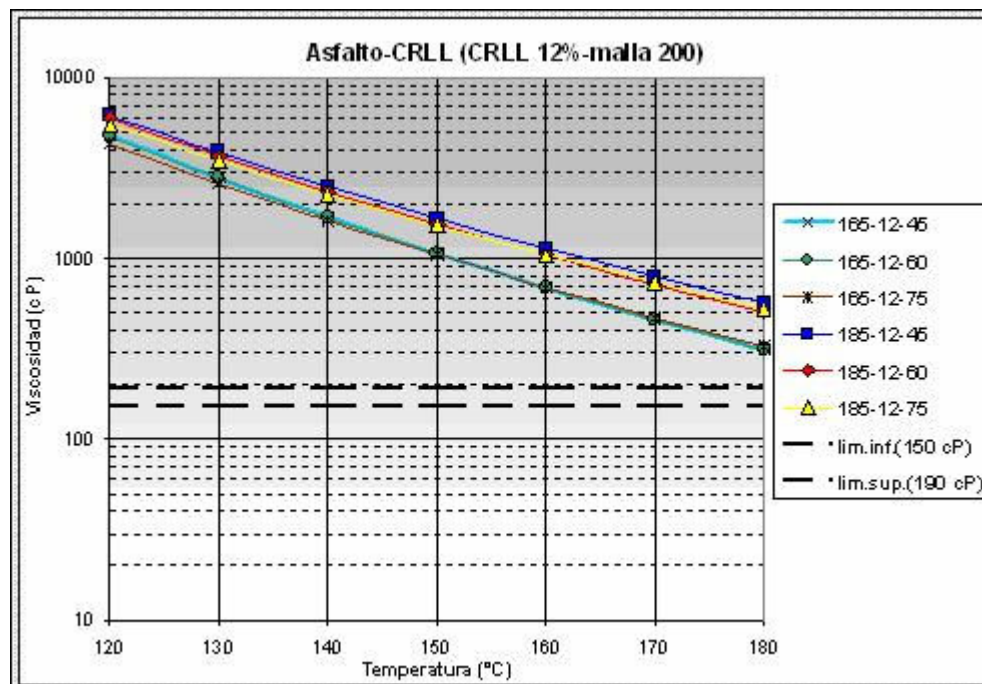


Figura 25. Curvas reológicas con 12% CRLL-malla 200

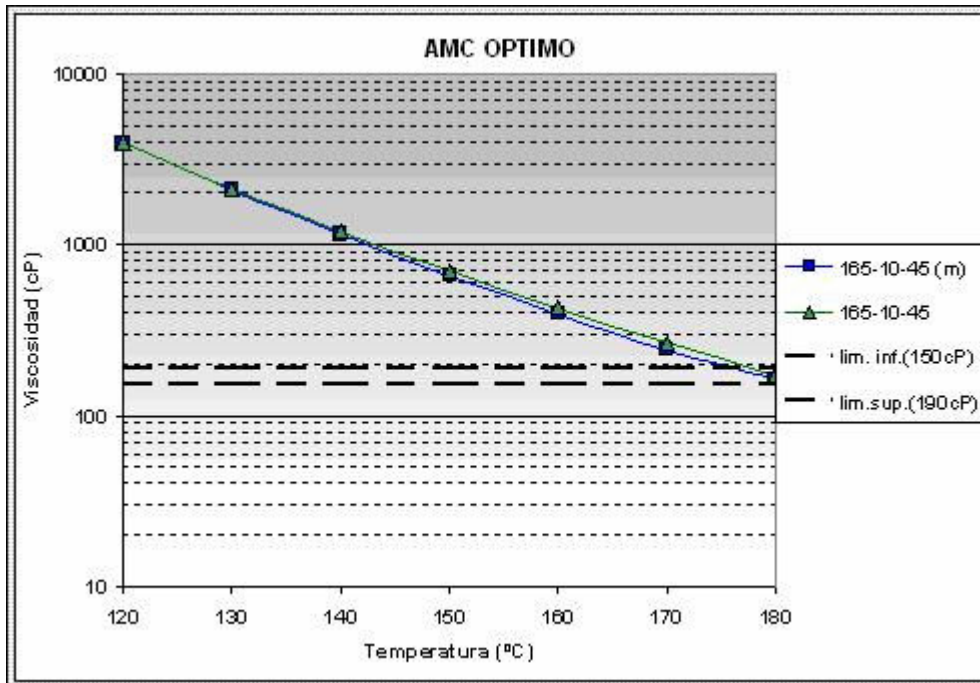


Figura 26. Curvas reológicas del AMC óptimo modelado y experimental.

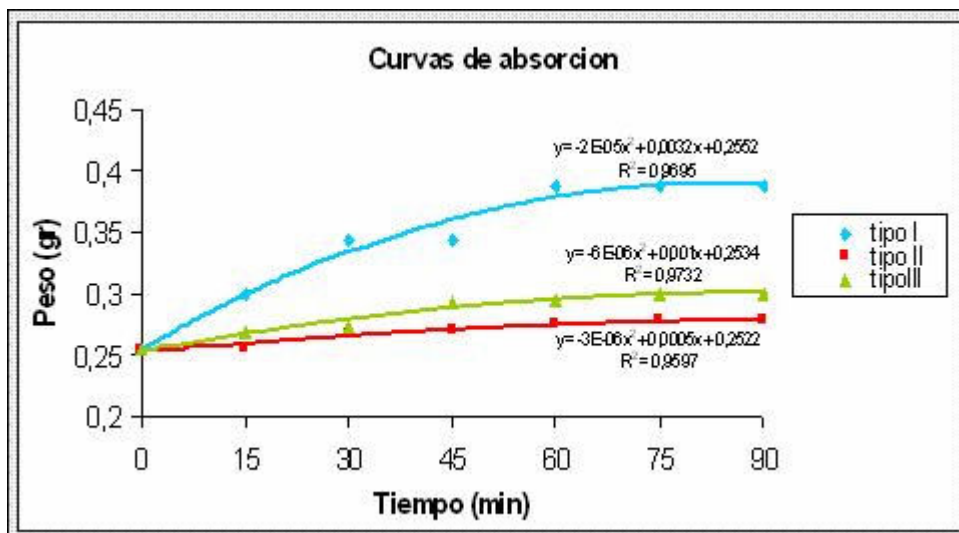


Figura 27. Curvas de absorción de los compatibilizantes en el CRL

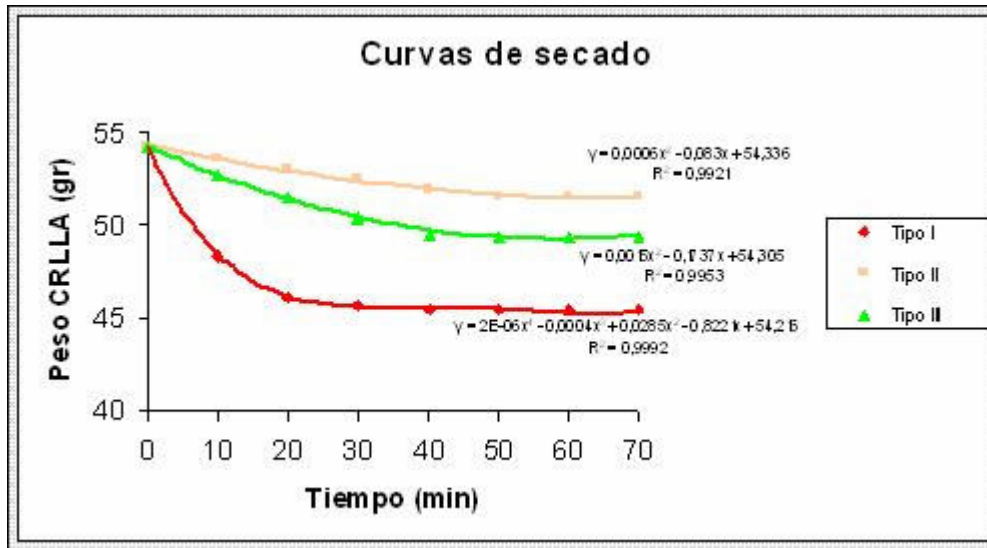


Figura 28. Curvas de secado del CRLA con cada compatibilizante.

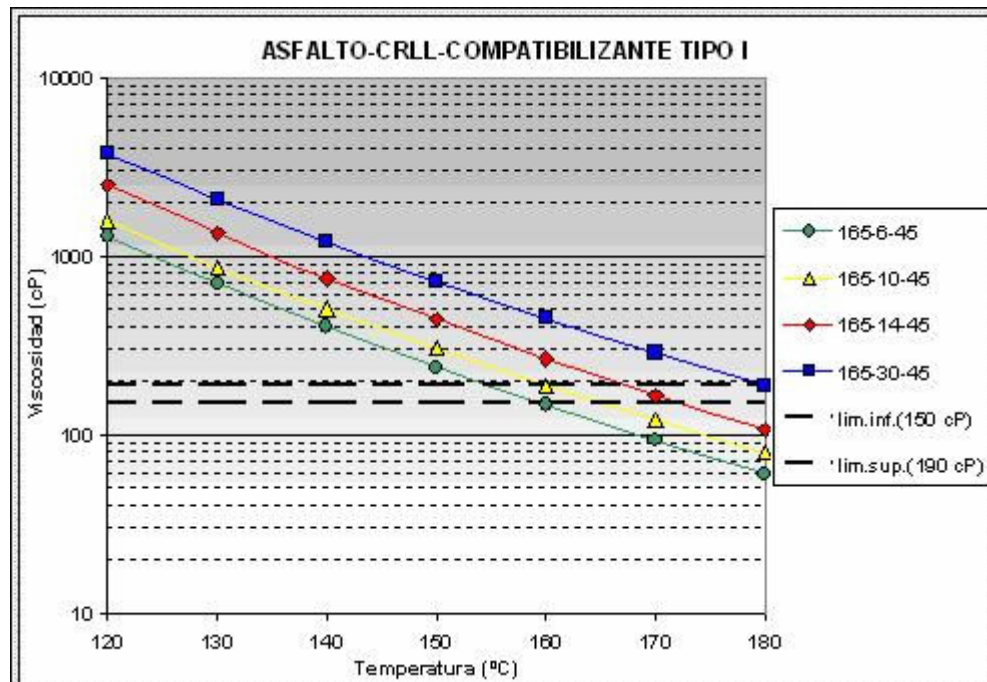


Figura 29. Curvas reológicas asfalto-caucho y compatibilizante tipo I

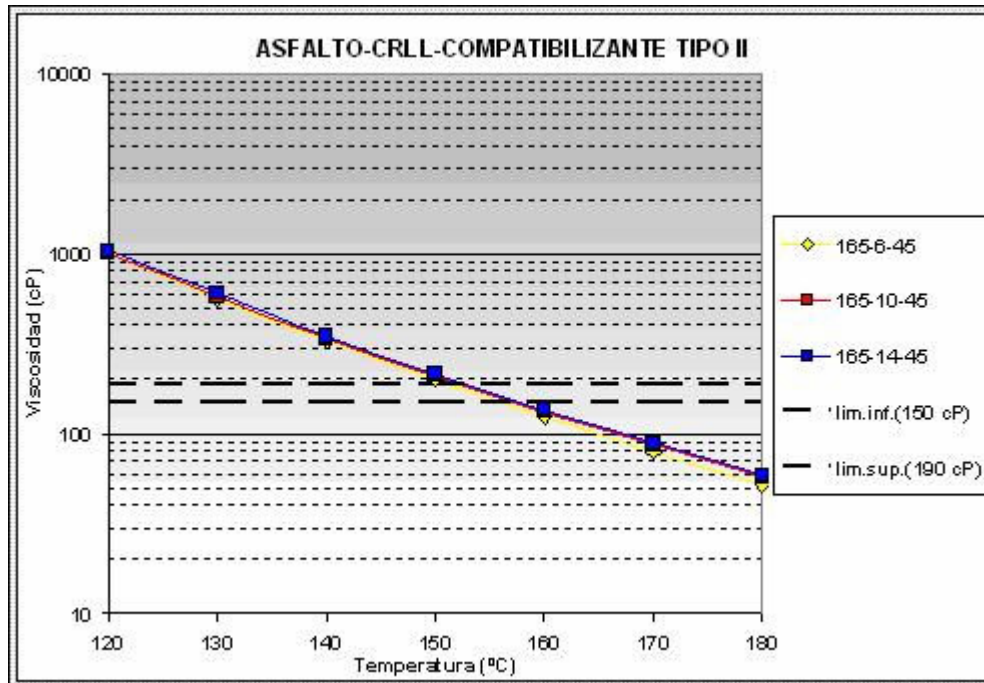


Figura 30. Curvas reologicas asfalto-caucho y compatibilizante tipo II

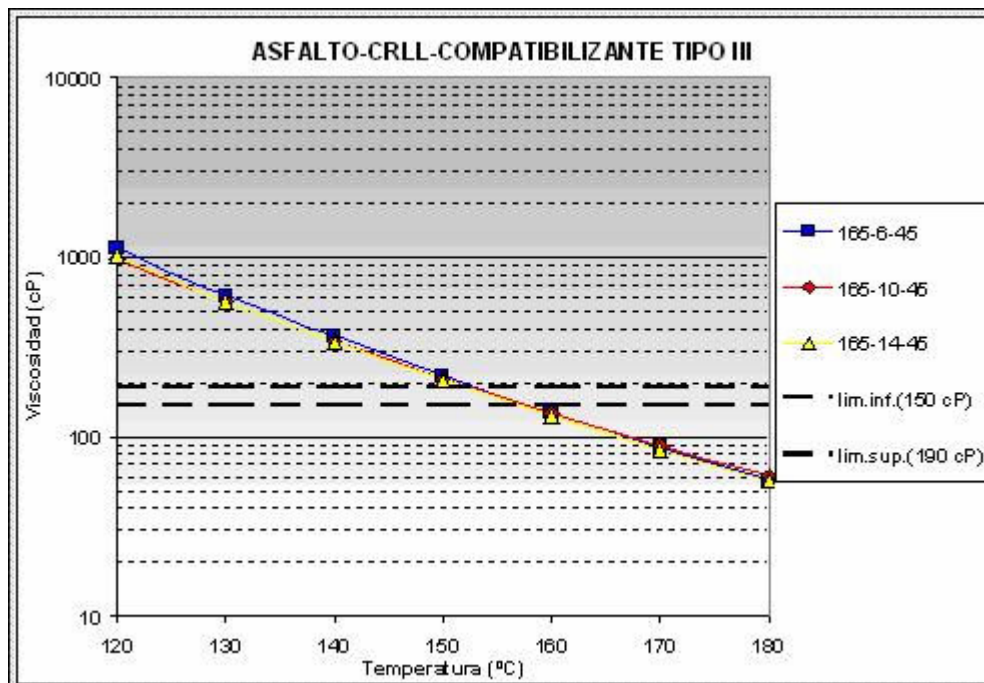


Figura 31. Curvas reologicas asfalto-caucho y compatibilizante tipo III

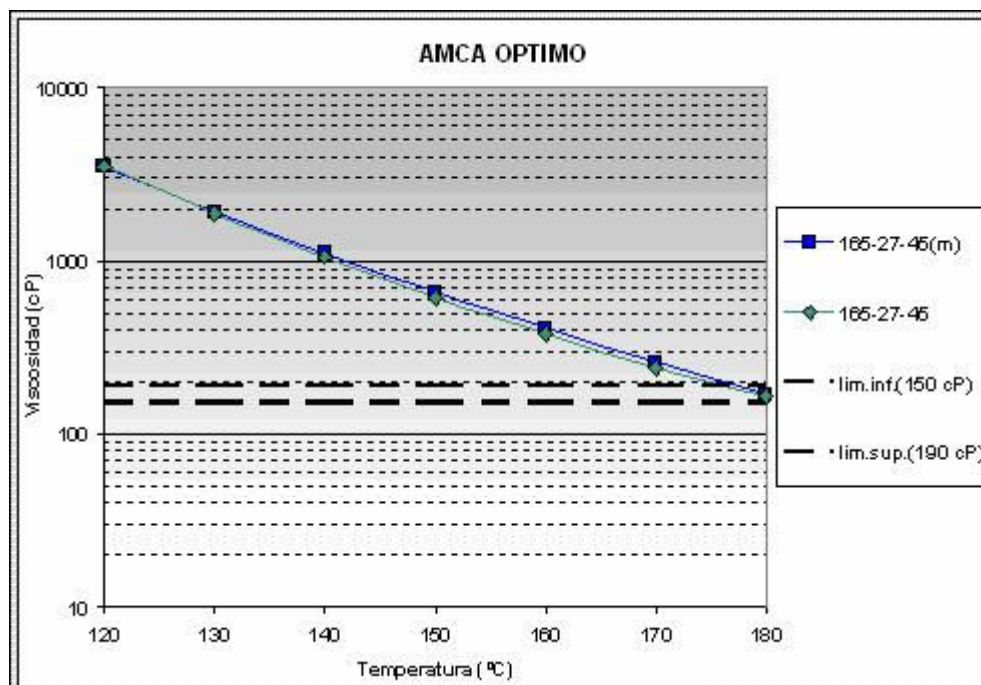


Figura 32. Curvas reológicas del AMCA optimo modelado y experimental.

Tabla 13. Caracterización compatibilizante tipo III

ASFALTOS MODIFICADOS	PTO ABLANDAMIENTO TOPE	PTO ABLANDAMIENTO FONDO	DIFERENCIA ENTRE EL TOPE Y FONDO
AMC	49	52	3
AMCA	37	40	3

Tabla 14. Caracterización de los asfaltos modificados óptimos

ENSAYOS	ASFALTOS MODIFICADOS OPTIMOS			EPECIFICACIONES ASFALTOS MODIFICADOS	
	A. ORIG.	AMC	AMCA	MINIMO	MAXIMO
Peso específico (g/cm ³)	0,923	1,016	1,021	-	-
Punto ablandamiento (°C)	41	48	35	60	-
Punto chispa (°C)	308	304	232	230	-
Ductilidad (cm)	> 100	24,4	32,7	15	-
Penetración (0,1 de mm)	74,6	52,5	245,6	55	70
Viscosidad absoluta (cP)	2,26E +05	6,95E+05	1,55E +05	-	-
Envejecimiento - pérdida de masa (g)	0,579	0,001	1,29	-	1
Envejecimiento - Penetración residual (% penetración original)	77,75	83,43	87,7	-	-
Recuperación elástica por torsión (%)	6	25	13	40	-
Estabilidad al almacenamiento - punto ablandamiento (diferencia °C)	-	3	3	-	5

ANEXO B

ESTIMACION DE COSTOS Y DISEÑO DE PLANTA PARA LA PRODUCCIÓN DE AMC Y AMCA A NIVEL INDUSTRIAL

En Colombia el único productor de asfaltos convencionales es Ecopetrol S.A, quien actualmente suministra 2 calidades en las refinerías de Barrancabermeja (Asfalto 70/90) y de Apiay (Asfalto 60/80) La producción anual promedio de asfaltos convencionales (sin modificar) en Colombia es del orden de 220.000 toneladas. Actualmente se dispone de una capacidad de producción de hasta 2.900.000 barriles por año (460.000 ton/año), la cual se va ajustando en la medida que el consumo nacional lo requiera. No se comercializa en el mercado internacional.

Tabla 15. Producción y consumo interno de asfaltos en países andinos

PAÍS	PRODUCCIÓN (ton/año)	CONSUMO (ton/año)	OBSERVACIONES
Venezuela	1.790.000	1.350.000	Energy International Agency, EIA
Colombia	220.000	220.000	Ecopetrol, VSM
Ecuador	170.000	170.000	DOE , An Energy Overview of Ecuador
Perú	73.000	N.D.	Petroperú-MEM
Bolivia	2.100	21.000	INE, Bolivia

Por otra parte, resultados experimentales muestran que dependiendo del tipo de polímero utilizado. En el mercado nacional, los asfaltos modificados tienen un precio entre 2 y 3 veces el del asfalto virgen, sin embargo, este mayor costo es compensado con la mayor vida útil de la mezcla asfáltica, que es del orden de hasta 3 veces la del asfalto comente. Teniendo en cuenta que el ligante asfáltico es solamente el 5% del total de la mezcla de concreto asfáltico, el costo total de dicha mezcla, cuando se usa asfalto modificado como por ejemplo con SBS, puede llegar a ser un 30% a 40 % mayor que el de una mezcla preparada con asfalto convencional. Sin embargo, la relación beneficio/costo es superior con asfaltos modificados, tal como lo demuestran experiencias reportadas en la literatura ^[6].

CONSIDERACIONES DEL PROYECTO.

Se trabajo sobre la idea del diseño y puesta en marcha de una planta para la producción de AMC y AMCA ubicada en Barrancabermeja debido a la disponibilidad de materias primas, y con el objeto de tomar un punto de partida para la evaluación técnico-económica, se tomaron las siguientes bases y supuestos:

- ❖ La planta se diseñara con el propósito de obtener el 5% del mercado nacional del asfalto, lo que representa una capacidad de producción de 11.000 Ton/año y dejando como margen de capacidad instalada un 20% de la producción (2.200 Ton/año) que adicionalmente se producirían según el crecimiento del mercado.
- ❖ Todos los cálculos de inversiones, precios y costo se estimaron en dólares.
- ❖ Se tomó una tasa de cambio promedio estimada para 2005 de 2.500 Col\$/US\$.

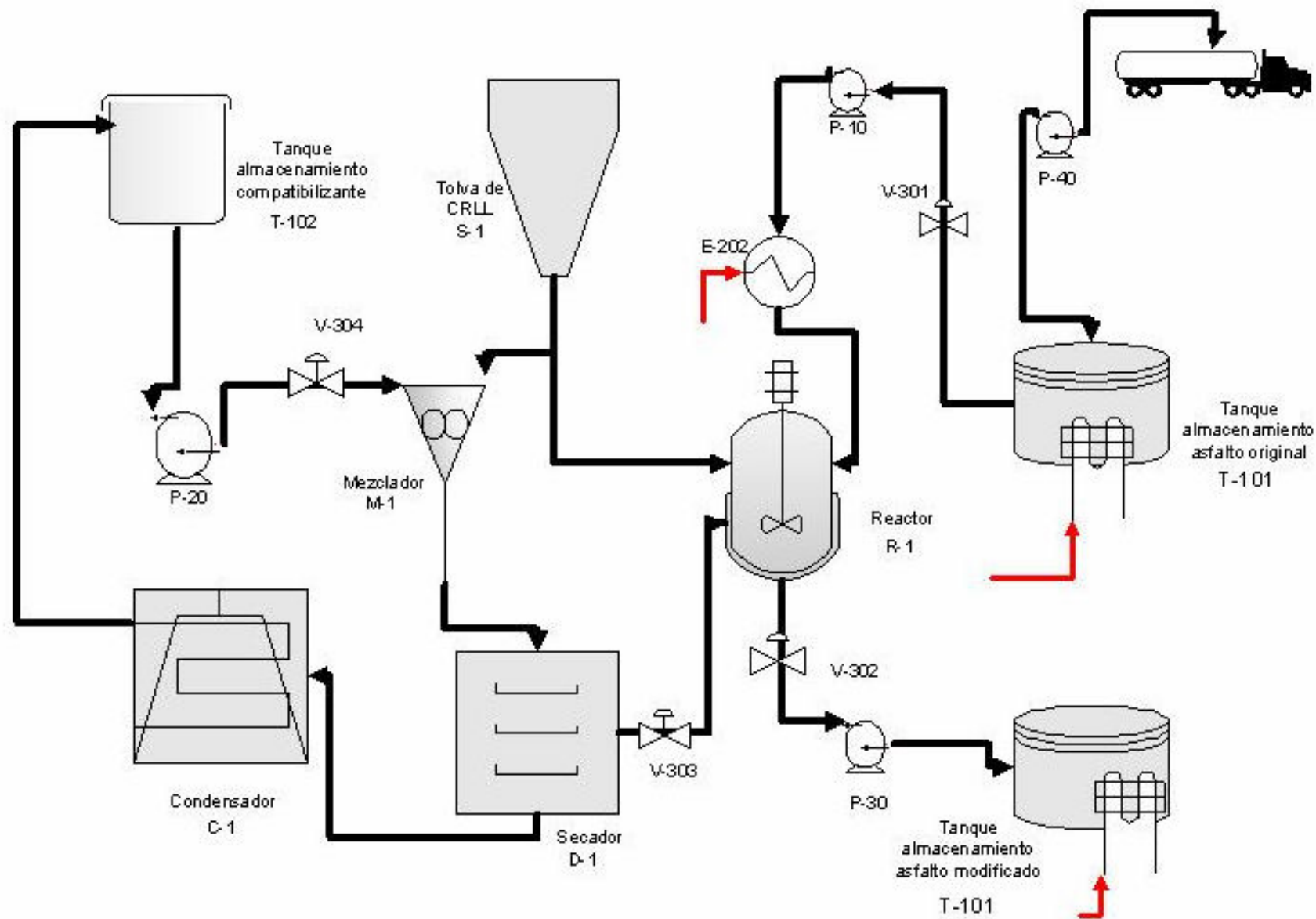


Figura 33. Proceso de planta industrial para la elaboración de asfaltos modificado

- ❖ El proyecto se evaluó a 15 años de operación, con dos años para inversiones. La tasa de oportunidad usada para las evaluaciones económicas es de 12%, en dólares.

Tabla 16. Capital fijo

CONCEPTO	COSTO US \$
Terrenos y edificaciones	1'750000
Muebles y enseres	440000
Equipos industriales	2'278320
	4'468285

Tabla 17. Costo de equipos

EQUIPO	COSTO F.O.B. US\$	UNIDADES	TOTAL US\$
Reactor	233000	1	233000
Tanque de almacenamiento	135000	1	135000
Tanque de almacenamiento	199500	3	598500
Mezclador	12400	1	12400
Secador	155100	1	155100
Tanque para suministro CRLL	71400	1	71400
Caldera	535200	1	535200
Bombas	14230	4	56920
Intercambiador	64500	3	193500
Condensador	287300	1	287300
Total			2'278320

Tabla 18. Costo de materias prima

MATERIAL	UNIDAD	COSTO/UNIDAD (US\$)
Asfalto	Ton	240
CRLL	Ton	200
Compatibilizante (tipo I)	Ton	430

Fuente: ECOPELROL, Reencauchadora Goodyear.

Tabla 19. Precio de venta del producto terminado

COSTOS	AMC	AMCA
Costos de la materia prima (US\$/ton)	250	267
Costo unitario de la producción (US\$/ton asf. mod.)	312	325
Precio de asfalto modificado (US\$/ton asf. mod.)	366	377

Tabla 20. Intervalos de precios en los mercados de USA y nacional.

AMC's	Precio mínimo	Precio máximo
Asfaltos modificados nacionales (US\$/ton)	380	500
Asfaltos modificados USA (US\$/ton)	208	241

Tabla 21. Nomina

CONCEPTO	PERSONAS	SALARIO (US\$ / MES)	TOTAL SALARIO (US \$ / año)
Gerente	1	1400	16800
Contadores	1	560	6720
Ingenieros	2	2400	28800
Técnicos de mantenimiento	4	5040	60480
Supervisores	1	1260	15120
Obreros	5	6000	72000
Aseadores	2	400	4800
Secretarias	2	560	6720
			211440

Tabla 22. Servicios industriales

SERVICIO	CONSUMO MENSUAL	COSTO UNITARIO	COSTO ANUAL (US \$/AÑO)
Agua potable	1685,94 m ³	0,41 US \$/m ³	8295
Agua caldera	1758,23 m ³	0,5 US \$/m ³	10550
Energía eléctrica	81562 kwh	0,1 US \$/ kwh	97875
Gas	2100 m ³	0,2 US \$/m ³	5040
			121759

INDICADORES FINANCIEROS

- ❖ **Tiempo del proyecto:** 15 años
- ❖ **Capital fijo:** 4'468.285 US\$
- ❖ **Capital de trabajo:** 35 % inversión total de capital: .2'406.000 US\$
- ❖ **Depreciación anual:** 8 % capital fijo: 309.600 US\$
- ❖ **Total ventas brutas (AMC & AMCA):** 4'147.000 US\$/año
- ❖ **Gasto de ventas:** 3 % Total ventas brutas: 124.410 US\$
- ❖ **Costo de manufactura total anual** (materias primas, servicios industriales, nomina): 2'757.828 US\$
- ❖ **Beneficio bruto anual:** Ventas brutas – costos de manufactura = 1'389.172 US\$
- ❖ **Beneficio neto antes de impuesto anual:** Beneficio bruto – gastos de ventas = 1'264.762 US\$
- ❖ **Impuesto a la renta:** 20% Beneficio Bruto anual: 277.834 US\$
- ❖ **Ganancia neta anual:** B.N.A.I – Impuesto a la renta = 986.928 US\$
- ❖ **Retorno de la inversión :**

$$ROI = \frac{\text{Ganancias Netas Anuales}}{\text{Capital Fijo} + \text{Capital de Trabajo}} * 100 = 14.4\%$$

❖ **Tiempo de recuperación del capital:**

$$\text{Tiempo de Pago} = \frac{\text{Inversión Total de Capital}}{\text{Beneficio Neto Anual antes Im puestos + Depreciación Anual}}$$

Tiempo de Pago = 4 años y 4 meses

❖ **Valor presente neto (tasa de oportunidad del 12%):**

$$P = \frac{R}{i} [1 - (1+i)^{-n}] \qquad P = \frac{S}{(1+i)^n}$$

Donde:

P: valor presente

R: anualidad

S: valor futuro

i: interés

V.P.N_(12%) = Ventas + Capital de trabajo recuperado – capital de trabajo –
capital fijo – costo de manufactura – costo de mercadeo – costo de impuesto

$$\text{V.P.N}_{(12\%)} = 28'244.655,1 + 439.567,2 - 2'406.000 - 4'468.285 - 2'757.828 \\ - 847.339,7 - 1'892.289,7 = 16'312.479,8$$

➤ **T.I.R. del proyecto : 17,26%**

ESPECIFICACIÓN DE EQUIPOS

TANQUE DE ALMACENAMIENTO SERPENTIN		SECADOR	
Identificación. Tanque (T101)	Fecha	Identificación. Secador (D1)	Fecha
Función: Almacenamiento de asfalto		Función: Retirar exceso de compatibilizante en el CRL.	
Operación: Discontinuo		Operación: Discontinuo	
TIPO: Tanque vertical sostenido por soporte en concreto armado.		TIPO: horno de tiro forzado	
Material: Acero al carbón. (CS)	Dimensiones : Diámetro 3 m Altura : 4 m	Material: Acero al carbón. (CS)	Dimensiones: Área de secado: 1 m ²
Condiciones de Operación: Temperatura 130° C, 1 atm		Condiciones de Operación: Temperatura 170° C, 1 atm.	

CONDENSADOR		CALDERA	
Identificación. Tanque (C 1)	Fecha	Identificación. Caldera (B10)	Fecha 19-07 – 04
Función: Recuperación de compatibilizante		Función: Producción de Vapor	
Operación: Discontinuo		Operación: Discontinuo	
TIPO:		TIPO: caldera a gas acua-tubular	
Material: Acero al carbón	Dimensiones : Diámetro : 2 m Altura : 3.18 m	Material: Acero al carbón	Dimensiones: Capacidad 5000 lb/h
Condiciones de Operación: Presión atmosférica		Condiciones de Operación: Presión 150 psia, Vapor saturado	

REACTOR		MEZCLADOR	
Identificación. Reactor (R 1)	Fecha	Identificación. Mezclador (M 1)	Fecha
Función: Interacción materias primas		Función: mezclar y homogenizar CRL-compatibilizante	
Operación: Discontinuo		Operación: Discontinuo	
TIPO: Reactor chaqueta de calentamiento y agitación		TIPO: Agitación	
Material: Acero inoxidable (SS)	Dimensiones : Diámetro 2 m Altura : 2 m	Material: Acero al carbón. (CS)	Dimensiones: Volumen 0.128 m ³ Potencia 3 Hp
Condiciones de Operación: Temperatura 165° C, 1 atm atmósfera.		Condiciones de Operación: Temperatura ambiente, 1 atm	

