

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE GEOQUÍMICA



**Estudio de la interacción entre surfactantes catiónicos
presentes en emulsiones asfálticas y rocas de diferentes
regiones del territorio Venezolano**

Trabajo Especial de Grado
presentado ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela por el Br. Joan
Daniel Bastidas Rodríguez
como requisito para aprobar
la asignatura Proyecto
Geoquímico II y optar al
Título de Licenciado en
Geoquímica.

Caracas, Septiembre 2008



ACTA

Los abajo firmantes, designados por la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del Jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: “**Estudio de la interacción entre surfactantes catiónicos presentes en emulsiones asfálticas y rocas de diferentes regiones del territorio venezolano**” presentado por el Br. Joan Daniel Bastidas Rodríguez, certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por nuestra Magna Casa de Estudios para optar al título de Licenciado en Geoquímica.

Lic. Alied Romero
Tutor

Prof. Ramón Montero
Tutor

Prof. Williams Meléndez
Jurado

Prof. Alonso Ojeda
Jurado



DEDICATORIA

Especialmente dedico este logro alcanzado a mi madre Mileyde, por darme la vida y su apoyo incondicional en mis estudios; a mi padre Cenobio por siempre estar con nosotros, a mis hermanos Lisbeth, Darwin, Elvis, Josue y Dahil por mantenernos unidos; a mi abuela Gina que a pesar de la distancia siempre estuvo pendiente en que terminara mis estudios académicos. Con mucho amor y cariño hoy en día les doy las gracias...



AGRADECIMIENTOS

Ante todo, doy gracias a Dios por darme fuerza y energía para seguir adelante en esta etapa de mi vida y poder continuar con las metas propuestas...

A mi madre Mileyde, por darme la vida y su apoyo incondicional; mi padre, hermanos, sobrinos y familiares, que siempre me apoyaron y nunca dejarme caer en el día a día, muchas gracias familia los quiero mucho...

A mi abuela Ginita que siempre estuvo pendiente, su buen consejo y abrigo en su casa, a mis tíos y de más familiares que de algún modo siempre me apoyaron. Gracias familia...

En segundo lugar quiero agradecer a la Universidad Central de Venezuela, la casa que vence las sombras y en especial a la Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias de La Tierra, por los conocimientos adquiridos y la oportunidad brindada, lo cual permitió fortalecer y aprender nuevos conocimientos, permitiendo mi desarrollo y crecimiento académico y profesional...

A Carol por ser una gran amiga incondicional, brindarme su apoyo y siempre darme un abrazo en los momentos difíciles de mi vida...Gracias amiga...

Al Grupo de Extensión CECOBIO, donde estude y compartí con muchas personas, momentos agradables y vivencias adquiridas dentro y fuera de la universidad...

A mis amigos y hermanos del alma: Ángel por nunca dejarme decaer; Andrés por su buen consejo y mente positiva; Jhon por lo correcto y cascarrabias; José por su mano amiga e incondicional. Gracias por compartir todo este tiempo y mantenernos juntos hasta el final, lo logramos hermanos...

A grandes amigas: Diana, Yela, Rosa, Sinaí y Jenifer, por que siempre tuvieron un momento para compartir conmigo sus bellos sentimientos y grandes virtudes que poseen, las quiero mucho amigas, nunca cambien...

Agradezco a la Empresa Clariant Venezuela, por la oportunidad brindada y aporte incondicional para realizar este proyecto de investigación en dichas instalaciones, especialmente al equipo y compañeros de trabajo del Laboratorio FUN-Aplicaciones...



A mis tutores la Lic. Alíed Romero, le deseo que Dios la bendiga siempre por ser una bella persona y por toda la amabilidad, atención y dedicación prestada. Al Prof. Ramón Montero, por su valiosa colaboración y desempeño, así como por sus buenos consejos. Ambos les doy un abrazo y de corazón les doy las gracias por permitir hacer realidad y llevar a cabo mi proyecto de Tesis...

A los jurados el Prof. Williams y Prof. Alonso, por su interés, compromiso, dedicación y revisión en este trabajo de investigación. Muchas gracias profesores...

A todos los profesores del Instituto de Ciencias de la Tierra por las enseñanzas adquiridas y compartidas en estos años de carrera...

Al personal administrativo, especialmente Libia, Marlin por el apoyo incondicional...

A cada uno de las canteras por permitir recolectar las muestras de estudio; Ing. Silvano Pierini por asesorarme en esta área del asfaltado; Prof. José Méndez por su buen consejo y ayuda en las rocas carbonáticas; Ing. Gustavo Merino de SECOFALCA por permitir realizar varios ensayos en su planta de asfalto.

Finalmente gracias a todos por el tiempo compartido y las experiencias vividas... Así como también aquellas personas que de alguna forma siempre me ayudaron a alcanzar esta meta propuesta que hoy día se hace realidad...



RESUMEN

A nivel mundial muchos países han implementado la técnica de Emulsiones Asfálticas debido a su evolución, desarrollo y aplicación en obras de pavimentación. Estas representan una alternativa con bajos costos de fabricación, aplicación y consumo de energía; así como la ventaja de ser amigable al medio ambiente por tratarse de mezclas a base agua, aplicadas totalmente en frío. A pesar que Venezuela cuenta con suficiente materia prima para la aplicación de las técnicas de asfaltado tradicionales, no ha tenido suficiente experiencia en la aplicación de Emulsiones Asfálticas.

Una Emulsión Asfáltica, contiene una molécula química (surfactante catiónico), que permite mantener estable una dispersión de finas gotas de asfalto en agua a través de un equilibrio electroquímico. Estas son obtenidas a partir de un proceso de cizallamiento que ocurre dentro de un molino coloidal, donde el emulsificante puede ocasionar una disminución o incremento en las propiedades de adherencia y cohesión, además de la capacidad de cubrir los minerales presentes en las rocas, características de gran importancia en la aplicación de tratamiento superficial o Slurry Seal.

Debido a lo antes expuesto, surge el presente trabajo con el propósito de desarrollar y evaluar el comportamiento de emulsiones asfálticas utilizando varios Surfactantes Catiónicos de la Línea *Emulsiv*® de Clariant. Mediante la fabricación de mezclas asfálticas en frío con seis tipos de rocas (silicios – calcáreos) en cinco zonas de Venezuela.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, puede señalarse que existe un alto grado de confiabilidad al surfactante *Emulsiv*® M1785 de rompimiento lento, ya que presentó excelente interacción con los distintos tipos de rocas en las mezclas asfálticas. Fue observado que la roca Cal. - Emp., de la zona del estado Aragua, presentó el mejor comportamiento de cubrimiento, cohesión y adhesión. Mientras que la roca Aren. – Falcón de la zona del estado Falcón, presentó una baja interacción con los distintos surfactantes evaluados. En conclusión los resultados obtenidos, ayudaran a contribuir con el éxito en la aplicación de la técnica de Emulsiones Asfálticas en el país, destinadas a tratamientos superficiales o Slurry Seal.

PALABRAS CLAVES: Emulsiones Asfálticas, Surfactante, Roca, Slurry Seal.



ÍNDICE

DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTOS	4
RESUMEN	6
ÍNDICE	7
ÍNDICE DE FIGURAS	10
ÍNDICE DE TABLAS	14
INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVOS	19
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	20
1. ASFALTO	20
1.1 Origen del asfalto	20
1.2 Definición de asfalto	20
1.3 Composición y estructura del asfalto.....	21
1.4 Propiedades del asfalto	24
1.5 Proceso de refinación del asfalto.....	25
1.5.1 Destilación primaria:	25
1.5.2 Destilación al vacío:	25
1.5.3 Desasfaltización con propano o butano:	25
1.6 Tipos de asfaltos	27
2 SURFACTANTE O EMULSIFICANTE.....	28
2.1 Definición.....	28
2.2 Tipos de surfactantes	31
2.2.1 Surfactantes aniónicos.....	31
2.2.2 Surfactantes no iónicos.....	32
2.2.3 Surfactantes catiónicos.....	32
2.2.3.1 Propiedades de los surfactantes catiónicos	33
2.3 Otros tipos de surfactantes (mezclas)	34
3 EMULSIÓN.....	34
3.1 Definición.....	34
3.3 Clasificación de las emulsiones.....	35
3.3.1 Según su fase dispersa	35
3.3.2 Según su fase interna	36
3.3.3 Según el tamaño de las gotas	36
3.4 Factores que afectan la estabilidad de la emulsión	37
3.4.1 Agente emulsionante:	37
3.4.2 Distribución y tamaño de gotas:.....	37
3.4.3 Porcentaje de agua:	37
3.4.4 Temperatura:	37
4 EMULSIONES ASFÁLTICAS	37
4.1 Definición.....	37
4.2 Clasificación de las emulsiones asfálticas	39
4.2.1 Según su carga eléctrica:	39
4.2.2 Según su forma de dispersión:	40
4.2.3 Según su velocidad de rompimiento:	40



4.3	Mecanismos y procesos en la interfase sólido – líquido	41
4.3.1	<i>Mecanismo de coalescencia de las emulsiones asfálticas</i>	42
4.3.2	<i>Procesos de adsorción sobre sólidos</i>	43
4.3.3	<i>Procesos de heterofloculación</i>	44
5	MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	47
5.1	Definición.....	47
5.2	Clasificación de las mezclas asfálticas.....	48
5.2.1	<i>Por fracciones de rocas empleado</i>	48
5.2.2	<i>Por la temperatura de puesta en obra</i>	48
5.2.3	<i>Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica</i>	49
5.2.4	<i>Por el tamaño máximo de los fragmentos de rocas</i>	49
5.2.5	<i>Por la estructura del mineral</i>	49
5.2.6	<i>Por la granulometría</i>	50
5.3	Tipos de mezclas asfálticas.....	50
5.3.1	<i>Mezcla asfáltica en caliente</i>	50
5.3.2	<i>Mezcla asfáltica en frío</i>	50
5.4	Granulometría de las mezclas asfálticas en frío.....	50
5.5	Aplicación de las mezclas asfálticas.....	52
5.5.1	<i>Tratamientos superficiales</i>	52
5.5.1.1	Tratamiento superficial simple.....	52
5.5.1.2	Tratamiento superficial doble o múltiple	53
5.5.1.3	Lechadas asfálticas ó “Slurry Seal”	53
5.5.1.4	Tipos de lechadas asfálticas	53
5.5.1.5	Aplicación de lechadas asfálticas.....	54
5.5.1.6	Ventajas de las lechadas asfálticas.....	55
6	ROCAS.....	56
6.1	Definición.....	56
6.2	Clasificación de las rocas	56
6.2.1	<i>Rocas ígneas</i>	57
6.2.2	<i>Rocas sedimentarias</i>	58
6.2.3	<i>Rocas metamórficas</i>	58
7	CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES A DETERMINAR EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	59
7.1	Cohesión	59
7.2	Adhesión	60
	ANTECEDENTES	61
	□ NACIONALES	61
	□ INTERNACIONALES.....	63
	ZONA DE ESTUDIO	65
	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	66
1.	RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS.....	66
2.	LABORATORIO	67
2.1	Caracterización de las muestras	67
2.2	Preparación de las emulsiones asfálticas catiónicas.....	69
2.2.1	<i>Proceso A: empleando un Mixer</i>	69
2.2.1.1	Selección de los surfactantes:.....	69
2.2.1.2	Preparación de las emulsiones asfálticas:	71



2.2.2	Proceso B: empleando un Molino coloidal	72
2.2.2.1	Selección del surfactante:	72
2.2.2.2	Preparación de las emulsiones asfálticas:	72
2.3	Ensayos realizados a las emulsiones asfálticas	73
2.3.1	Ensayos visuales:	73
2.3.2	Ensayos según las normas:	74
2.4	Preparación de la mezcla asfáltica	75
2.4.1	Método I:	75
2.4.1.1	Cubrimiento:	76
2.4.1.2	Cohesión:	76
2.4.1.3	Adhesión:	77
2.4.2	Método II:	77
2.4.2.1	Cubrimiento:	78
2.4.2.2	Cohesión:	78
2.4.2.3	Adhesión:	79
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		80
2	CARACTERIZACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS	95
2.1	Asfalto	95
2.2	Proceso A: empleando un Mixer	97
2.2.1	Selección de los surfactantes:	97
2.2.2	Fase I:	98
2.2.2.1	Emulsiones asfálticas:	98
2.2.2.2	Mezclas asfálticas (Método I):	104
2.2.3	Fase II	107
2.2.3.1	Emulsiones asfálticas:	107
a.	Cubrimiento:	114
b.	Cohesión:	120
c.	Adhesión:	121
2.3	Proceso B: empleando un Molino coloidal	124
2.3.1	Selección del surfactante:	124
2.3.2	Emulsión asfáltica:	125
2.3.3	Mezclas asfálticas (Método II):	125
a.	Cubrimiento:	128
b.	Cohesión:	130
c.	Adhesión:	133
CONCLUSIONES		135
RECOMENDACIONES		137
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		138
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		141
SEGÚN NORMAS		141
APÉNDICES		142



ÍNDICE DE FIGURAS

	Paginas
Figura 1. Representación esquemática de una molécula de Asfaleno	22
Figura 2. Método de separación SARA	23
Figura 3. Estructura molecular de los asfaltos (Modelo clásico)	24
Figura 4. Diagrama de refinación del petróleo	26
Figura 5. Ensayo de penetración	27
Figura 6. Molécula típica de un surfactante	29
Figura 7. Formación de micelas	30
Figura 8. Formas típicas de micelas	31
Figura 9. Representación esquemática de un surfactante aniónico	32
Figura 10. Representación esquemática de un surfactante noiónico	32
Figura 11. Representación esquemática de un surfactante catiónico	33
Figura 12. Representación de las emulsiones según su fase (W/O ó O/W)	36
Figura 13. Diagrama esquemática de una emulsión asfáltica	38
Figura 14. Esquema interno de un molino coloidal	38
Figura 15. Adsorción de las moléculas de surfactantes en la interfase asfalto – agua	39
Figura 16. Representación esquemática de emulsiones asfálticas aniónicas y catiónicas	40
Figura 17 a y b. Mecanismo de coalescencia de las emulsiones asfálticas	42
Figura 18. Adsorción del surfactante en una interfase sólido – líquido	43
Figura 19. Esquemización de las isothermas de adsorción del proceso de heterofloculación	45
Figura 20. Interacción superficie del sólido-gota de asfalto zona 1	45
Figura 21. Interacción superficie del sólido-gota de asfalto zona 2	46
Figura 22. Interacción superficie del sólido-gota de asfalto zona 3	46
Figura 23. Interacción superficie del sólido-gota de asfalto zona 4	47
Figura 24. Curva granulométrica para mezclas asfálticas	52
Figura 25. Esquema de un camión espaciador de lechada asfáltica	55



Figura 26. Clasificación de las rocas ígneas	57
Figura 27. Clasificación de las rocas metamórficas	59
Figura 28. Representación de fuerzas de cohesión y adhesión	60
Figura 29. Mapa de la Republica Bolivariana de Venezuela ilustrando la ubicación relativa de las cinco zonas de estudio y las canteras	65
Figura 30. Molino Coloidal utilizado para realizar la emulsión asfáltica de forma instantánea	73
Figura 31. Análisis granulométrico del material proveniente de la cantera El Vegón C.A	81
Figura 32. Imágenes fotográficas de las secciones finas en las rocas de la cantera El Vegón C.A	82
Figura 33. Análisis granulométrico del material proveniente de la cantera Empronacal C.A	84
Figura 34. Imágenes fotográficas de las secciones finas en las rocas de la cantera Empronacal C.A	85
Figura 35. Análisis granulométrico del material proveniente de la cantera Conacal CVG	86
Figura 36. Imágenes fotográficas de las secciones finas en las rocas de la cantera Conacal CVG	87
Figura 37. Análisis granulométrico del material proveniente de la cantera Palma Sola	89
Figura 38. Imágenes fotográficas de las secciones finas en las rocas de la cantera Palma Sola	90
Figura 39. Análisis granulométrico del material proveniente de la cantera Los Andes	92
Figura 40. Imágenes fotográficas de las secciones finas en las rocas de la cantera Los Andes C.A	93
Figura 41. Imágenes fotográficas de las secciones finas en las rocas de la cantera Falcón	94
Figura 42. Ensayo del % Retenido de las emulsiones asfálticas de los surfactantes puros evaluados	100



Figura 43. Ensayo del % Retenido de las emulsiones asfálticas de mezclas de surfactantes evaluados incrementando grupos aminos	101
Figura 44. Comparación entre el % Retenido y el % Sedimentación de las emulsiones asfálticas de surfactantes puros	102
Figura 45. Comparación entre el % Retenido y el % Sedimentación de las emulsiones asfálticas en mezclas de surfactantes	103
Figura 46. Proceso de coalescencia que puede ocurrir en las emulsiones asfálticas	104
Figura 47. Mezcla asfáltica del agregado Aren. – Falcón de la cantera Falcón	105
Figura 48. Ensayo del % Retenido de las emulsiones asfálticas en cada uno de los surfactantes utilizados	109
Figura 49. Comparación entre el % Retenido y el % Sedimentación de las emulsiones asfálticas	110
Figura 50. Modelo propuesto para rompimiento de la emulsión asfáltica en tipos de rocas carbonáticas (a) y rocas ácidas (b)	117
Figura 51. Ensayo de adhesión en las mezclas asfálticas del tipo de roca Cal. – Veg. (Edo. Aragua)	121
Figura 52. Ensayo de adhesión en las mezclas asfálticas del tipo de roca Cal. – Emp. (Edo. Aragua)	122
Figura 53. Ensayo de adhesión en las mezclas asfálticas del tipo de roca Cal. - CVG (Edo. Anzoátegui)	122
Figura 54. Ensayo de adhesión en las mezclas asfálticas del tipo de roca Gns. – Pal. S. (Edo. Bolívar)	123
Figura 55. Ensayo de adhesión en las mezclas asfálticas del tipo de roca Gns. – Los Andes (Edo. Mérida)	124
Figura 56. Ensayo de consistencia (% óptimo de agua) en cada una de las muestras de rocas	126
Figura 57. Ensayo de inmersión por abrasión en cada una de las muestras de rocas	127
Figura 58. Comportamiento de cohesión en la mezcla asfáltica con la caliza de la cantera El Vegón C.A	130



Figura 59. Comportamiento de cohesión en la mezcla asfáltica con la caliza de la cantera Empronacal C.A	131
Figura 60. Comportamiento de cohesión en la mezcla asfáltica con la caliza de la cantera Conacal CVG	131
Figura 61. Comportamiento de cohesión en la mezcla asfáltica del gneis y anfibolita de la cantera Palma Sola C.A	132
Figura 62. Comportamiento de cohesión en la mezcla asfáltica de la cantera Los Andes	133
Figura 63. Ensayo de adhesión realizado a las mezclas asfálticas	133
Figura 64. Ensayo de adhesión de las mezclas asfálticas (a) Cal. – Emp. y (b) Cal. – CVG	134



ÍNDICE DE TABLAS

	Paginas
Tabla 1. Requisitos de calidad para carpetas asfálticas de granulometría abierta	51
Tabla 2. Granulometría para lechadas asfálticas o Slurry Seal	54
Tabla 3. Clasificación de las rocas sedimentarias	58
Tabla 4. Ubicación de las seis canteras en estudio	66
Tabla 5 Nomenclatura de los surfactantes seleccionados en la primera evaluación de las emulsiones asfálticas fabricada mediante el proceso A	70
Tabla 6. Nomenclatura de los surfactantes seleccionados en la segunda evaluación de las emulsiones asfálticas fabricada mediante el proceso A.	71
Tabla 7. Composición química de las rocas recolectada en la cantera El Vegón C.A (Edo. Aragua)	83
Tabla 8. Composición química de las rocas recolectada en la cantera Empronacal C.A	85
Tabla 9. Composición química de las rocas recolectada en la cantera Conacal CVG	88
Tabla 10. Composición química de las rocas recolectada en la cantera Palma Sola C.A. (Edo. Bolívar)	91
Tabla 11. Composición química de las rocas recolectada en la cantera Los Andes C.A. (Edo. Mérida)	93
Tabla 12. Composición química de las rocas recolectada en la cantera Falcón. (Edo. Falcón)	95
Tabla 13. Caracterización del cemento asfáltico A-20 (asfalto 60/70)	96
Tabla 14. Mezcla de surfactantes a ser evaluados en las emulsiones asfálticas	97
Tabla 15. Evaluación y ensayos de las emulsiones asfálticas primera evaluación	99
Tabla 16. Modificaciones a realizar para mejorar el ensayo de cubrimiento, adhesión y cohesión en las mezclas asfálticas de la primera evaluación	106



Tabla 17. Evaluación y ensayos de las emulsiones asfálticas segunda evaluación	108
Tabla 18. Distribución granulométrica de las emulsiones asfálticas realizadas con el Mixer en la segunda evaluación	111
Tabla 19. Ensayo de cubrimiento, cohesión y adhesión de las mezclas asfálticas en la segunda evaluación	113
Tabla 20. Cubrimiento de la emulsión asfáltica (Emulsiv® M1785) con los distintos tipos de rocas	115
Tabla 21. Cubrimiento de la emulsión asfáltica al variar el tipo de surfactante en el tipo de roca Gns. – Pal. S.	119
Tabla 22. Ensayo de cohesión cualitativo en las mezclas asfáltica (Método I)	120
Tabla 23. Caracterización de la emulsión asfáltica obtenida con el molino coloidal	125
Tabla 24. Resultados obtenidos en las diferentes mezclas asfáltica del surfactante Emulsiv M1785	126
Tabla 25. Evaluación del cubrimiento en las mezclas asfálticas obtenidas a partir de la emulsión realizada con el molino coloidal	129



INTRODUCCIÓN

A principios del siglo XX, específicamente en 1905, aparecieron las primeras emulsiones de tipo asfáltica para la construcción de carreteras en la ciudad de Nueva York. La emulsión utilizada era del tipo aniónica y fue empleada para recubrir los caminos, como una alternativa para evitar el polvo cuando transitaban los vehículos (Rivera, 1977)

Los países con mayor producción de emulsiones asfálticas, en orden de importancia son: Estados Unidos, Francia, España y Japón. Estos cuatro países fabrican aproximadamente el 40% de la producción mundial de emulsión asfáltica, estimándose una cantidad próxima a los dieciséis millones de toneladas, de la que más del 85% es del tipo catiónica.

La primera aplicación de una emulsión asfáltica en Venezuela ocurrió en 1926 la cual fue importada por Inglaterra y Estados Unidos, la misma fue utilizada en las calles de la urbanización “El Paraíso”, en donde se residenciaban los personajes de la aristocracia y el poder político de Caracas. Para 1932 el Ministerio de Obras Públicas instala su propia planta para la fabricación de emulsiones y en 1937 comienza hacer un material común en la construcción de carreteras, aplicándose luego en la pavimentación de la gran “Carretera del Este” que une Caracas con Guatire.

El 13 de Octubre de 1950, la Refinería de Amuay produce el primer “bache” de un nuevo asfalto de pavimentación, que no contiene gasolina, pero para ser trabajado en obra requiere ser calentado a temperaturas cercanas a los 135°C, comienza en ese día la era del “*asfalto en caliente*” en nuestro país. Este material asfáltico es el que se emplea hoy en día en la fabricación de la mayoría de las mezclas asfálticas de pavimentación (INVEAS, 2007).

Las emulsiones asfálticas están compuestas de aproximadamente un 60% de asfalto y un 40% de fase acuosa que contiene no más de 1,3 % de un compuesto químico conocido como surfactante. Este es empleado en su forma catiónica, permitiendo que la fase oleosa se mantenga suspendida en agua mediante equilibrio electroquímico.



Actualmente son utilizados surfactantes catiónicos para la formulación de emulsiones asfálticas destinadas al área de pavimentación, las cuales pueden ser aplicadas bajo diversas técnicas de tratamiento superficial, entre los que destacan: reciclado, sellados, riegos, slurry seal, entre otros (Romero, 2006).

El empleo de las emulsiones asfálticas sobre diferentes tipos de rocas, cuya composición varía a lo largo de toda la geografía del país, puede originar cambios en las interacciones químicas, entre los minerales presentes en las rocas y el tipo de molécula presente en las emulsiones asfálticas; esto puede ocasionar que disminuyan o incrementen sus propiedades de adherencia y cohesión, además de la capacidad de cubrir las rocas, características de gran importancia en el diseño de los nuevos pavimentos.

En este sentido, con el estudio de las diversas rocas y sus minerales, se pretende investigar los fenómenos químicos y físicos asociados al proceso de interacción o adsorción en las mezclas asfálticas, así como a sus características geoquímicas. Realizando diversos ensayos sobre emulsiones asfálticas preparadas a partir de diversos tipos de emulsificantes de la línea *Emulsiv*[®] de la empresa Clariant.

El interés desde el punto de vista Geoquímica, radica principalmente, en investigar en base a la clasificación, composición mineralógica y cargas superficiales generadas en las rocas, los fenómenos que ocurren al interactuar con moléculas químicas de surfactantes de distintas cadenas carbonadas y estructuras moleculares, que permita concluir acerca de los comportamientos observados.

Las muestras que formarán parte de este estudio, serán obtenidos a partir de seis (6) canteras ubicadas en cinco zonas del país, a saber: Mérida, Falcón, Aragua, Anzoátegui y Bolívar. Debe señalarse que estas muestras tendrán una granulometría única y certificación como agregados minerales destinados a obras civiles.

Justificación

Las emulsiones asfálticas representan una técnica alternativa al empleo de asfalto en caliente para construcción de vías. En la actualidad, Venezuela emplea con mayor preferencia la técnica en caliente la cual genera una gran cantidad de emisiones asfálticas altamente contaminantes (CO_2 , CO , NO_x , SO_2 , compuestos poliaromáticos



PCA y polvo) al medio ambiente, que pone en riesgo la salud del personal que se encuentra expuesto a la misma (Rodríguez, 2001-a); también emplean el asfalto rebajado con solventes orgánicos y en poco porcentaje las emulsiones asfálticas. En vista de que en el pasado, esta técnica no tuvo un buen desempeño por desconocimiento de muchos factores químicos que ocurren en su aplicación a través de mezclas asfálticas.

Muchos países emplean las emulsiones asfálticas para realizar tratamientos superficiales o Slurry Seal, mantenimiento de vías y aeropuertos. Debido a que se conoce ampliamente sobre su buen uso, beneficios y condiciones de almacenamiento entre otros, por lo cual resulta ser una técnica con gran éxito a nivel mundial.

Los asfaltos rebajados con solventes orgánicos como gasolina, kerosén o nafta, han sido sustituidos por las emulsiones asfálticas por contener agua en vez de productos altamente contaminantes al ambiente y a la salud de los constructores de obras. En Venezuela aún emplean esta técnica, a pesar de los beneficios de ser un país con alta producción de derivados del petróleo.

Muchos expertos en el área de obras civiles, consideran que las emulsiones de asfalto se convertirán en pocos años en la técnica preferida para el mantenimiento preventivo y tratamiento superficial o Slurry Seal, así como el reciclado de vías. Estas emulsiones en el futuro predominarán sobre el asfaltado en caliente ya que pueden ser utilizadas en zonas de difícil acceso y vías agrícolas, para la consecuente sustitución por completo del uso de asfaltos diluidos o rebajados.

Clariant, a través de sus laboratorios de Investigación en Venezuela y Brasil, han desarrollado la línea de productos *Emulsiv*[®] compuesta por emulsificantes destinados al área de asfaltado. Estos productos incluyen surfactantes de tipo catiónico, entre otros, los cuales han demostrado tener una alta calidad y excelente desempeño para obtener emulsiones estables, acordes a las normas vigentes en cada país. Por tal motivo los productos a ensayar en este trabajo, han sido aprobados en países como Brasil, Colombia, El Salvador y México.

Por lo antes expuesto, a continuación se presentan los siguientes objetivos:



OBJETIVOS

Objetivo General:

Estudiar la influencia que adquiere la composición química y mineralógica de diversas rocas recolectadas en seis canteras del territorio venezolano, al variar el tipo de surfactante catiónico presente en las emulsiones para el desarrollo de mezclas asfálticas.

Objetivos Específicos:

- Determinar la composición química y mineralógica de las diversas rocas recolectadas en seis canteras del territorio venezolano.
- Determinar la estabilidad de las emulsiones asfálticas según las normas COVENIM y A.S.T.M.
- Evaluar el cubrimiento de las emulsiones sobre los seis tipos de rocas, así como cambios en las propiedades de cohesión y adhesión en las mezclas asfálticas.
- Relacionar el cubrimiento de las emulsiones asfálticas con la mineralogía presente en las rocas a través del estudio de macro y microfotos en las mezclas asfálticas.



REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Las emulsiones asfálticas se obtienen a partir de la mezcla de una fase oleica “Fo” la cual contiene ~ 60% de asfalto y una fase acuosa “Fw” de ~ 40%. La fase acuosa esta compuesta por una proporción mayoritaria de agua, una molécula química hidrocarbonada conocida como surfactante ó emulsificante que permite estabilizar las gotas de asfalto con una dosis de $\leq 1,3\%$ y ácido clorhídrico entre 2 – 3%, el cual permite controlar el pH del medio y protonar a las moléculas del surfactante.

Para obtener esta emulsión asfáltica es necesario la utilización de un mezclado instantáneo, el cual se obtiene a través de la agitación de un molino coloidal, este permite obtener gotas entre 1 a 5 micras (Prato, 1999).

Por tal razón se hace imprescindible conocer y estudiar las características y propiedades presentes en cada unas de las fases, para de esta forma poder interpretar los fenómenos que ocurren al interaccionar las emulsiones asfálticas con los minerales presente en las diversas rocas de estudio. En este sentido, seguidamente es realizada una breve descripción de los principales conceptos y propiedades de las distintas fases involucradas en las mezclas asfálticas.

1. ASFALTO

1.1 Origen del asfalto

El origen del asfalto es atribuido al mismo que el del petróleo, ya que está presente en la fracción sólida, originado a causa de los procesos de alteración del petróleo. No obstante, es pertinente resaltar que el petróleo, es cualquier ocurrencia natural de material en estado gaseoso, líquido, semisólido o sólido compuesto por hidrocarburos, con menores cantidades de nitrógeno, oxígeno y azufre y metales como V y Ni. Presenta tres fracciones: sólida (asfalto, bitumen); gaseosa (gas natural) y líquida (crudo), (López, 2006).

1.2 Definición de asfalto

El término asfalto es genérico e incluye al generado de forma natural provenientes de reservorios de asfalto, calizas bituminosas y arenas bituminosas. En cambio, el asfalto clásico es un producto derivado del petróleo y es sinónimo de



bitumen, que es el término equivalente ampliamente usado en Europa (Izatt, 1982; Rodríguez, 2001-a).

The American society for Testing and Materials (ASTM, 1992), define asfalto como “un material cementíco de coloración marrón a negra, de consistencia sólida o semisólida, cuya constitución principal son bitúmenes que existen en forma natural o del procesamiento del petróleo”. Por su parte el término bitumen es definido como “una mezcla de hidrocarburos de origen natural o pirogénico, o ambos, frecuentemente acompañados por derivados no metálicos que pueden ser gaseosos, líquidos, semisólidos o sólidos, los cuales son solubles en disulfuros de carbono”.

El asfalto es un material de los llamados termoplásticos, bastante complejo desde el punto de vista químico, ya que es obtenido como residuo en el proceso de refinación del petróleo. Esto hace que el control de calidad de este material sea pobre, además de tratarse de mezcla bastantes complejas químicamente. Sin embargo, es un material de suma importancia para la industria de la construcción por sus propiedades de consistencia, adhesividad, impermeabilidad y durabilidad. También debido a su bajo costo ya que, como fue mencionado, es el residuo en el proceso de refinación del petróleo (Rodríguez, *et al.* 2001-b).

El asfalto es un material cementante, de color marrón oscuro a negro, de consistencia sólida, semisólida o líquida, en el que el principal componente son los bitúmenes. El asfalto se obtiene como residuo en la refinación del petróleo crudo o de forma natural (INVEAS, 2007).

1.3 Composición y estructura del asfalto

El asfalto puede ser descrito como una mezcla compleja de hidrocarburos, por lo que su análisis químico es reportado en términos de dos fracciones: asfaltenos y maltenos. La primera es la fracción pesada denominada asfaltenos, estos son insolubles en compuestos orgánicos de bajos peso molecular como n-heptano y n-pentano pero solubles en hidrocarburos aromáticos como benceno, tolueno o xileno. Son los constituyentes más reactivos del bitumen y consisten en una mezcla de



compuestos aromáticos policíclicos de estructura compleja que contiene tanto cadena alifáticas como alicíclicas. La Figura 1 se observa una molécula de asfaltenos, en donde se representan el grupo polar, así como la zona aromática y sus cadenas alifáticas.

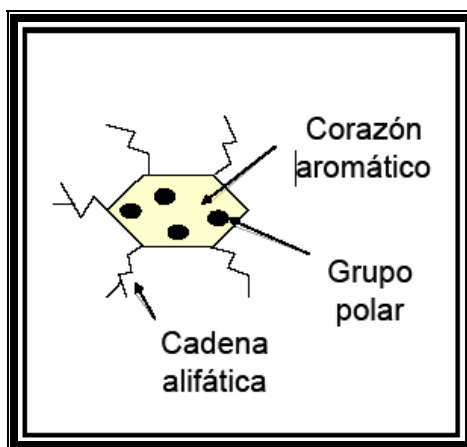


Figura 1. Representación esquemática de una molécula de Asfaleno.
(FIRP, 2001)

La unidad más simple en la estructura de los asfáltenos está constituida por macromoléculas laminares, cuyo peso molecular está en el orden de 500 a 1000 UMA (pesos moleculares promedio que rondan la cifra de 1500 g/mol), unidas a su vez por puentes de disulfuros, alquilos, oxígeno e hidrógeno, constituyendo así una matriz que reúne un conjunto de láminas en una unidad mayor, fácilmente observable, denominada partícula (10×10^3 a 10×10^4 UMA). Los asfáltenos presentan la siguiente composición centesimal:

Carbono:	80-85%	O	>1%
Hidrógeno:	6-7%	N	>0,5%
Aromáticos:	en promedio 50%	Ni	>100ppm
S	3-10%	V	>300ppm

La segunda fracción denominada maltenos es liviana y se divide en tres, a saber:

1. Saturados, incluyen parafinas y naftenos.
2. Aromáticos, son moléculas aromáticas de bajo peso molecular, no contienen níquel ni vanadio.
3. Resinas, las cuales son definidas como las fracciones no coloide del petróleo, que son solubles en n-alcanos, como el pentano, y en solventes aromáticos,



como el tolueno, pero insolubles en ácidos como el etil-acetato. Son relativamente bajas en peso molecular y ocurren en formas que incluyen desde líquidos a sólidos pastosos.

La separación de estas dos fracciones se realiza por medio de la extracción con compuestos orgánicos de bajos peso molecular como n-heptano y n-pentano, lo cual permite que la fracción pesada, es decir, los asfáltenos precipiten mientras que la otra fracción liviana permanezca en solución. La Figura 2 permite observar la separación de estas fracciones.

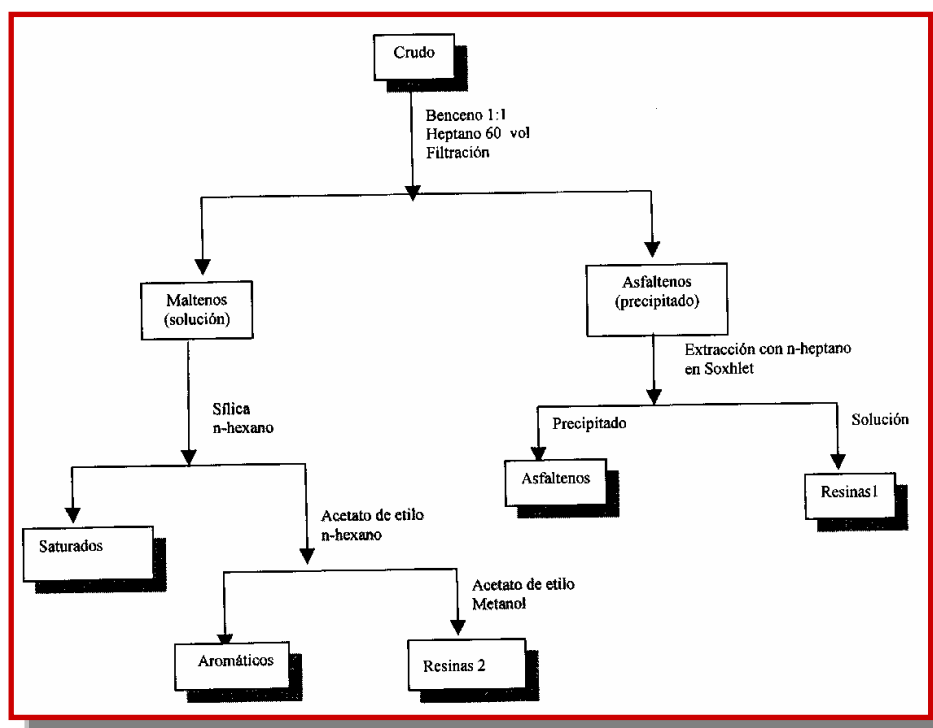


Figura 2. Método de separación SARA

En cuanto a la estructura, los asfáltenos y maltenos forman un sistema coloidal, en el cual la fase dispersa es la mezcla de asfáltenos suspendida como micelas en la fase continua de maltenos. La Figura 3 muestra la estructura de ambas fases (Tissot y Welte, 1984). La estabilidad de este sistema está dada por los aromáticos y resinas. En general cuanto mayor es el contenido de asfáltenos, menos newtoniano es el asfalto en su comportamiento reológico (Rodríguez, 2001-a).

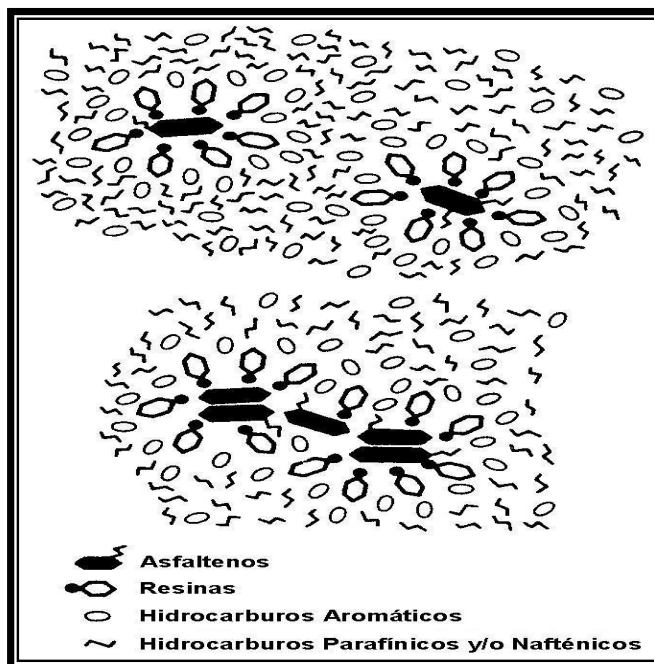


Figura 3. Estructura molecular de los asfaltos (Modelo clásico)
(Tissot y Welte, 1984)

1.4 Propiedades del asfalto

1. Los asfaltos son de color negro a marrón oscuro, pudiendo estar en estado sólido, semisólido o líquido a temperatura ambiente. Su densidad varía de 1,1 a 1,4.
2. Los sólidos tienen fractura concoidea, reblandecen sobre los 50°C y funden de 100 a 130°C. Arden sin dejar residuo, con llama amarillo verdosa. Son muy estables aún a temperatura de 250°C, perdiendo menos del 1%. Los asfaltos, con el tiempo experimentan un envejecimiento, debido a la oxidación. Los rayos ultravioleta del sol, el agua y la actividad microbiana del suelo actúan en la degradación del asfalto (Batista y Maingón, 1993)
3. El asfalto es no miscible al estar en contacto con el agua.

El asfalto es muy susceptible a cambios de temperatura y sufre envejecimiento por meteorización debido a largos tiempos de exposición; es también afectado por la oxidación y la foto-degradación. Respecto a sus propiedades mecánicas, éstas son muy pobres ya que es quebradizo a bajas temperaturas y fluye a temperaturas un poco



arriba de la temperatura ambiente; tiene además una baja recuperación elástica. Todos estos factores limitan ampliamente su intervalo de utilidad (Rodríguez, 2001-b).

1.5 Proceso de refinación del asfalto

El petróleo es una mezcla de distintos hidrocarburos que incluyen desde gases muy livianos como el metano hasta compuestos semisólidos muy complejos. Para obtener este, debe separarse las distintas fracciones del crudo en el petróleo a través de los diferentes procesos de destilaciones realizadas en las refinerías. La figura 4 se aprecia el proceso de refinación del petróleo. Entre los procesos de refinación, tenemos los siguientes:

1.5.1 Destilación primaria: es la primera operación a la que se somete el crudo, consiste en calentar el crudo en hornos tubulares hasta aproximadamente 375°C. Los componentes livianos (nafta, kerosén, gas oil), a esta temperatura ebulle y se transforman en vapor. La mezcla de vapores y líquidos caliente pasa a una columna fraccionada. El líquido o residuo de la destilación primaria se deposita en el fondo de la columna y de ahí se bombea a otras unidad de la refinería (Batista y Maingón, 1993).

1.5.2 Destilación al vacío: para separar el fondo de la destilación primaria, una fracción libre de asfáltenos y otra con el concentrado de ellos, utilizan comúnmente la destilación al vacío. Esta difiere de la destilación primaria, en que mediante equipos especiales se baja la presión (aumenta el vacío) en la columna fraccionada, lográndose así que las fracciones pesadas aumenten su punto de ebullición a menor temperatura que aquella a la que ebulen a la presión atmosférica. El producto del fondo de la columna, un residuo asfáltico más o menos duro a temperatura ambiente, denominada residuo de vacío. De acuerdo a la cantidad de vacío en la columna de destilación, se obtendrán distintos cortes de asfaltos que pueden ser utilizados como cementos asfálticos (Batista y Maingón, 1993).

1.5.3 Desasfaltización con propano o butano: el residuo obtenido por la destilación al vacío, contiene los asfáltenos dispersos en un aceite muy pesado, que a baja presión (alto vacío) y alta temperatura de la columna de vacío, no ebulen (se destila). Una forma de separar el aceite de los asfáltenos es disolver (extraer) este aceite en gas



licuado de petróleo. El proceso se denomina “desasfaltización” y el aceite muy pesado obtenido, aceite desasfaltizado. Se utiliza como solvente propano o butano líquido, a presión alta y temperatura relativamente moderadas (70 a 120°C). El gas licuado extrae el aceite y queda un residuo semisólido llamado “bitumen” (Batista y Maingón, 1993).

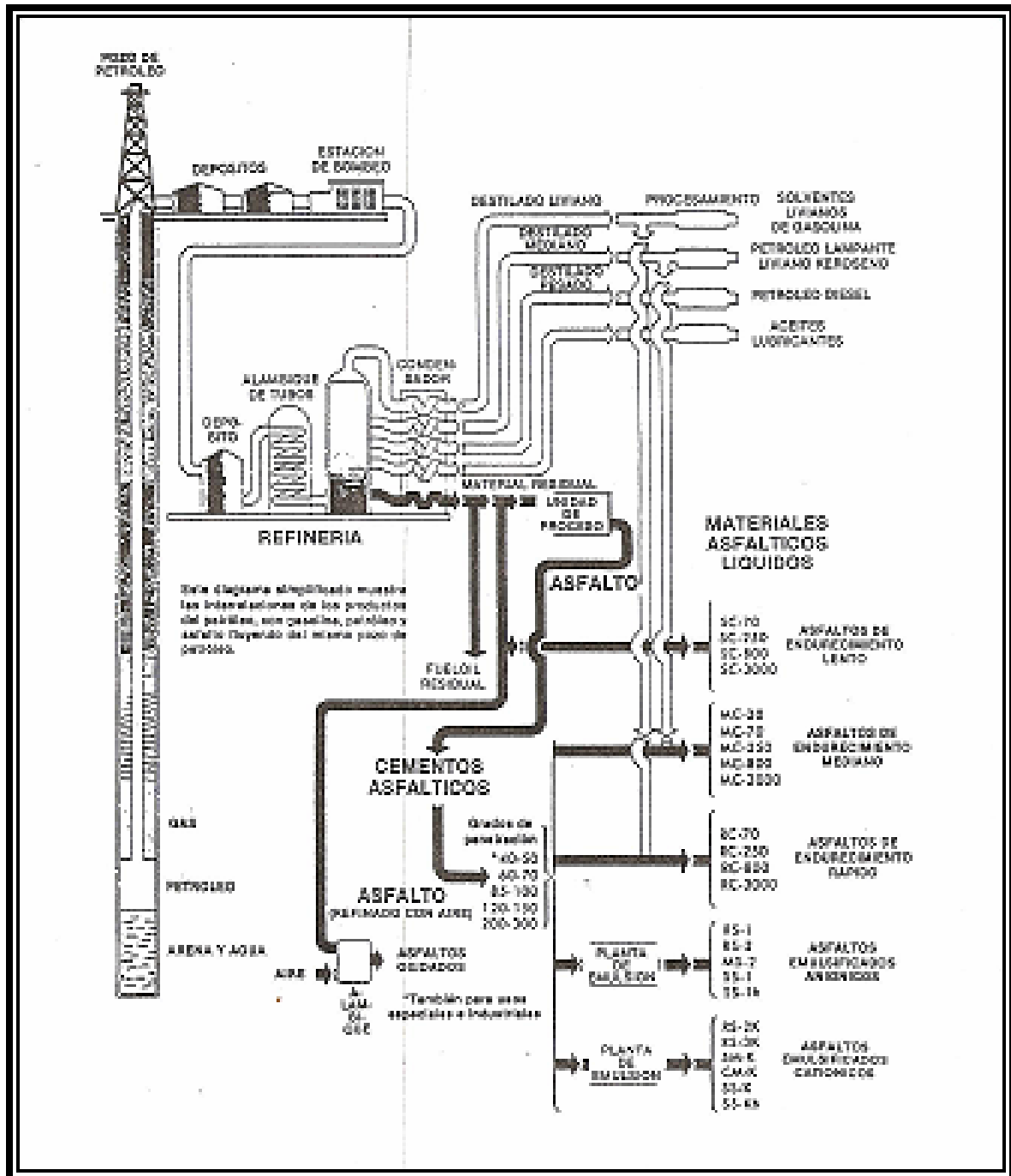


Figura 4. Diagrama de refinación del petróleo (Batista y Maingón, 1993)



1.6 Tipos de asfaltos

Los tipos de asfaltos son varios y se clasifican de acuerdo a su dureza en varias categorías. El termino dureza es obtenido a partir de la penetración de una aguja normalizada a una muestra de asfalto en condiciones especificas de temperatura, carga y tiempo (25 °C, 100 g y 5 seg.). Esto permite determinar la consistencia relativa, que también es llamada dureza o penetración, expresada en décimas de milímetros como es mostrado a continuación (Bastista y Maingón, 1993):

Según la dureza del asfalto se presenta la siguiente escala:

Duro.....	30 – 60
Semiduro.....	80 – 100
Semiblando.....	180 – 200
Blando.....	200 – 300
Muy blando.....	300 – 350

La penetración es ampliamente utilizada en las especificaciones de asfalto en Europa y Latinoamérica, existiendo una amplia información de datos históricos y correlaciones entre el ensayo y el comportamiento esperado de los asfaltos (Rodríguez, 2001-a). La Figura 5 muestra el esquema para determinar el ensayo de penetración a los cementos asfálticos.

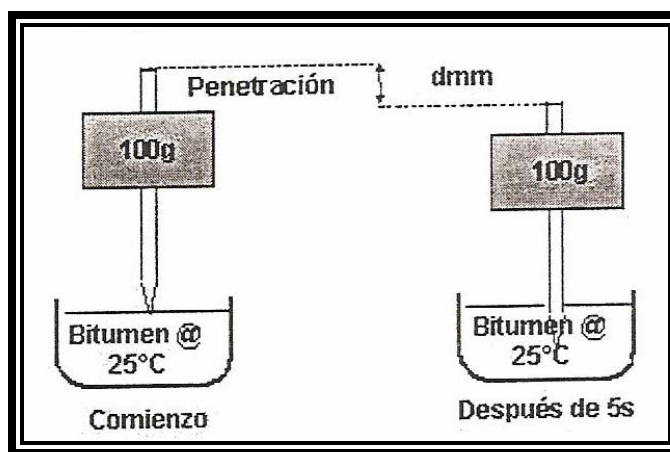


Figura 5. Ensayo de penetración realizado a los asfalto (Rodríguez, 2001-a)



Tomando en cuenta la dureza del asfalto en la pavimentación de carreteras se utiliza los tres primeros; es decir, los de tipo duro, semiduro y semiblando. Debido a que presentan una alta dureza es necesario la fluidificación y ablandamiento de estos asfaltos, con lo cual se debe disminuir su viscosidad para de esta forma poder ser aplicados y hacerlos manejables en dicho usos. En este sentido existen tres técnicas de fluidificación del asfalto; a saber:

A.- Por calentamiento: también llamados asfalto sólido, estos consisten en una combinación del residuo asfáltico duro del proceso de refinación y un aceite fluxante que lo ablanda hasta una consistencia adecuada incluyendo calentamiento. Los grados de penetración van desde 30 a 350, siendo las mas usadas en vialidad 50 – 60, 60 – 70, 70 – 85, 85 – 100 (Rodríguez, 2001-a). Es pertinente destacar que para poder manipularlo es necesario calentarlo a temperatura entre 138 °C y 180 °C.

B.- Por disolución del asfalto en un solvente volátil: llamado rebajado o cut-back. Es un cemento asfáltico puesto en estado liquido mediante la adición de un disolvente (fluxante) volátil, también producto de la destilación del petróleo (Rodríguez, 2001-a). La mayor parte de estos asfaltos son fabricados por el método intermitente, que consiste en bombear el solvente a un recipiente, agregar el cemento asfáltico caliente y posteriormente mezclar mediante agitación mecánica. Los solventes deben evaporarse progresivamente, una vez extendidos en los firmes quedando solamente la película de asfalto que sirve como aglutinante e impermeabilizante de los agregados. El tipo de solvente, concentración y clase de cemento asfáltico empleados en la elaboración de los asfaltos líquidos determinan su curado.

C.- Emulsionando el asfalto en una solución acuosa o dispersión: es la que se va a desarrollar en este proyecto, por lo tanto se explicará con mayor detalle más adelante.

2 SURFACTANTE O EMULSIFICANTE

2.1 Definición

Las sustancias con actividad superficial o surfactantes, son moléculas anfifílicas, razón por la cual tienden a ubicarse, de manera preferencial, en la interfase entre fluidos que presentan diferentes grados de polaridad (Salager y Fernández, 2004-a).



La palabra **anfífilo** hace su aparición en el título del texto de P. Winsor hace más de 30 años. Esta palabra se deriva de dos raíces griegas. De una parte el prefijo "**amphi**", que significa de ambos lados, doblemente o alrededor, como por ejemplo el anfiteatro o anfibio. Por otra parte la raíz "**philos**" que significa amigo de, como en filántropo (amigo del hombre), filósofo (amigo de la ciencia), o hidrófilo (amigo del agua).

Típicamente un anfífilo es una molécula que puede dividirse en dos partes; de un lado la parte **polar** que contiene heteroátomos tales como O, S, N, P, los cuales aparecen en grupos funcionales como alcohol, tiol, éter, éster, ácido, sulfato, sulfonato, fosfato, amina, amida, entre otros; la otra parte es un grupo **apolar** compuesto en general por un hidrocarburo parafínico, cicloparafínico o aromático, el cual puede eventualmente contener halógenos. En ciertos casos particulares la parte apolar puede ser una cadena de silicona o de polióxido de propileno.

La parte polar tiene afinidad con los solventes polares, particularmente el agua, mientras que la parte apolar tiene afinidad con los solventes orgánicos, en particular los hidrocarburos, aceites o grasas, o simplemente está es repelida por el agua (Salager y Fernández, 2004-a).

Por esta razón la parte polar se denomina también **hidrofilica**, mientras que la parte apolar le corresponde el calificativo de **lipofílico** o **hidrófobo** (Salager y Fernández, 2004-a). La Figura 6 muestra una molécula típica de un surfactante, en la cual puede observarse su carácter anfífilo.

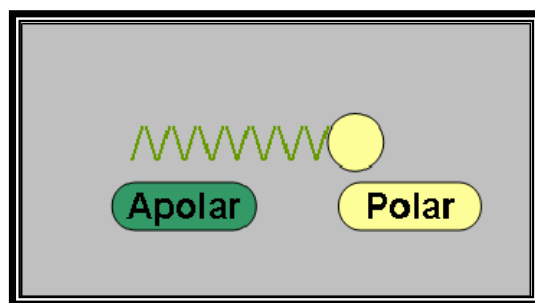


Figura 6. Molécula típica de un surfactante



Los surfactantes presentan dos funciones:

1. Facilitar la emulsificación, reduciendo al mínimo la diferencia existente entre las tensiones superficiales e interfaciales de los dos compuestos mezclados (asfalto y agua)
2. Formar en torno a los glóbulos de la fase oleica (asfalto) un revestimiento protector que actúa como un aislante que impide la unión de los mismos, dándole estabilidad a la emulsión.

Existe una gran variedad de emulsificantes o sustancias tensoactivas, donde la polaridad está determinada por su estructura polar-apolar. Una molécula es apolar cuando sus átomos están dispuestos de tal forma que los centros de gravedad de las cargas positivas y negativas coinciden, por el contrario, si ambos centros de gravedad no coinciden se dice que la molécula es entonces polar (Salager y Fernández, 2004-a).

Estas moléculas anfifílicas están en el seno de una sola fase acuosa, sus moléculas se agrupan en racimos formando una gran molécula de monómeros, donde sus cabezas polares están en contacto con la fase acuosa y sus cadenas hidrocarbonadas se dirigen hacia el centro para preservarse del contacto con el agua. A este conjunto de unión de moléculas o surfactantes se les denomina micelas. La Figura 7 ilustra la formación de las micelas y la Figura 8 los tipos de micelas que se pueden obtener en las emulsiones.

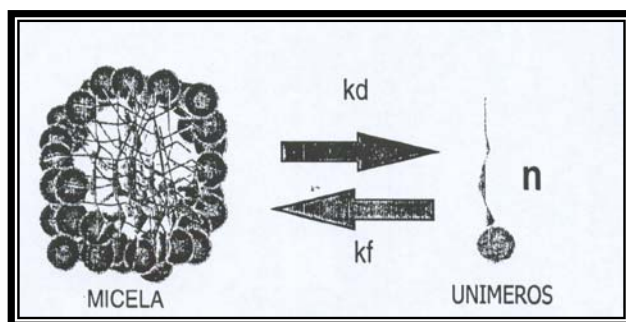


Figura 7. Formación de micelas

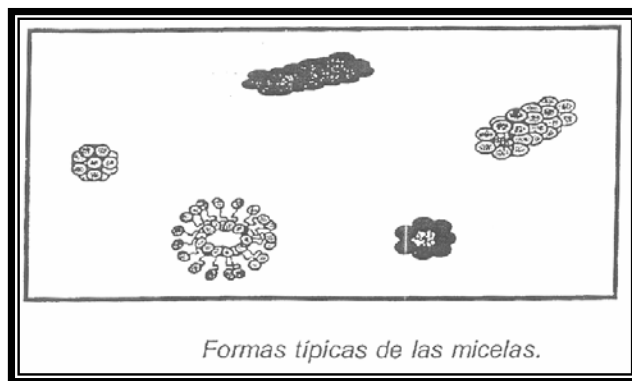


Figura 8. Formas típicas de micelas

La concentración del agente emulsionante es variable, pero en la práctica existen dos límites. Por debajo de una concentración mínima del orden de algunos miles de ppm (0,1% por ejemplo), no hay bastante emulsionante para estabilizar la emulsión. Más allá de algunos por cientos (5% por ejemplo), no se gana nada aumentando la concentración del surfactante.

En las aplicaciones prácticas la concentración del emulsionante está en el intervalo de 0,2 – 3,0%. Por razones de eficiencia y de costo se usa en general un emulsionante compuesto de una mezcla de varios surfactantes (Salager, 1999-b).

2.2 Tipos de surfactantes

Desde el punto de vista comercial los surfactantes son vendidos de acuerdo a su uso; es decir, a su propiedad de mayor interés práctico en cuanto a la aplicación: jabón, detergente, emulsionante, bactericida, inhibidor de corrosión, dispersante, tensoactivo, humectante, entre otros. Sin embargo, la mayoría de los surfactantes poseen varias de estas propiedades a la vez y por lo tanto una clasificación de este tipo sería muy confusa. Se prefiere clasificar los surfactantes de acuerdo a su tipo de molécula, particularmente en base al tipo de disociación de la molécula en solución (Salager y Fernández, 2004-b). De acuerdo a su disociación tenemos, los siguientes tipos de surfactantes: aniónicos, no iónicos y catiónicos.

2.2.1 Surfactantes aniónicos

Son aquellos que en solución acuosa se disocian en un anión anfífilo y un catión, el cual es generalmente un metal alcalino o un amonio cuaternario. A este tipo pertenecen los surfactantes de mayor producción: detergentes como alquilbenceno



sulfonatos, jabones o sales de ácidos carboxílicos grasos, espumantes como el lauril éster sulfato, entre otros. La producción de los surfactantes aniónicos representa alrededor del 55% de los surfactantes producidos anualmente en el mundo. La Figura 9 muestra como se polariza un surfactante de tipo aniónico.

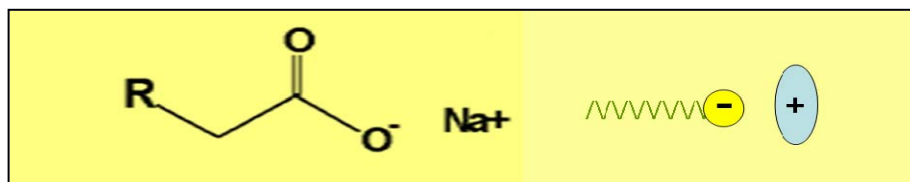


Figura 9. Representación esquemática de un surfactante aniónico

2.2.2 Surfactantes no iónicos

Por orden de importancia industrial vienen justo después de los aniónicos, están en el segundo rango con un poco menos del 40% del total. En solución acuosa no forman iones, ya que su parte hidrofílica está formado por grupos polares no ionizados como: alcohol, tiol, éter o éster. Una gran parte de estos surfactantes son alcoholes o fenoles etoxilados (lavaplatos, champúes). Ciertos derivados del sorbitol producen surfactantes no-tóxicos para uso farmacéutico o alimenticio. La Figura 10 visualiza a un surfactante de tipo no iónico, el cual no presenta densidad de carga en su extremo.

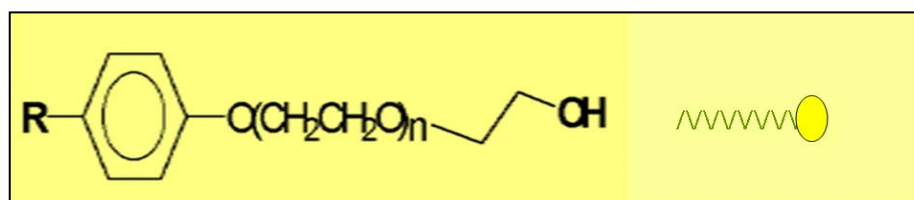


Figura 10. Representación esquemática de un surfactante no iónico.

2.2.3 Surfactantes catiónicos

Los surfactantes catiónicos representan en cuanto a su consumo, la tercera categoría con aproximadamente 5% del total. La disociación genera un catión anfífilo y un anión generalmente de tipo halogenado. En la mayoría de los casos corresponden a un grupo amonio cuaternario. En general no son buenos detergentes, y tampoco buenos espumantes con excepción de los óxidos de amina en su forma cuaternizada a pH ácido.

Estos surfactantes son utilizados solamente en aplicaciones especiales donde la carga positiva del anfífilo produce ventajas como en enjuagues o emulsiones asfálticas.



Sin embargo tienen dos propiedades importantes y casi únicas. Primero se absorben sobre sustratos cargados negativamente, por lo cual es de interés en nuestro estudio y segundo muchos de ellos tienen propiedades bactericidas. La Figura 11 visualiza un surfactante de tipo catiónico, el cual genera un extremo cargado positivamente.

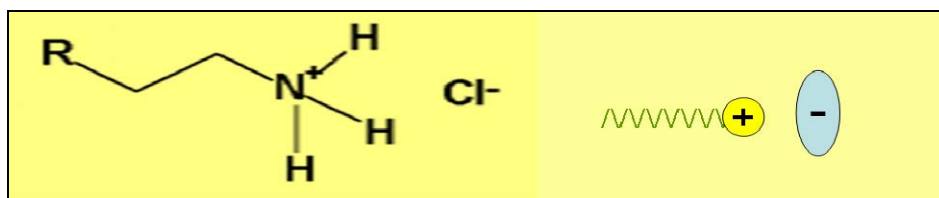


Figura 11. Representación esquemática de un surfactante catiónico.

2.2.3.1 Propiedades de los surfactantes catiónicos

Los surfactante catiónicos presentan una serie de propiedades, las cuales son mencionadas a continuación:

- Los surfactantes catiónicos no se utilizan como detergentes, sino por su capacidad de adsorberse sobre superficie cargadas negativamente (fibras textiles, minerales, metales entre otros).
- Son utilizados como suavizador de textiles y agentes antiestáticos. Durante el proceso de teñido de fibras, compiten con los colorantes por la adsorción y permiten obtener una coloración más uniforme.
- En flotación de minerales, se absorben sobre superficies cargadas negativamente y las tornan hidrófobas, lo que permite la adhesión de las burbujas sobre las partículas.
- Como agentes de tratamiento hidrófobo para carreteras no asfaltadas, o como pretratamiento de la capa de soporte del asfalto. Se utilizan extensivamente en emulsiones asfálticas, donde actúan como emulsionantes, agente hidrófobo y agente de enlace con el material rocoso.
- En aceites como inhibidores de corrosión y agentes emulsionantes de residuos acuosos ácidos.
- Mucho de estos compuestos presentan una excelente actividad bactericida, fungicida y algicida (Salager y Fernández, 2004-b).



2.3 Otros tipos de surfactantes (mezclas)

La combinación de moléculas de grupo con tendencia aniónica y de grupo con tendencia catiónica produce un surfactante anfotérico, como por ejemplo los aminoácidos, las betainas o los fosfolípidos. Según el pH del medio, una de las dos disociaciones prevalece. Este tipo de surfactante es usado sólo en casos particulares, debido a su alto costo.

Recientemente han producidos surfactantes poliméricos al injertar sobre una macromolécula un cierto número de grupos hidrofílicos, o al producir la policondensación de grupos con ciertas características polares y apolares (óxido de etileno, óxido de propileno) (Salager y Fernández, 2004-b).

3 EMULSIÓN

La teoría de las emulsiones es una consecuencia de la química coloidal clásica y un desarrollo de las artes antiguas, incluidas en la producción de emulsiones comerciales.

3.1 Definición

De acuerdo a diversos autores, las definiciones pueden ser expresadas como sigue:

Una emulsión es una dispersión muy fina de un líquido en otro con el que es inmiscible (Alexander, 1924). Por su parte, Clayton (1943) indica que una emulsión es un sistema que contiene dos fases líquidas, unas en las cuales se dispersa en forma de glóbulos en la otra. Mientras que la Enciclopedia Británica señala que las emulsiones son mezclas mecánicas de líquidos que son inmiscibles en condiciones ordinarias, las cuales pueden ser separadas en capas mediante reposo, calentamiento, enfriamiento, por agitación o por adición de otros productos químicos.

Una emulsión es un sistema heterogéneo, que está formado por lo menos de un líquido inmiscible íntimamente disperso en otro en forma de pequeñas gotas, cuyos diámetros, en general, exceden de $0,1 \mu$. Tal sistema posee una estabilidad mínima, que puede ser acentuada por aditivos tales como productos tensoactivos sólidos finamente divididos (Becher, 1972).

Una emulsión consiste en una mezcla de dos líquidos inmiscibles, en el cual uno de ellos está disperso en el otro en forma de pequeñas gotas microscópica, cuya



estructura está estabilizada por un surfactante. Al líquido disperso le denominan fase interna o dispersa, mientras que al otro le denominan fase continua o fase externa.

Se llama **dispersión** a un sistema polifásico en el cual una fase se encuentra en forma fragmentada (fase dispersada) dentro de otra (fase continua). Existen varios tipos de sistemas dispersados y cada uno tiene una denominación particular (Salager, 1999-b).

3.3 Clasificación de las emulsiones

La formación de un determinado tipo de emulsiones depende básicamente del método de preparación de la emulsión, de la naturaleza de las fases, del agente emulsionante y de la proporción relativa entre ellos (Salager, 2002). Por tal sentido, las emulsiones pueden clasificarse según su fase dispersa, contenido de fase interna y por el tamaño de las gotas.

3.3.1 Según su fase dispersa

Una emulsión es una mezcla de dos líquidos inmiscibles, en la cual están presentes dos fases. Una fase acuosa y otra fase oleica las cuales están diseminadas como pequeñas gotas microscópicas. Estas fases se abrevian con las letras W (water) y O (oil), ya que en castellano las palabras agua y aceite empiezan por la misma letra.

Según esta fase, existen dos tipos de sistemas dispersos que dependen de la naturaleza de cada una de las fases. Si la fase dispersa es polar y la externa es apolar la emulsión es denominada W/O (Water en Oil) y en caso contrario será una emulsión O/W (Oil en Water). La Figura 12 muestra las diferentes fases que pueden obtenerse en las emulsiones. Cabe destacar, que existen casos en los que hay más de una fase interna, conformando así las llamadas emulsiones múltiples que pueden ser W/O/W ó O/W/O (Salager, 1993-a).

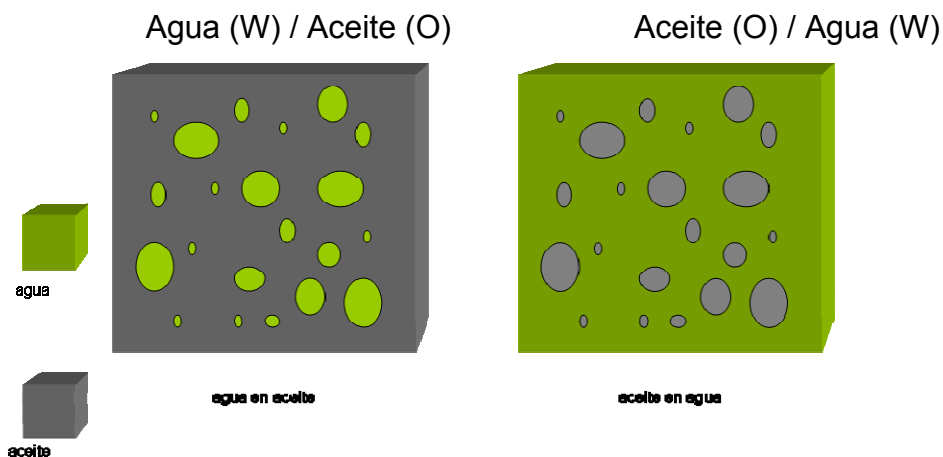


Figura 12. Representación de las emulsiones según su fase (W/O ó O/W)

3.3.2 Según su fase interna

Esta fase puede subdividirse dependiendo del contenido en porcentaje de dicha fase en:

- a) De muy bajo contenido, entre 0 y 50 % de fase dispersa. Las interacciones entre las gotas son débiles.
- b) De bajo contenido, entre 5 y 30 % de fase interna.
- c) De contenido medio, entre 30 a 70 % de fase interna. Son las más comunes en procesos industriales.
- d) De alto contenido, con porcentajes por encima del 70 %. Su comportamiento es altamente impredecible, no es muy común, aunque puede encontrarse en la industria de alimentos, productos farmacéuticos y emulsiones asfálticas.

3.3.3 Según el tamaño de las gotas

Determina la estabilidad de las emulsiones, son sistemas opacos con gotas mayores a los 400 nm; visibles fácilmente al microscopio. Estas pueden dividirse en:

- a) Microemulsiones, son dispersiones transparentes con gotas menores a los 0,1 μm , son monofásicas y muy estudiadas en los últimos años debido a su importancia en diversos procesos industriales.
- b) Miniemulsiones, es un tipo reciente de emulsión de aspecto azulado con tamaño de gota que oscila entre 0,1 μm y 0,4 μm .



3.4 Factores que afectan la estabilidad de la emulsión

3.4.1 Agente emulsionante: La naturaleza del surfactante determina que tipo de emulsión puede formarse y depende del balance hidrofílico-lipofílico (HLB)

- Si es bajo ($HLB < 9$, lipofílico) formará emulsiones agua en aceite (W/O)
- Si es alto ($HLB > 9$, hidrofílico) formará emulsiones aceite en agua (O/W)

3.4.2 Distribución y tamaño de gotas: Determina la estabilidad de la emulsión, cuanto mas estrecha es la distribución de tamaño gota y mas bajo sea el diámetro promedio de la gota, mas estable es la emulsión.

3.4.3 Porcentaje de agua: Las colisiones entre las gotas aumentan apreciablemente con el contenido de agua en una emulsión agua en aceite (W/O), lo cual puede producir una inversión de fase.

3.4.4 Temperatura: Puede alterar la tensión interfacial, naturaleza y viscosidad tanto de la película como de la fase continua, la presión pueden causar ruptura o inversión.

4 EMULSIONES ASFÁLTICAS

4.1 Definición

Una emulsión asfáltica no es otra cosa que la dispersión de finas gotas de asfalto estabilizadas en agua, a través de un agente emulsificante llamado surfactante (Rivera, 1977; Prato, 1999). La Figura 13 ilustra ambas fases de una emulsión asfáltica.

Las emulsiones asfálticas están constituidas por una gran cantidad de agua, la cual favorece propiedades como: mojabilidad, poder disolvente y moderador de reacciones químicas entre otras. A pesar de suministrar estas características, el agua posee ciertos elementos que perjudican la estabilidad del sistema emulsionado, tal es el caso de la presencia de sustancias como minerales e impurezas (hierro, iones de diversas naturalezas, entre otros.) (Rivera, 1977).

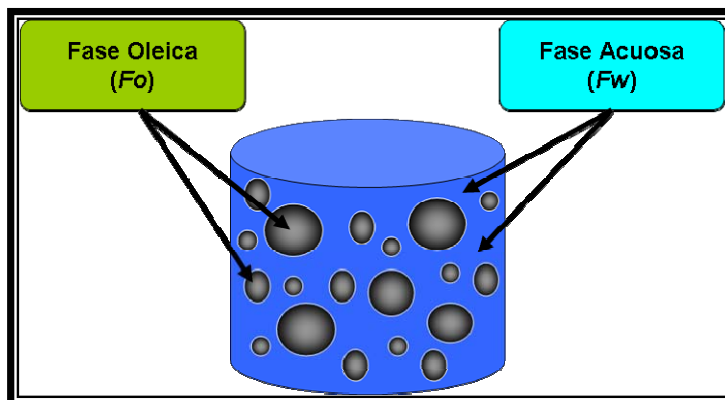


Figura 13. Diagrama esquemática de una emulsión asfáltica

Estas gotas dispersas bastante finas (de 1 a 5 micras) son proporcionadas por la agitación mecánica del sistema, a través de un molino coloidal. Dicho molino está formado por un estator y un rotor, a menudo cónico, que están separados entre un rango de 0,13 a 0,76mm. Este molino es capaz de dispersar el asfalto en la fase acuosa del surfactante, cuando ambos pasan de manera continua entre el espacio disponible del sistema estator-rotor. Los fluidos dentro del molino sufren dos tipos de cizallamiento: uno debido al estrangulamiento y otro de tipo Couette, producido por la rotación de uno de los conos como observamos en la figura 14 (Prato, 1999)

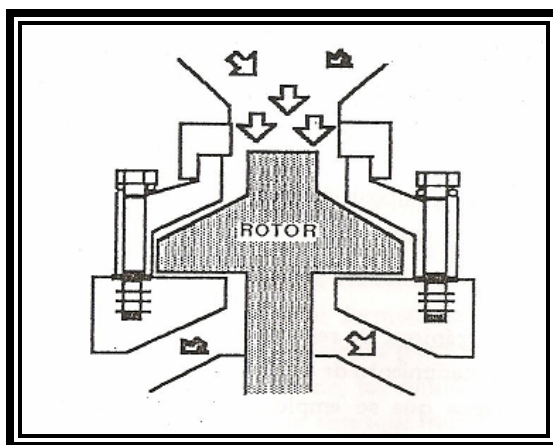


Figura 14. Esquema interno de un molino coloidal (Prato, 1999)

La molécula llamada surfactante descrita anteriormente, es uno de los componentes importante en la preparación de las emulsiones, ya que presenta dos funciones las cuales son: facilitar la extensión de la fase interna durante el proceso de



emulsificación, para disminuir la tensión superficial entre las gotas de asfalto y la fase acuosa; por ultimo estabilizar la emulsión retardando la coalescencia de las gotas dispersadas (Prato, 1999)

Por lo antes explicado, en las emulsiones asfálticas el asfalto es una sustancia que se comporta como un cuerpo apolar, mientras el agua sigue con su carácter polar; de esta forma las moléculas anfifílicas se reacomodan dirigiendo su cadena hidrocarbonada hacia el asfalto, mientras que su cabeza polar, es atraída por el agua. La Figura 15 representa la adsorción del surfactante en la interfase asfalto-agua.

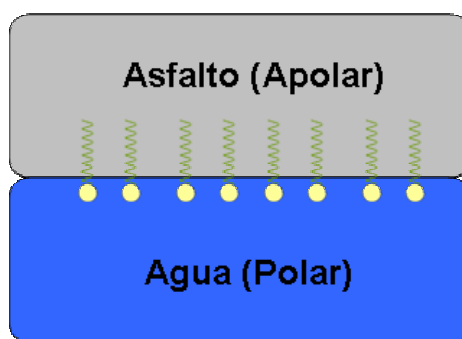


Figura 15. Adsorción de las moléculas de surfactantes en la interfase asfalto - agua

4.2 Clasificación de las emulsiones asfálticas

Las emulsiones asfálticas pueden ser clasificadas dependiendo a varios enfoques generales; a saber: según su carga, forma de dispersión y velocidad de rompimiento.

4.2.1 Según su carga eléctrica: depende del tipo de emulsificante usado y puede ser de tipo aniónica o catiónica. La Figura 16 permite representar ambos glóbulos de asfalto emulsionados según su carga.

- **Emulsiones aniónicas:** el agente emulsificante es de tipo aniónico, este le confiere una polaridad negativa a los glóbulos de asfalto, permitiendo que estos migren hacia el cátodo en la prueba de carga eléctrica.
- **Emulsiones catiónicas:** en este tipo de emulsiones, el agente emulsificante es de tipo catiónico, que le confiere una polaridad positiva a los glóbulos de asfalto



permitiendo que estos migren hacia el ánodo en la prueba de carga eléctrica. En el presente estudio la emulsión a obtener es de este tipo, ya que los glóbulos de asfalto presentarán estas características.

- Emulsiones no iónicas: el glóbulo de asfalto queda neutro, por lo que no presentan reacción en la prueba de carga eléctrica. Por lo tanto no son utilizados como tratamientos en la pavimentación de vías.

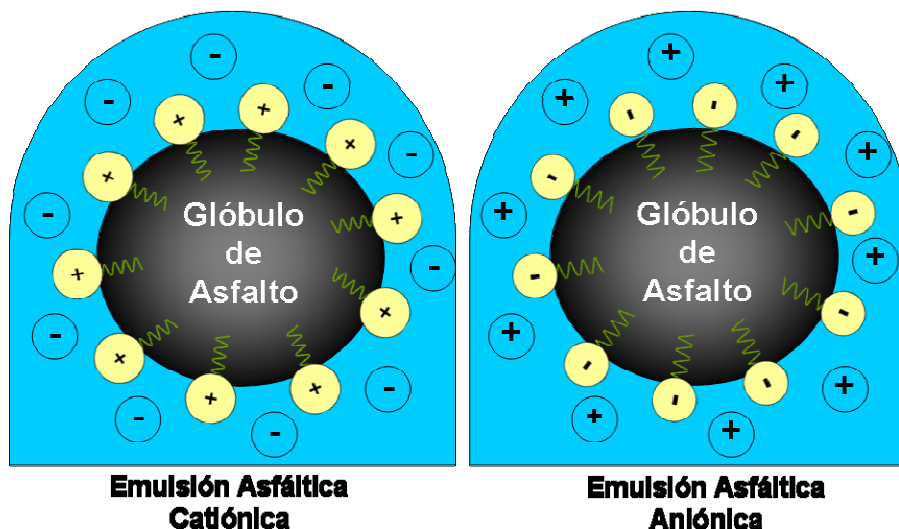


Figura 16. Representación esquemática de emulsiones asfálticas catiónica y aniónica

4.2.2 Según su forma de dispersión: en esta se destacan las de tipo directa e inversa.

- Emulsión directa: es cuando la fase continua es de tipo acuosa, es decir, aceite disperso en agua (O/W).
- Emulsiones inversa: es cuando la fase continua es de tipo aceitoso, es decir, agua disperso en aceite (W/O).

4.2.3 Según su velocidad de rompimiento: esta clasificación depende de la rapidez de coalescencia de las gotas de asfalto en el proceso de rompimiento de la emulsión (TAI, 1979).

El rompimiento de la emulsión es la rotura de la película protectora, que recubre a los glóbulos de asfalto, con la consecuente unión de los mismos, ocurriendo la



separación del asfalto y el agua de la emulsión (Batista y Maingón, 1993). Este rompimiento de la emulsión puede ser clasificado como:

- Emulsiones de rompimiento rápida, RS (Rapid Setting): son aquellas emulsiones que interactúan de forma acelerada con los agregados, rompiendo de ésta forma la emulsión. En algunos casos se mejoran sus propiedades agregando algún polímero, lo cual lo hace más adhesivo y elásticos que los de tipo común; por otro lado, intensifica la resistencia al corrimiento y al agrietamiento por efectos de temperatura. Este tipo de emulsión es utilizado especialmente en tratamiento superficial, ya que crean películas resistentes de alta viscosidad las cuales previenen el escurrimiento; así mismo, son usadas como sellos arenosos, bacheos, entre otros.
- Emulsiones de rompimiento media, MS (Medium Setting): tienen la peculiaridad de no romper la emulsión inmediatamente al ponerse en contacto con el agregado. Esto favorece que en ciertos casos sean elaborada la emulsión en planta, para luego trasladarla al sitio de la aplicación. Puede usarse en frío o en caliente y son empleadas en tratamiento superficial, mezclas de emulsiones, reciclado de pavimento, entre otros.
- Emulsiones de rompimiento lenta, LS (Low Setting): por su lenta interacción con los agregados, aseguran un buen cubrimiento con alto contenido de finos. Estas son utilizadas en la pavimentación y en tratamiento de suelos que han sido sembrados y fertilizados, de manera que pueden formar una película delgada para retener las semillas en su lugar, conservando así el calor para su germinación.

4.3 Mecanismos y procesos en la interfase sólido – líquido

Durante la interfase sólido – líquido ocurren distintos mecanismos y procesos que permiten entender un poco sobre las interacciones que ocurren entre ambas interfase. Esta interfase puede ser explicada a través del mecanismo de coalescencia y de los procesos que se generan como son: la adsorción sobre el sustrato sólido y la heterofloculación, los cuales serán explicados a continuación:



4.3.1 Mecanismo de coalescencia de las emulsiones asfálticas

Las emulsiones asfálticas se rompen al entrar en contacto con las rocas. Actualmente se piensa que existen dos mecanismos principales de ruptura. Uno de estos mecanismos es producido cuando el surfactante migra desde la interfase agua-asfalto hacia la interfase asfalto-sólido, disminuyendo de esta forma la repulsión electrostática existente entre las gotas dispersas de asfalto y fomentando la coalescencia de la misma. El surfactante se adhiere a la roca por su parte polar, generando una superficie hidrófoba, la cual favorece la adhesión del asfalto con la roca a través de los sitios activos presentes. La Figura 17a muestra este primer mecanismo de coalescencia en la emulsión asfáltica.

El otro mecanismo supuesto deriva de la atracción electrostática entre el surfactante presente en la interfase asfalto-agua y la superficie sólida de carga opuesta, que provoca el acercamiento de las gotas de asfalto rodeadas de surfactante a la superficie del sólido sin que el surfactante se desborde de las gotas de asfalto (Salager, 1991). La Figura 17b muestra el segundo mecanismo de coalescencia en la emulsión asfáltica.

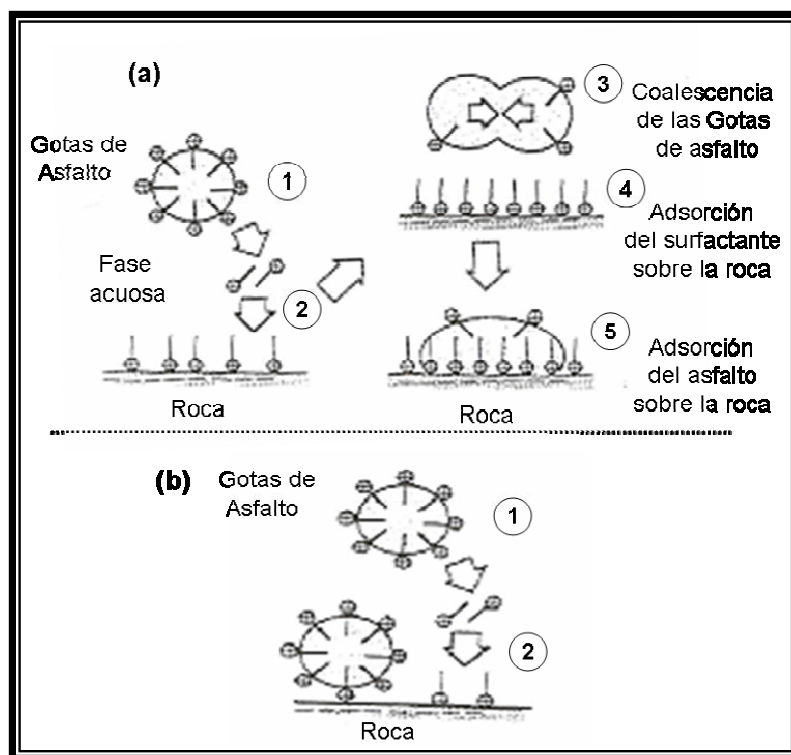


Figura 17 a y b. Mecanismo de coalescencia de las emulsiones asfálticas (Salager, 1991)



4.3.2 Procesos de adsorción sobre sólidos

La adsorción es un fenómeno espontáneo impulsado por la disminución de la energía libre del surfactante al ubicarse en la interfase y satisfacer parcial o totalmente su doble afinidad (Salager, 2002). También puede definirse como un fenómeno de adherencia superficial entre dos sustancias que se concentran en la interfases ya sea líquido/líquido, sólido/gas o sólido/líquido. La Figura 18 visualiza la adsorción del surfactante en la interfase sólido – líquido.

Los surfactantes catiónicos presentes en las emulsiones asfálticas se adsorben sobre las superficies cargadas negativamente a concentración muy por debajo de su concentración micelar crítica.

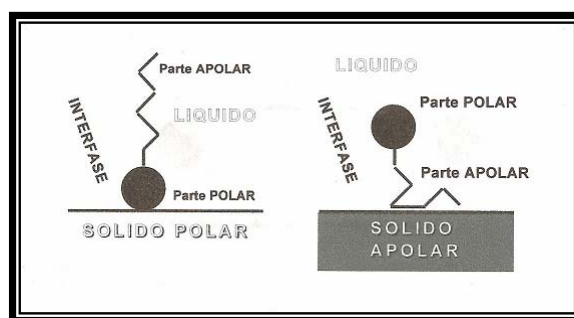
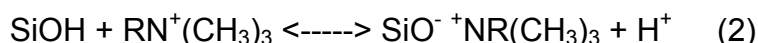


Figura 18. Adsorción del surfactante en una interfase sólido – líquido (Salager, 2002)

En proceso de adsorción sobre las superficies minerales de tipo óxido (sílice, alúmina, entre otros.), los surfactantes catiónicos se adsorben sobre los sitios negativos, por un proceso de intercambio iónico del pH respecto al punto isoelectrico del mineral. El siguiente equilibrio, muestra la importancia de los iones H^+ y OH^- de la siguiente forma:



El mismo tipo de equilibrio puede escribirse reemplazando el protón por un catión alcalino.

Al adsorberse en la superficie, producen una monocapa que difiere considerablemente de las propiedades de la superficie. La exposición del grupo alquilo R y demás sustituyentes (metil, otros), produce una capa hidrófoba con un ángulo de contacto mayor de 90° . Este cambio es utilizado en aplicaciones como: hidrofobación



de suelos, flotación de minerales, inhibición de la corrosión entre otros. Así mismo al adsorberse el surfactante catiónico sobre una superficie, reduce el potencial zeta de la doble capa.

Por otro lado en concentración alta puede adsorberse una segunda capa por atracción de Van der Waals con las “colas lipofílicas” de la primera, esto conlleva a un nuevo aumento en la mojabilidad. Existe por lo tanto una concentración óptima en muchas aplicaciones.

Los surfactantes catiónicos son usados como emulsionantes en las emulsiones asfálticas, por lo tanto no sólo estabiliza la emulsión almacenada, si no que también permiten que se rompa fácilmente tan pronto como exista un contacto con el agregado rocoso (Salager y Fernández, 2004-b)

4.3.3 Procesos de heterofloculación

Este proceso ocurre cuando la emulsión asfáltica entra en contacto con el sólido y ocurre el rompimiento de la emulsión o proceso de heterofloculación. La adsorción del surfactante catiónico a partir de la fase acuosa sobre la superficie del sólido, hace que ésta se torne hidrófoba cuando alcanzan la monocapa (Prato, 1999).

Las fuerzas relativas que afectan las gotas de asfalto cerca de la superficie del sólido, determinan las condiciones en la cual se lleva el proceso. Esto puede ser estipulado por la teoría DLVO, en donde la adhesividad de una gota de asfalto sobre la superficie del sólido depende de la competencia entre dos fenómenos opuestos como son la mojabilidad y las repulsiones electrostáticas. La Figura 19 ilustra la isoterma de adsorción sobre un sólido.

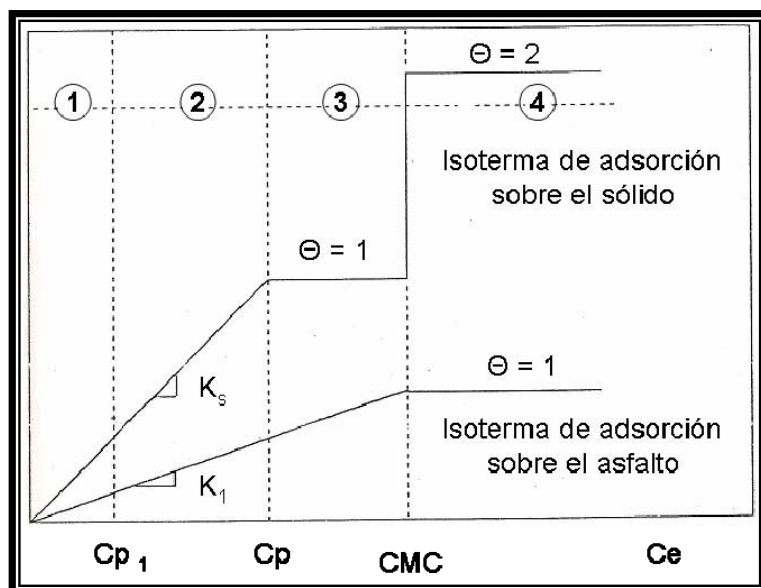


Figura 19. Esquematzación de las isothermas de adsorción del proceso de heterofloculación (Prato, 1999)

Donde: Cp_1 es la concentración de equilibrio Ce del tensoactivo correspondiente al punto isoeléctrico, Cp la concentración de equilibrio correspondiente al inicio de la meseta de la isoterma de adsorción para la monocapa 1 ($\theta = 1$) y la CMC la concentración micelar crítica.

Zona 1: en esta etapa el surfactante comienza a migrar desde la emulsión hacia el sólido por efectos de atracción electrostática. La superficie del sólido permanece cargada negativamente, pues solo se ha adsorbido una escasa cantidad de surfactante. Las fuerzas de atracción entre la fase acuosa y el sólido son débiles de tipo London. Por tal razón, las gotas de asfalto no pueden adherirse sobre la superficie ya que ha ocurrido una mínima disminución de la energía libre interfacial, lo cual desfavorece un cambio de la mojabilidad del sólido permaneciendo un ángulo de contacto superior a los 90° , que evita la adhesión del asfalto sobre el sólido (Figura 20).

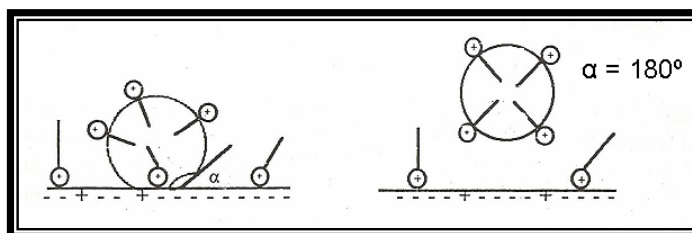


Figura 20. Interacción superficie del sólido-gota de asfalto zona 1



La concentración de equilibrio permanece por debajo de la concentración de surfactante correspondiente al punto isoelectrico C_{p1} del sólido (inferior a la CMC).

Zona 2: se ubica entre la concentración del punto isoelectrico (C_{p1}) y la concentración de equilibrio, donde se forma la monocapa en la isoterma de adsorción (C_p). Esta parte es el punto en donde se neutralizan las cargas o fuerzas de atracción existentes entre el surfactante y el sólido. Al sobrepasar este punto (C_{p1}) y alcanzar la concentración C_p , se invierte el valor de la carga superficial del sólido, la superficie se torna hidrófoba cubriéndose completamente por una monocapa. La concentración en éste punto es la favorable para que ocurra el proceso de heterofloculación (Figura 21).

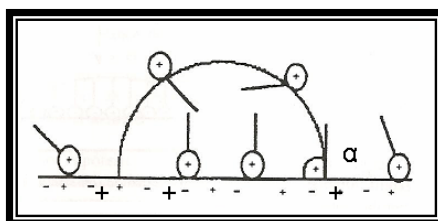


Figura 21. Interacción superficie del sólido-gota de asfalto zona 2

Zona 3: el rango de concentración del surfactante esta comprendido entre C_p y CMC, la superficie del sólido permanece hidrofobado y cubierto por la monocapa ($\theta = 1$) de surfactante (Figura 22).

En esta zona se favorece la adhesividad sólido-gota de asfalto, por la hidrofobación. Desde el punto de vista electrostático, ocurre un fenómeno desfavorable, ya que la carga de la monocapa es la misma para ambas interfases, produciéndose fuerzas repulsivas que afectan el proceso de heterofloculación.

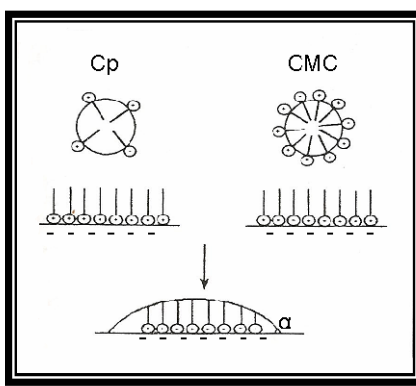


Figura 22. Interacción superficie del sólido-gota de asfalto zona 3



Zona 4: en esta zona las concentraciones C_e están por encima de la CMC, en esta etapa se absorbe mayor cantidad de surfactante que el requerido. La superficie del sólido está recubierta por una bicapa de surfactante ($\theta = 2$), haciendo que la superficie pierda su propiedad de ser hidrófoba y por lo tanto, su superficie es hidrofílica donde su carga global es positiva (Figura 23).

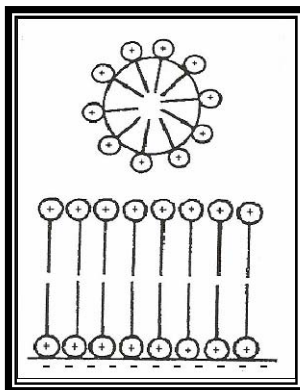


Figura 23. Interacción superficie del sólido-gota de asfalto zona 4.

5 MEZCLAS ASFÁLTICAS

5.1 Definición

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de rocas y un ligante hidrocarbonado, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, las cuales son transportadas después a la obra, se extienden y se compactan. (Kraemer *et al.*, 2004).

FUNDALANAVIAL (2007), define mezclas asfálticas a la combinación de las rocas con un ligante asfáltico, que en película continua, envuelve todas y cada unas de las partículas minerales de las rocas, siendo utilizadas en la construcción de pavimentos flexibles de alta calidad, tales como bases asfálticas y carpetas de rodamientos, de gran regularidad geométrica y cómodas para el tránsito de vehículos.

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que son usadas en las capas inferiores de los firmes para tráficos pesados intensos.



Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de fragmentos de rocas gruesa y de material fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente, son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento, por lo que la falta de calidad en alguno de ellos afecta al conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica, como en su costo total.

5.2 Clasificación de las mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas pueden ser clasificadas dependiendo de varios parámetros, entre las que destacan:

5.2.1 Por fracciones de rocas empleado

- Masilla asfáltica: polvo mineral más ligante.
- Mortero asfáltico: agregado fino más masilla.
- Concreto asfáltico: agregado grueso más mortero.
- Macadam asfáltico: agregado grueso más ligante asfáltico.

5.2.2 Por la temperatura de puesta en obra

- Mezclas asfálticas en caliente: son fabricadas con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el intervalo de los 150 °C, según la viscosidad del ligante; a demás, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.
- Mezclas asfálticas en frío: el ligante suele ser una emulsión asfáltica aunque en algunos países como Venezuela, se sigue utilizando los asfaltos rebajados (con solventes aromáticos). La puesta en obra se realiza a temperatura ambiente y se compacta al evaporarse el solvente.



5.2.3 Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica

Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.

- Mezclas cerradas o densas: la proporción de vacíos no supera el 6 %.
- Mezclas semi-cerradas o semi-densas: la proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.
- Mezclas abiertas: la proporción de vacíos supera el 12 %.
- Mezclas porosas o drenantes: la proporción de vacíos es superior al 20 %.

5.2.4 Por el tamaño máximo de los fragmentos de rocas

- Mezclas gruesas: donde el tamaño máximo de los fragmentos excede los 10 mm.
- Mezclas finas: también llamadas microaglomerados, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por rocas, polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo de los fragmentos determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

5.2.5 Por la estructura del mineral

- Mezclas con esqueleto mineral: poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los minerales es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente son denominados concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.
- Mezclas sin esqueleto mineral: no poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.



5.2.6 Por la granulometría

- Mezclas continuas: una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de fragmentos de rocas en el uso granulométrico.
- Mezclas discontinuas: una cantidad muy limitada de los tamaños de los fragmentos de rocas en el uso granulométrico.

5.3 Tipos de mezclas asfálticas

5.3.1 Mezcla asfáltica en caliente

Constituye el tipo más generalizado y esta definida como mezcla asfáltica en caliente, a la combinación de un ligante carbonado, fragmentos de rocas, polvo mineral y eventualmente aditivos; de manera que todas las partículas de las rocas queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los fragmentos de rocas (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación). Su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la temperatura ambiente.

Son empleadas tanto en la construcción de carreteras, como en vías urbanas y aeropuertos, a demás son utilizadas tanto para capas de rodadura como para capas inferiores de los firmes. Son fabricadas con asfaltos, aunque en ocasiones recurren al empleo de asfaltos modificados, las proporciones pueden variar desde 3% al 6% de asfalto en volumen de fragmentos de rocas.

5.3.2 Mezcla asfáltica en frío

Son mezclas fabricadas con emulsiones asfálticas, cuyo principal campo de aplicación es para la construcción y conservación de carreteras secundarias. Para retrasar el envejecimiento de las mezclas abiertas en frío, frecuentemente se recomienda el sellado por medio de lechadas asfálticas.

5.4 Granulometría de las mezclas asfálticas en frío

El principio básico del análisis granulométrico es por el método del tamizado, el cual es un proceso mecánico mediante el cual permite separar las partículas de un



suelo, rocas o agregados en sus diferentes tamaños. Este procedimiento, determina el tamaño de las partículas utilizando tamices de aberturas específicas.

En el análisis granulométrico de los suelos, rocas o agregados minerales se clasifican según el tamaño de las partículas en:

- Rocas: partículas mayores a 3 pulgadas.
- Gravas: partículas menores de 3 pulgadas y mayores de 4,75mm (retenido tamiz #4)
- Arenas: partículas menores de 4,75mm (pasa tamiz #4) y mayores de 0,074mm (retenido tamiz #200). Esta a su vez está clasificada en arenas gruesas (pasa tamiz #4 y retenido #10), arena media (pasa tamiz #10 y retenido #40) y arena fina (pasa tamiz #40 y retenido #200).
- Limos: partículas menores de 0,074mm (pasa tamiz #200) y mayores de 0,005mm.
- Arcillas: partículas menores de 0,005mm y mayores de 0,002mm.
- Coloide: partículas menores de 0,002mm.

Cualquier material sea suelo, roca o agregado mineral debe cumplir una especificación de granulometría emitida según la norma ASTM E11, para ser utilizadas en mezclas asfálticas. La Tabla 1 presenta algunas características que deben obtener los fragmentos de rocas para ser utilizados en carpetas asfálticas de granulometría abierta.

Tabla 1. Requisitos de calidad para carpetas asfálticas de granulometría abierta (Norma N-CMT-4-04-02)

Característica ^[1]	Valor
Densidad relativa, mínimo	2,4
Desgaste Los Ángeles; %, máximo	30
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	25
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

[1] El material debe ser 100% producto de trituración de roca sana



Desde el punto de vista de la construcción, debe realizarse una curva de trabajo como la que se presenta en la Figura 24. Esta curva su margen de error esta aceptado en tres puntos porcentuales por debajo y por encima de dicha curva, obteniéndose una banda de trabajo, con el fin de garantizar una buena base para el pavimento en mezclas asfálticas. Este rango garantiza una granulometría relativamente uniforme en el material (Fernandez, *et al.* 1977).

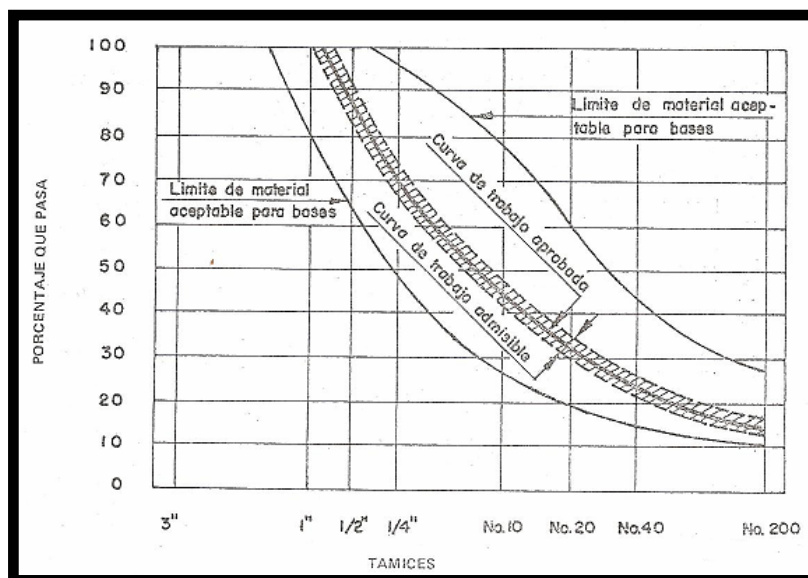


Figura 24.- Curva granulométrica para mezclas asfálticas (Fernandez, *et al.* 1977)

5.5 Aplicación de las mezclas asfálticas

Estas mezclas se esparcen y compactan a temperatura ambiente, son utilizadas como capas nivelantes, de base y de rodado. Las capas pueden tener espesores compactados, que varían de 3 a 20 cm. dependiendo del tipo de servicio y granulometría de la mezcla pueden ser aplicadas en:

5.5.1 Tratamientos superficiales

5.5.1.1 Tratamiento superficial simple

Es una aplicación de asfaltos recubierta con rocas - agregado generalmente de tamaño nominal de 10 a 25 mm. También puede ser arena de grano uniforme. Este tipo de tratamiento no aporta estructura al pavimento y sólo lo protege, otorgándole gran



resistencia a la acción abrasiva del tránsito, a la vez que lo impermeabiliza (ASFALCHILE, 2008).

5.5.1.2 Tratamiento superficial doble o múltiple

Consiste en dos o más aplicaciones de emulsión asfáltica alternadas con aplicaciones de agregados pétreos de diferentes tamaños, alcanzando hasta 25 mm de espesor total. Son económicos, fáciles de construir y de larga duración. Pueden efectuarse sobre pavimentos asfálticos existentes o sobre una base granular estabilizada en caso de pavimentos nuevos. Las rocas o agregados para cada aplicación deben tener una granulometría lo más uniforme posible y el tamaño máximo de cada aplicación sucesiva debe estar en proporción 2:1 respectivamente (ASFALCHILE, 2008).

5.5.1.3 Lechadas asfálticas ó “Slurry Seal”

Las lechadas asfálticas (slurry seals) son un sistema de revestimiento de pavimentos de aplicación en frío compuesto por una mezcla de emulsión (normalmente de rompimiento lento), rocas o agregados seleccionados, agua y rellenos minerales fillers tipo cemento o cal, distribuidas uniformemente sobre la superficie de un pavimento existente en espesores de 3 a 10 mm. Se utilizan principalmente en la conservación de pavimentos desgastados o levemente agrietados, que no presenten daños estructurales, y en la corrección de pequeñas imperfecciones en la superficie, sirviendo además como capa de protección e impermeabilizadora. Presenta buenas condiciones antideslizantes, por lo que se emplea también en la corrección de tramos lisos y resbaladizos (ASFALCHILE, 2008).

5.5.1.4 Tipos de lechadas asfálticas

Las lechadas asfálticas necesitan de una cuidadosa dosificación en laboratorio, bajo estrictos parámetros de diseño, establecidos por normas internacionales de la ISSA (International Slurry Surfacing Association) y adoptadas por el LNV. De acuerdo a estas especificaciones, las lechadas se clasifican dependiendo del uso final y de los requisitos y condiciones del camino existente, con diferentes granulometrías de los



agregados en tipos I, II y III, siendo aplicable para los micropavimentos solamente los tipos II y III. La Tabla 2 muestra la granulometría para lechadas asfálticas ó Slurry Seal.

Tabla 2. Granulometría para lechadas asfálticas o Slurry Seal.

		Tipos de lechadas		
		I	II	III
Tamiz	Abertura	% Que pasa		
½"	12,50 mm			
¾"	9,50 mm		100	100
4	4,75 mm	100	90 - 100	70 - 90
8	2,36 mm	90 - 100	85 - 90	45 - 70
16	1,18 mm	85 - 90	45 - 70	28 - 50
30	600 µm	40 - 60	30 - 50	19 - 34
60	300 µm	12 - 25	18 - 30	12 - 25
100	150 µm	15 - 30	10 - 21	7 - 18
200	75 µm	10 - 20	5 - 15	5 - 15
Contenido de asfalto residual, % en peso del agregado seco		10 - 18	7,5 - 13,5	8,5 - 12
Distribución unitaria Kg/m ² basado en peso de agregado seco		6 - 10	10 - 15	15 ó más

Tipo I: Relleno de grietas y sellado fino. Se aplica en áreas de bajo tráfico.

Tipo II: Sellado general superficial de textura mediana. Es el tipo más usado para pavimentos con tráfico moderado a pesado. Se utiliza para sellar, proteger la superficie subyacente del envejecimiento, corregir desintegración moderada de la superficie y mejorar la resistencia al deslizamiento.

Tipo III: primera o segunda aplicación. Lechada de dos capas superficiales de textura gruesa. Se aplica en vías sujetas a alto tráfico. Se usa para corregir imperfecciones severas del pavimento, con altas tasas de aplicación, consiguiendo elevados valores de fricción superficial, previniendo el efecto de hidropelanteo y mejorando notablemente la resistencia al deslizamiento.

5.5.1.5 Aplicación de lechadas asfálticas

La mayoría de las lechadas asfálticas se coloca con maquinaria de alta tecnología. Estas máquinas son verdaderas plantas portátiles, calibradas para recibir la



cantidad precisa de componentes, en las que se realiza la mezcla en unos pocos minutos y se aplica inmediatamente, haciendo de este un tratamiento de rápida ejecución. La máquina, instalada sobre el chasis de un camión, consiste en un depósito para los agregados, otro para el filler, depósitos de agua, emulsión y mezclador apropiado. La Figura 25 se presenta la ubicación de los distintos componentes y maquinaria utilizada para realizar una lechada asfáltica.

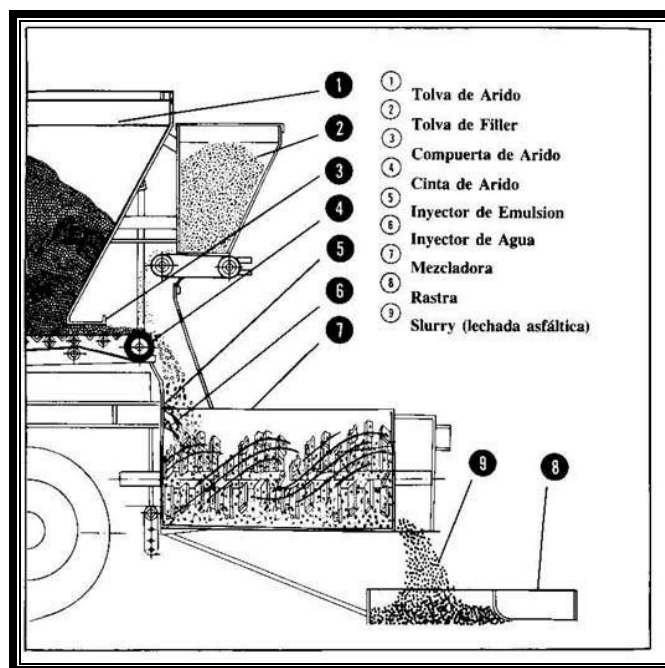


Figura 25. Esquema de un camión espaciador de lechada asfáltica (BITUMIX CVV, 2005)

5.5.1.6 Ventajas de las lechadas asfálticas

- **Bajo costo.** Colocación económica y de alto rendimiento.
- **Utilización rápida.** Fácil y rápida aplicación, lo que la hace muy atractiva especialmente en la rehabilitación de vías públicas con mucho tráfico, estacionamientos y pistas de aeropuertos. La nueva superficie puede ser utilizada poco después de ser aplicada la lechada.
- **Prevención de problemas.** Utilizada sobre pavimentos nuevos, la lechada asfáltica evitará el deterioro del firme y los efectos de los agentes climatológicos. La oxidación, pérdida de aceites, pérdida de árido y la fragilidad de la mezcla se ven reducidos al mínimo. También proporciona una duración especial y una excelente superficie de rodadura, la cual no tiene la mezcla subyacente.



- **Corrección de problemas.** El deterioro existente en los pavimentos antiguos (agrietamiento de la superficie, pérdida de áridos, mayor permeabilidad al agua y al aire, firme resbaladizo debido al depósito de agua o pulido de los áridos, entre otros) puede corregirse mediante la aplicación de la lechada asfáltica (impermeabilizando), evitando así un mayor deterioro. Se consigue así una superficie de larga duración, a prueba de todos los climas, que ofrece propiedades anti-deslizantes y mejores condiciones para la conducción.
- **Valor estético.** Con una sola aplicación el pavimento existente recibe una nueva capa de rodadura de color y textura uniforme. Una mejor apariencia significa un mayor valor de la propiedad, del potencial comercial y una mayor aceptación por parte de los compradores. Las vías públicas, los estacionamientos de los centros comerciales y otros pavimentos públicos o comerciales tratados con lechada asfáltica se hacen más atractivos y agradables a la vista.

6 ROCAS

6.1 Definición

Las rocas pueden ser definidas como sustancias naturales sólidas y duras que ocurren en la corteza o el manto de la tierra. Las rocas están compuestas por dos o más minerales, aun cuando algunas pueden estar formadas por un solo mineral (Méndez, 2004)

Las rocas están formadas por una variedad de minerales, su estudio, conocido con el nombre de petrología, se refiere en gran parte a la identificación de los minerales individuales que existen en la roca, texturas, abundancia y tamaño de granos; este tipo de información es fundamental para comprender el origen de una roca y proceder a su clasificación (Dana, 1998)

6.2 Clasificación de las rocas

Todas las rocas pueden clasificarse en función de tres grupos principales: *ígneas, sedimentarias y metamórficas.*



6.2.1 Rocas ígneas

Las rocas ígneas comprenden aproximadamente el 95 por ciento de los 16 Km superiores de la corteza terrestre, pero su gran abundancia queda oculta a la superficie terrestre por una capa delgada, pero muy extensa de rocas sedimentarias y metamórficas. Son rocas cristalinas o vítreas, estas se forman a partir del enfriamiento y solidificación del magma, proceso que puede ocurrir debajo de la superficie terrestre o después de una erupción volcánica en la superficie, en cualquiera de las dos situaciones las rocas resultantes se denominan rocas ígneas.

Las rocas ígneas se componen de rocas intrusivas o plutónicas, formadas a partir de un magma que solidifica debajo de la superficie y rocas extrusivas o volcánicas formadas por el magma cuando sale a la superficie como lava. Estas rocas están compuestas fundamentalmente por ocho elementos químicos que a su vez son los constituyentes principales de los silicatos: oxígeno, silicio, aluminio, calcio, sodio, potasio, magnesio, hierro, titanio y fósforo (Méndez, 2004).

El silicio y el oxígeno son los constituyentes mayoritarios de las rocas ígneas (se indican como contenido de SiO_2 o sílice de un magma % peso). En cuanto al contenido de sílice, las rocas ígneas se dividen en: **ultrabásicas o ultramáficas** ($< 45 \% \text{SiO}_2$), **básica o máfica** ($45 - 52 \% \text{SiO}_2$), **intermedia** ($52 - 65 \% \text{SiO}_2$) y **ácida o félsica** ($> 66 \% \text{SiO}_2$). El contenido de sílice se combina con los distintos iones, para formar los minerales pertenecientes al tipo de roca a generar, como se muestra en la Figura 26.

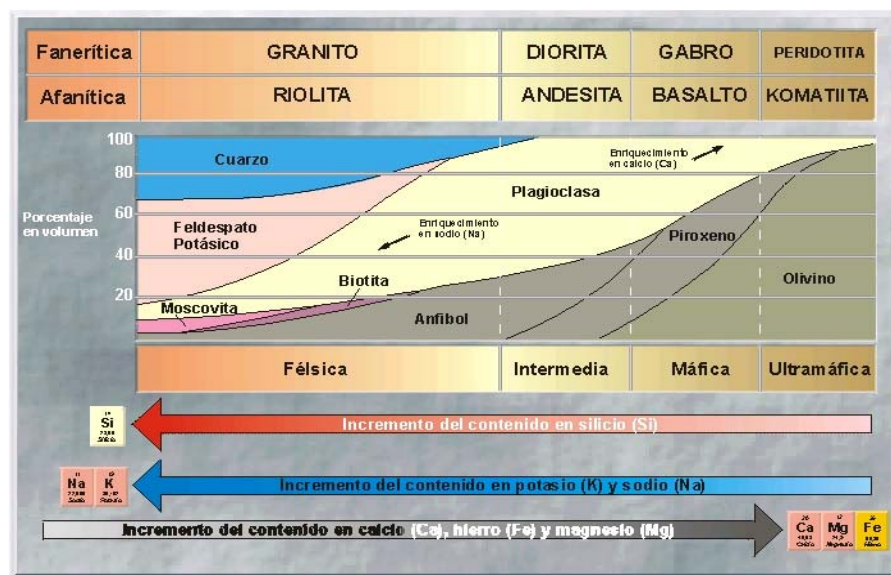


Figura 26. Clasificación de las rocas ígneas. (UAM, 2006)



6.2.2 Rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias representan un volumen relativamente pequeño dentro de la corteza de la tierra en comparación con las rocas ígneas y metamórficas. Sin embargo, en la superficie de la tierra y las rocas que afloran, los sedimentos y rocas sedimentarias ocupan un 75%, con respecto al 25 de las rocas ígneas y metamórficas, lo cual indica, la gran importancia de los sedimentos y rocas sedimentarias (Méndez, 2004).

Las rocas sedimentarias se derivan de rocas preexistentes estas pueden ser ígneas, metamórficas o sedimentarias. Sobre estas rocas pueden actuar los procesos de meteorización, erosión y transporte en los sedimentos clásticos denominados también terrígenos, detríticos o clásticos silíceos. Las rocas sedimentarias también pueden ser de tipo no clásticos, las cuales se forman ya sea por procesos químicos y bioquímicos a través de soluciones ricas en determinados minerales y por la acumulación de organismos y restos de plantas (Méndez, 2004). La Tabla 3 presenta en términos generales la clasificación de las rocas sedimentarias.

Tabla 3. Clasificación de las rocas sedimentarias

CLÁSTICOS	ROCAS
Terrígenos o clásticos silicios	Conglomerados, brechas, areniscas, limonitas y lutitas.
Sedimentos volcanoclásticos	Igninbritas, tufas, hialoclastitas, arenas y conglomerados volcánicos.
NO CLÁSTICOS	
Sedimentos biogénicos, bioquímicos y orgánicos	Calizas, dolomitas, cherts, fosfatos, carbón, lutitas bituminosas.
Sedimentos químicos	Evaporizas, sedimentos ferruginosos, chert precipitado.

6.2.3 Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas se derivan de rocas preexistentes (ígneas, sedimentarias o metamórficas) que sufren cambios mineralógicos, de textura y



estructurales. Estos cambios pueden ser el resultado de variaciones importantes de temperatura, presión y tensiones de cizalla a considerable profundidad en la corteza terrestre (Dana, 1998).

La clasificación de las rocas metamórficas es muy compleja, no obstante de una manera muy simple puede estar basada en la presencia o ausencia de foliación y en la composición mineralógica. La Figura 27 muestra los dos grupos de rocas sedimentarias. De esta forma se establecen dos grandes grupos: rocas foliadas y rocas no foliadas.

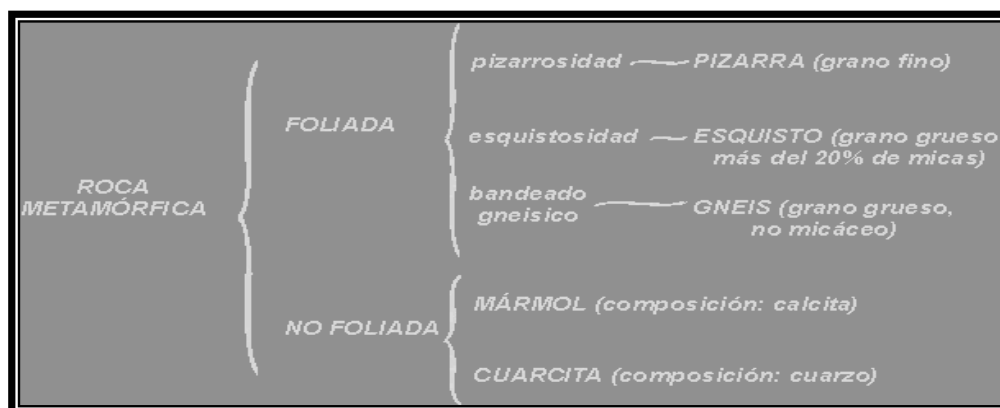


Figura 27. Clasificación de las rocas metamórficas.

7 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES A DETERMINAR EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

Una vez obtenidas las mezclas asfálticas, podrán determinarse algunas características, ya sean cualitativas o cuantitativas a través de propiedades como cubrimiento, cohesión y adhesión. Por tal sentido es importante aclarar cada una de estas propiedades como se expresa a continuación:

7.1 Cohesión

Se define como la resistencia a la rotura en masa del ligante, en el caso de las emulsiones es inicialmente baja, pero aumenta a medida que se va eliminando el agua, hasta alcanzar la del asfalto base (Batista, 1993).

Esta propiedad indica la dificultad de un producto asfáltico o de una mezcla del mismo y de los fragmentos de rocas, para romperse por tracción sin que falle la adherencia entre el asfalto y los fragmentos de rocas.



La cohesión es una propiedad de los suelos, la cual hace que el material ofrezca resistencia a la deformación bajo un esfuerzo de tensión. Esta es suministrada por la arcilla presente en el material, o sea la parte cementante o aglutinante, por lo que los granos así cementados, presentan tal resistencia a ser separados que el agua no puede penetrar en la masa del suelo. El limo, gravas y las arenas no presentan mayor cohesión y son penetrados fácilmente por el agua (Batista, 1993)

7.2 Adhesión

Es la propiedad de la materia por la cual se unen dos superficies de sustancia iguales o diferentes cuando entran en contacto y se mantienen juntas por fuerzas intermoleculares.

Las emulsiones presentan muy buena adherencia activa, consecuencia lógica de su fluidez y facilidad de cubrir las rocas, al mismo tiempo que una buena adherencia pasiva, consecuencia de la presencia de los emulsificantes en su formulación (Batista, 1993).

Está representada como la fuerza de unión entre un producto asfáltico y un fragmento de roca. Además de esto, tiene que existir afinidad entre las moléculas de uno y de otro cuerpo. La Figura 28 se muestra la representación de fuerzas cohesivas y adhesivas entre sustancias.

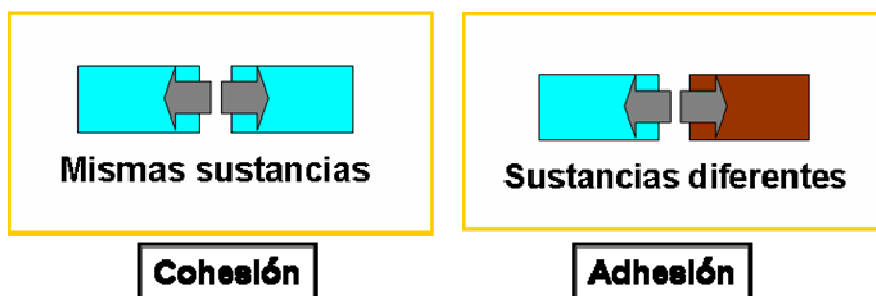


Figura 28. Representación de fuerzas de cohesión y adhesión.



ANTECEDENTES

❖ NACIONALES

DUARTE, (1999). Estudio la adsorción de los asfaltenos en crudo del Furrial en solución de tolueno, en ausencia y presencia de surfactante, sobre sílica gel. Empleando como técnica de análisis Espectroscopia Láser. Los surfactantes utilizados fueron: de tipo no iónico (Nonifenosl etoxilado, NFE) y de tipo iónico (Dodecylbencenosulfonato de sodio, DBS).

Como resultado ambos surfactantes disminuyen la adsorción de los asfaltenos del crudo Furrial sobre la sílica gel, entre un 70 y 90 %. Donde el DBS por ser un surfactante iónico, puede interactuar de forma eficiente con la sílica y por lo tanto disminuye en mayor cantidad la adsorción de los asfaltenos sobre dicho sustrato.

DÍAZ, (2001). Estudio la adsorción de crudos sobre sílica gel, con el fin de obtener la composición SARA del coloide de asfaltenos. La sílica gel fue utilizada como superficie desestabilizadora de los coloides de asfaltenos lo cual permitió aislar una fracción que se infiere posee la misma composición de las partículas coloidales en el crudo.

RODRÍGUEZ, (2001-a). Evaluó alternativa orientadas a reducir las pérdidas por evaporación en asfaltos con alto potencial a generar emisiones como lo son los provenientes del crudo Boscán. Dicho estudio consistió en agregar proporciones entre 5 y 10% de extractos aromáticos pesados provenientes de la refinería Isla, Cardón y Amuay, al crudo Boscán.

Las emisiones recolectadas en el generador (Fume Collector) presentaron composiciones similares, ya sea con o sin la incorporación del extracto aromático pesado proveniente de la refinería Isla. Aun no han podido lograr una fiel representación de las emisiones generadas en campo, esto no permite la obtención de resultados confiables que puedan generar buenas conclusiones.



RANAUDO, (2002). Evaluó la adsorción de asfaltenos y crudos, sobre superficies minerales a fin de aportar soluciones a los problemas de taponamientos de pozos y tuberías de producción por la precipitación de asfaltenos en la interfase sólido-líquido.

En su trabajo de ascenso hace referencia a cuatro artículos. El primero aplica técnicas espectroscópicas para el estudio de la adsorción de asfaltenos en superficies minerales poco activas. Esta técnica permite conocer la adsorción de asfaltenos sobre la superficie a través de la diferencia de transmitancia de la solución antes y después de la adsorción para soluciones concentradas entre 100 y 6000 mg/L. Los artículos 2 y 3 presentan resultados de estudios cinéticos de adsorción de asfaltenos sobre gel de sílice, así como las isothermas de adsorción para diferentes tiempos de contactos. Estos involucran la formación de multicapas de asfaltenos, ya que la superficie mineral crea una nueva superficie activa donde otras moléculas pueden ser adsorbidas y propicia la interacción asfalteno-asfalteno, lo cual está asociado con la formación de agregados en solución.

El último artículo, involucra el estudio sobre las propiedades coloidales de los asfaltenos y aplicación de técnicas espectroscópicas en el estudio de la adsorción de asfaltenos sobre superficies inorgánicas.

MERCADO, et al. (2006). Estudio como ocurre el rompimiento de una emulsión asfáltica sobre un agregado sólido. Para tal fin utilizaron un surfactante catiónico y uno no iónico, lo mezclaron con arena de granulometría entre 20 y 53 μm . Obtuvieron las isothermas de adsorción de los surfactantes sobre el sólido y las masas críticas para el rompimiento de las emulsiones en ambos sistemas. Llegaron a la conclusión de que la superficie del sólido cambia de hidrofílica a lipofílica, en donde el proceso de heterofloculación puede ocurrir dependiendo del área del sólido disponible para la atracción del surfactante.

MORENO DE MATOS, (2006). Realizaron un estudio comparativo basado en fundamentos teóricos – prácticos del comportamiento del Slurry Seal utilizando agregados de tipo calcáreo y silíceo. Donde estos agregados serán usados como Tratamientos para el Mantenimiento y Rehabilitación de superficie asfáltica. Del estudio



se concluyó que a pesar de que ambas mezclas de Slurry Seal presentaron comportamiento apegados a las especificaciones, la relación de emulsión asfáltica – agregado calcáreo, mantuvo las mejores condiciones en cuanto a consistencia, cohesión, exudación, deformación y abrasión por lo cual es recomendada para su mayor uso en la aplicación de Slurry Seal.

ROMERO, (2006). Realizó el estudio de varios surfactantes catiónicos en el diseño de las emulsiones asfálticas. Su formulación contempló la selección acertada del tipo de surfactante catiónico de acuerdo a la ruptura, evaluando parámetros como: química del surfactante, tipos, grupos sustituyentes, pH, concentración del producto químico (Kg/Ton.); así como también la preparación de emulsiones asfálticas.

HERRERA, (2007). Determinó el efecto de las emulsiones asfálticas sobre la adsorción de P en suelos ácidos de baja fertilidad. Donde la presencia de las emulsiones afectó notablemente la adsorción de los fosfatos, alcanzando como resultados la caída de adsorción de P, en presencia de emulsión por debajo de la isoterma control. Las emulsiones poseen mayor estabilidad de unión y velocidad de adsorción con la superficie respecto al fosfato.

❖ INTERNACIONALES

México:

RODRÍGUEZ, et al. (2001-b). Hace una revisión sobre las emulsiones asfálticas, haciendo énfasis en la importancia que poseen en cuanto a la modernización tecnológica del proceso de asfaltado de carreteras. Resaltan la importancia en su fabricación y aplicación en la pavimentación. Presentan algunas ventajas sobre el asfalto caliente o rebajado, con lo cual pretender extender el empleo de este tipo de tecnología en México debido a la magnitud de su red de carreteras.

Europa:

ECKMANN, et al. (2001). El estudio consistió en caracterizar 14 tipos de rocas (agregados minerales) seleccionados a priori en varias canteras de Europa y



relacionarlo con los fenómenos de ruptura de una emulsión asfáltica de tipo catiónica. Realizaron análisis químico y petrografía a las muestras, así como también ensayos de flotación. Concluyeron que en estas mezclas en frío, la reactividad del agregado de los sitios activos de cargas negativas, esta condicionado por la hidrólisis de la especie mineral presente en la muestra. Lo cual esta influenciado por el pH de la emulsión y que permite la adherencia de los glóbulos de asfalto con la mineralogía presente en las rocas (agregados minerales).

Colombia:

MANTILLA, et al. (2007). Este estudio consistió en determinar de forma experimental la flotabilidad de minerales de cuarzo y feldespatos, los cuales fueron tomados de una mina feldespática de Berlín (Santander). Para la flotación de ambos minerales se utilizaron colectores catiónico (Diamina) y un aniónico (sulfonato de petróleo) y se realizaron mediante la determinación del potencial Z. Del estudio concluyeron que la mezcla de colectores mejora fuertemente la hidrofobicidad del feldespato, mientras que se disminuye la flotabilidad del cuarzo, lo cual está asociado a fuertes cambios del potencial Z.



ZONA DE ESTUDIO

Las muestras de rocas estudiadas fueron recolectadas en seis canteras del territorio venezolano. La Figura 29 muestra la ubicación de las cinco zonas donde fueron recolectadas las muestras de interés. Las muestras de fragmentos de rocas que pertenecen al estado Mérida provienen de la cantera Los Andes C.A; la del estado Falcón a la cantera Falcón; la del estado Aragua en las canteras El Vegón C.A y Empronacal C.A, ambas localizadas en la Carretera Nacional, vía Pardilla I - San Sebastián de los Reyes; mientras que la correspondiente al estado Anzoátegui fue tomada en la cantera Conacal CVG, localizada a unos 12 Km del pueblo de Clarines y la del estado Bolívar recolectada en la cantera Palma Sola, ubicada en el Km 34, carretera vieja de Ciudad Bolívar – Km 70.

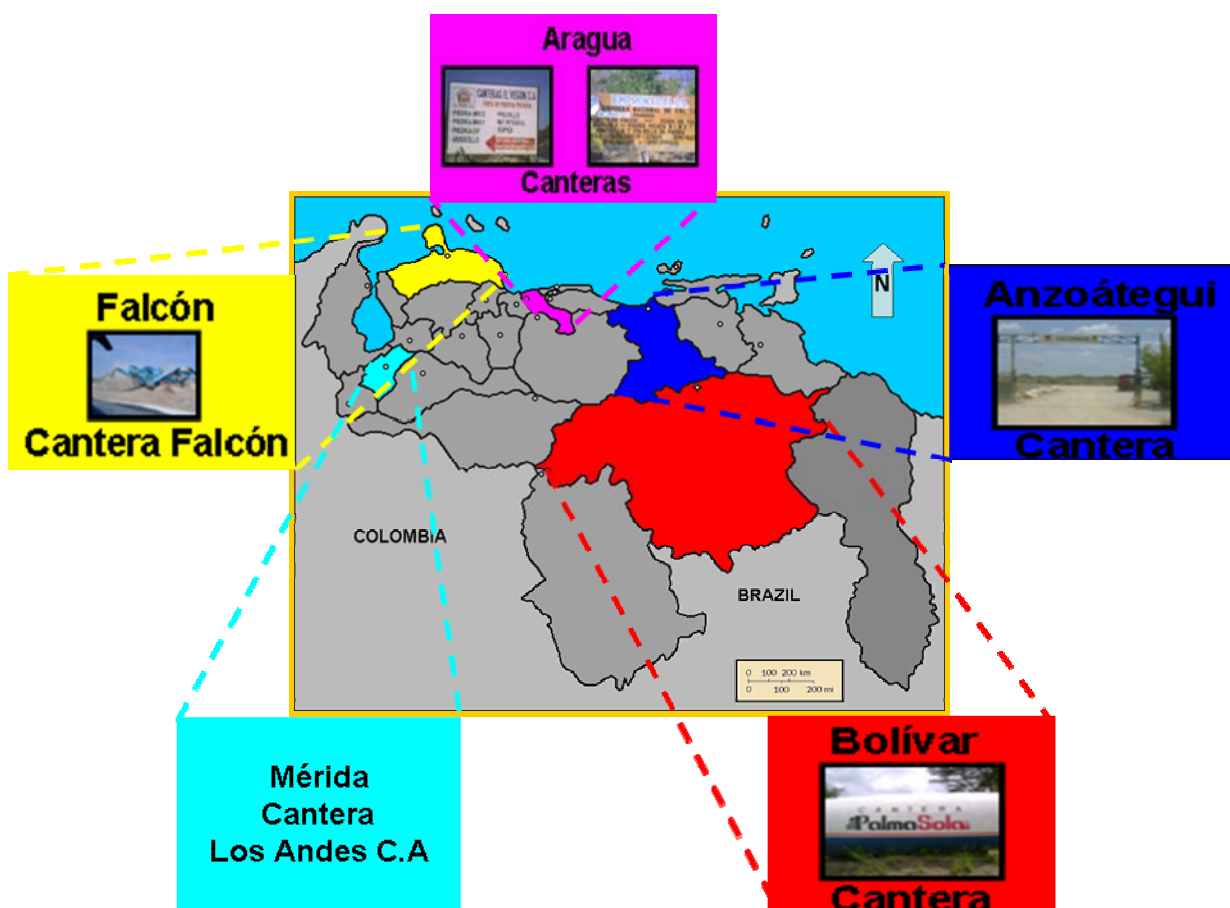


Figura 29. Mapa de la Republica Bolivariana de Venezuela ilustrando la ubicación relativa de las cinco zonas de estudio y las canteras.



METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología seguida en este estudio fue dividida en dos fases que incluyó: una de recolección de muestra y otra de laboratorio, las cuales serán desarrolladas a continuación:

1. RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS

Las muestras recolectadas en cada una de las canteras fueron del tipo compuestas, recolectadas partiendo de una distribución homogénea y aleatoria en la pila de dicho material ubicada en la cantera. Para cada una fueron recolectados aproximadamente 1Kg de muestra individual en diez puntos de la pila de material, para una masa total de 10Kg de muestra. Las muestras en campo fueron previamente caracterizadas y rotuladas, para luego ser transportadas al laboratorio de suelos y sedimentos del ICT; donde fueron secadas, cuarteadas y homogeneizadas. La Tabla 4 muestra donde fueron recolectadas cada una de las muestras, así como la nomenclatura a ser utilizada.

Un procedimiento similar fue realizado en cada una de las canteras para obtener un total de cinco (5) muestras compuestas de aproximadamente 10Kg cada una. La sexta (6) muestra perteneciente a la zona del estado Mérida, no fue recolectada en la cantera debido a que ya se encontraba el material en el depósito del laboratorio FUN- Aplicaciones de la empresa Clariant Venezuela.

Tabla 4. Ubicación de las zonas y canteras en estudio.

ZONA	CANTERA	UBICACIÓN	NOMENCLATURA EN CAMPO	NOMENCLATURA LABORATORIO
Mérida	Los Andes C.A	Mérida	JB-Mérida-2008	Gns. - Los Andes
Falcón	Falcón	Sector cardón, Falcón	JB-Falcón-2008	Aren. - Falcón
Aragua	El Vegón C.A	Carretera Nacional, vía Pardilla 1 San Sebastián de los Reyes	JB-Arag.-Veg.-2008	Cal. - Veg.
	Empronacal C.A		JB-Arag.-Emp.-2008	Cal. - Emp.
Anzoátegui	Conacal CVG	12 Km del pueblo de clarines	JB-Anzoátegui-2008	Cal. - CVG
Bolívar	Palma Sola	Km 34, carretera vieja en Ciudad Bolívar - Km 70	JB-Pto.O.-2008	Gns. - Pal. S.



2. LABORATORIO

Esta fase se realizó en tres etapas: la primera, consistió en realizar la caracterización de las muestras a través de un tratamiento físico, químico y mineralógico; la segunda, involucró la preparación de la emulsión asfáltica catiónica y la tercera consistió en la preparación de las mezclas asfálticas.

Seguidamente son descritas cada una de las etapas y variables estudiadas.

2.1 Caracterización de las muestras

La caracterización de las seis muestras compuestas consistió en el tratamiento físico, químico y mineralógico.

En lo que respecta el tratamiento físico, consistió en cuartear la muestra hasta obtener una porción representativa de aproximadamente 2Kg. Un kilogramo de muestra fue nuevamente cuarteado hasta obtener una fracción de aproximadamente 250g la cual fue pulverizada utilizando un Shalterbox para realizar los análisis químico y mineralógico, dejando el resto de muestra como testigo. El otro kilogramo de muestra se utilizó para realizar el estudio granulométrico en solo dos muestras, puesto que no se contaba con la certificación granulométrica emitido por la cantera. Este fue realizado según la norma:

➤ **Ensayo de granulometría aplicando la normativa A.S.T.M. E11**, permite determina el porcentaje de finos y gruesos que contiene un material (rocas disgregadas) al pasar a través de una serie de tamices.

En general, la metodología consistió en colocar 1000 g de material en el tamiz principal N° 4 y dejar pasar a través de los siguientes tamices N° 8, 16, 30, 50, 100, 200 y fondo, dicho material durante una agitación por 5min. Luego pesar cada uno de los tamices con su respectivo pasante de material y calcular el % de pasante (ver apéndice A) en cada una de las fracciones.

Para el análisis mineralógico de cada unas de las muestras previamente pulverizadas, se tomaron aprox. 2,0g., que luego fueron mineralógicamente analizados mediante el equipo de Difracción de Rayos X modelo D8 ADVANCE de marca Brukers axs. Por parte del tratamiento químico, a las muestras les fue realizado una digestión



ácida ó fusión dependiendo del tipo de muestra. Para poder ser determinado las soluciones obtenidas correspondiente a las seis muestras de rocas, se realizó a través de la técnica de espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado (ICP) utilizando el equipo Jobin Yvou, modelo Utima 2. Los elementos hacer determinados en cada una de las soluciones son los siguientes: Si, Al, Ca, Na, K, Fe, Mg, en forma de óxidos, relacionándolo con la mineralogía presente en las muestras.

Seguidamente serán descritos dichos procedimiento:

Para las muestras recolectadas en los estados Mérida, Falcón y Bolívar, el tratamiento realizado fue por fusión. Se tomo aprox. 0,2g. del material previamente pulverizado y se mezclo con fundente en una relación 1:5, posteriormente colocados en un crisol de grafito. El fundente fue preparado en relación 1:1 de metaborato 0,5g y tetraborato de litio 0,5g, seguidamente la mezcla muestra – fundente, fue previamente homogeneizada en el crisol y luego introducida en la mufla a 950 °C por 45min. Una vez fundida la muestra y la perla formada, es agregada a un beacker de 250mL con solución de HNO₃ (1N), colocándola en una plancha a temperatura entre 50 - 60 °C hasta disolver la perla con agitador magnético. Posteriormente, la solución es filtrada y trasvasada con HNO₃ (1N) a un balón aforado de 100 mL, donde fueron determinados a través de la técnica de ICP los elementos mayoritarios antes mencionados.

Por su parte, las muestras previamente recolectadas en los estados de Aragua y Anzoátegui; los tratamientos realizados fueron: perdida al rojo, digestión ácida y fusión. Para realizar la perdida al rojo, del material previamente pulverizado se pesaron aproximadamente 2,0g de muestra en un crisol de porcelana y se introdujo en la mufla a 950°C por 45 minutos. Seguidamente es pesado el residuo y agregado a un beackers de 150mL, para luego realizar una digestión ácida agregando HCl (1N) y agitando hasta no observar efervescencia. La solución es filtrada y trasvasada a un balón aforado de 50mL.

El sólido obtenido mediante el papel de filtro fue secado por medio de una estufa a temperatura de aprox. 45°C. Luego se procedió a realizar un tratamiento por fusión. Este tratamiento fue realizado de forma similar al explicado para las muestras de los



estos Mérida, Falcón y Bolívar. En ambas soluciones, obtenidas de la digestión ácida y de la fusión, se procedió a determinar los elementos mayoritarios antes mencionados, a través de la técnica de ICP.

2.2 Preparación de las emulsiones asfálticas catiónicas

Para esta segunda etapa, consistió en la preparación de las emulsiones asfálticas catiónicas, fue realizado mediante dos procesos. Un primer proceso A que permitió evaluar un grupo de surfactante; para luego a través de un segundo proceso B, validar el surfactante que presentara el excelente comportamiento obtenido en la emulsión y en las mezclas asfálticas.

2.2.1 Proceso A: empleando un Mixer

Para este proceso A se utilizó como equipo mezclador un Mixer, el cual permite emulsificar la fase oleica y acuosa. Ambas fases son agitadas por el equipo hasta obtener la emulsión asfáltica catiónica. Este proceso permitió realizar de forma cualitativa las evaluaciones tanto de los surfactantes, como de las emulsiones y mezclas asfálticas. A continuación se presenta como fueron seleccionados los surfactantes, así como también la preparación de la emulsión asfáltica.

2.2.1.1 Selección de los surfactantes:

Para una primera evaluación fueron seleccionados de la línea Emulsiv® de la empresa Clariant, un total de doce (12) emulsificante de tipo catiónico. Entre los seleccionados cinco fueron de forma pura y siete de forma combinada. La Tabla 5 muestra la nomenclatura a ser utilizada en los surfactantes seleccionados para una primera evaluación mediante el proceso A.



Tabla 5 Nomenclatura de los surfactantes seleccionados en la primera evaluación de las emulsiones asfálticas fabricada mediante el proceso A.

NOMENCLATURA	NOMBRE COMERCIAL
S 1	Emulsiv® 196/95 + Genamin® TAP100
S 2	Emulsiv® M375
S 3	Emulsiv® M1785
S 4	Emulsiv® M475
S 5	Emulsiv® M475 + Genamin® TAP100
S 6	Emulsiv® M475 + Genamin® TP4A
S 7	Emulsiv® M175
S 8	Emulsiv® M175 + Genamin® TAP100
S 9	Emulsiv® M175 + Genamin® TP4A
S 10	Emulsiv® M515
S 11	Emulsiv® M515 + Genamin® TAP100
S 12	Emulsiv® M515 + Genamin® TP4A

Mientras que para realizar una segunda evaluación, fueron descartados seis (6) tipos de surfactantes de la primera evaluación y agregados dos (2) nuevos a ser evaluados en esta parte. Donde uno es de forma pura (Emulsiv® M325) y el otro de forma combinada (Emulsiv® 196/07 + Genamin® TAP100). La Tabla 6 muestra la nomenclatura a ser utilizada en los surfactantes seleccionados para una segunda evaluación mediante el proceso A.



Tabla 6. Nomenclatura de los surfactantes seleccionados en la segunda evaluación de las emulsiones asfálticas fabricada mediante el proceso A.

NOMENCLATURA	NOMBRE COMERCIAL
S 1	Emulsiv® 196/95 + Genamin® TAP100
S 2	Emulsiv® M375
S 3	Emulsiv® M1785
S 4	Emulsiv® M475
S 7	Emulsiv® M175
S 10	Emulsiv® M515
S 13	Emulsiv® M325
S 14	Emulsiv® 196/07 + Genamin® TAP100

2.2.1.2 Preparación de las emulsiones asfálticas:

Para la preparación de las emulsiones asfálticas, fue empleado un equipo emulsificador Mixer, el cual permite mezclar la fase oleica (asfalto caliente) y la fase acuosa (agua, emulsificante y ácido clorhídrico) en una proporción 60:40. Para esto, fue seguido un procedimiento experimental que a continuación se describe:

Para la preparación de 100g de emulsión en un beacker A (500mL), se pesan 60g de asfalto, previamente precalentado a 140°C y posterior mantenido en un baño de aceite a temperatura controlada entre 70 y 80°C. En otro beacker B (250mL), se prepara la solución acuosa de aprox. 40,0g., que consiste pesar una cantidad de agua ~38,0g, surfactante ($\leq 1,3 \%$) y HCl gota a gota hasta obtener un pH $\leq 2,0$. Luego mediante una plancha mantener la fase acuosa a temperatura aproximada de 60°C.

Cuando la temperatura de ambas fases esté controlada, se vierte la fase acuosa del beacker B (250mL) dentro del beacker A (500mL), donde está contenido el asfalto; seguidamente se homogeneiza lentamente con una varilla de vidrio (sin agitar), despegando un poco el asfalto de las paredes del recipiente. Posteriormente fue introducido el Mixer dentro del recipiente y se mezclaron ambas fases por espacio de 3



minutos hasta obtener la emulsión asfáltica. Una vez obtenida la emulsión es retirada del baño de aceite y se coloca dentro de otro recipiente con agua natural, agitando poco a poco con una varilla de vidrio y se trasvasa a otro recipiente. De la misma forma se realiza para preparar las otras emulsiones asfálticas con los demás surfactantes seleccionados denominados como: S1 hasta S14

2.2.2 Proceso B: empleando un Molino coloidal

Para este proceso B se utilizó como equipo mezclador un Molino coloidal, el cual permite emulsificar la fase oleica con la fase acuosa de forma instantánea permitiendo obtener la emulsión asfáltica catiónica. Este proceso permitió validar y realizar de forma cuantitativa la evaluación del surfactante en la emulsión, así como también en las mezclas asfálticas. A continuación se presenta como fue seleccionado el surfactante, así como también la preparación de la emulsión asfáltica.

2.2.2.1 Selección del surfactante:

De los catorces (14) surfactante evaluados mediante el proceso A, se procedió a tomar el surfactante presente en la emulsión asfáltica que obtuvo excelente comportamiento de cubrimiento, cohesión y adhesión en las mezclas asfálticas realizadas con cada uno de los tipos de rocas. De tal manera que el surfactante a ser evaluado y validado mediante este proceso fue el Emulsiv® M1785 (**S 3**) de rompimiento lento (RL).

2.2.2.2 Preparación de las emulsiones asfálticas:

Para preparar la emulsión asfáltica a través del molino coloidal, primero se debe realizar un curado del equipo con fase acuosa del surfactante a ser evaluado y el equipo debe estar a una temperatura aproximada de 80°C. La metodología empleada para preparar la emulsión asfáltica a través de este equipo es mostrada a continuación:

Primero se prepara mayor cantidad de emulsión asfáltica, aproximadamente mayor a 1,0Kg.; manteniendo una relación entre fases igual a la del proceso A 60:40. La fase oleica de aproximadamente 600g fue precalentada en una plancha a una temperatura de aproximadamente 140°C. Mientras que la fase acuosa fue preparada de forma similar a la explicada en el proceso A (con el Mixer). Luego de haber controlado la temperatura en ambas fases se agregan al molino de forma instantánea en el



embudo que se encuentra en la parte superior; por otro tubo del sistema localizado en el extremo inferior es recolectada la emulsión asfáltica. La Figura 30 muestra el molino coloidal utilizado para preparar la emulsión asfáltica mediante el proceso B.



Figura 30. Molino Coloidal utilizado para realizar la emulsión asfáltica de forma instantánea.

2.3 Ensayos realizados a las emulsiones asfálticas

Una vez obtenidas las emulsiones asfálticas realizadas mediante el proceso A (Mixer) o proceso B (Molino coloidal), se les realizan los siguientes ensayos:

2.3.1 Ensayos visuales:

Consiste en observar de forma cualitativa lo siguiente:

Observar el aspecto, una buena emulsión debe visualizar un líquido oscuro y fluido, sin mucha espuma ni agua separada.

Observar la película en las paredes, una buena emulsión debe ser continua y uniforme en las paredes del recipiente.

Observar grumos en el dedo, para ello con una varilla de vidrio colocar un poco de emulsión en la mano y frotar, visualizar que tan rápido forma grumos o se despega la emulsión.



2.3.2 Ensayos según las normas:

➤ **Viscosidad Saybolt - Furol mediante norma A.S.T.M. D244 - 88:** permite medir la resistencia opuesta en el seno de una masa líquida a una deformación con gradiente de velocidad; es decir, la velocidad con la cual fluye una emulsión asfáltica a temperatura de 25 y 50 °C.

Este ensayo fue realizado utilizando un viscosímetro “Saybolt – Furol”, que consiste en dejar fluir, en caída libre, la emulsión asfáltica (anteriormente tamizada en la prueba retenido N° 20) desde un tubo estandarizado que posee el equipo en su interior, donde se agrega la emulsión. Luego la emulsión se deja deslizar por gravedad hacia el matraz aforado de vidrio de 60mL estandarizado para la prueba, midiéndose el tiempo desde el momento en que comienza a fluir la emulsión hasta que llega al nivel de aforo del matraz. La viscosidad es reportada en tiempo (seg.) para un flujo de 60 mL. Este ensayo solo fue realizado a la emulsión asfáltica preparada en el proceso B.

➤ **Residuo por evaporación mediante norma A.S.T.M. D244, COVENIN 1057-92:** este ensayo permitió obtener el porcentaje de residuo de asfalto, que queda en un volumen de emulsión asfáltica mediante incremento de temperatura hasta evaporación rápida.

Este ensayo fue realizado con ciertas modificaciones de la siguiente forma: en un recipiente se agregó 50g de emulsión asfáltica, posteriormente colocada en una plancha a temperatura entre 80 – 100°C, agitando la emulsión con una varilla hasta observar una película continua de asfalto, luego se pesa en caliente para obtener el % de residuo de asfalto (ver apéndice H)

➤ **Retenido en malla N° 20, mediante norma A.S.T.M. D244, COVENIN 1198-92:** este ensayo conlleva a determinar cuantitativamente, la cantidad de glóbulos de asfalto relativamente grandes que pueden no haberse detectado en la prueba de sedimentación y que podrían obstruir el equipo de rociador, así como el espesor y la uniformidad de la película de asfalto sobre las rocas. Los glóbulos grandes pueden indicar tendencia a sedimentarse y en consecuencia, causan un rompimiento prematuro.



El mencionado ensayo fue realizado con ciertas modificaciones de la siguiente forma: se pesaron 100g de emulsión asfáltica en un beakers (150mL), posteriormente se dejó pasar por el tamiz, luego se lavó rápidamente con agua y se dejó secar a temperatura ambiente, seguidamente pesar el tamiz y obtener el % de retenido de asfalto (ver apéndice H).

➤ **Sedimentación a los 5 días, mediante norma A.S.T.M. D244, COVENIN 934-32:** este ensayo indica el grado de estabilidad que presentan las emulsiones asfálticas durante su almacenamiento.

Este experimento se realizó en un cilindro graduado (100mL), en el cual se agregaron 50mL de la emulsión asfáltica, se tapó la boca del cilindro y a los 5 días se mide la separación de las fases para obtener el % de sedimentación (ver apéndice H).

2.4 Preparación de la mezcla asfáltica

Para preparar las mezclas asfálticas mediante las emulsiones asfálticas se procedió utilizar el método I, para el proceso A y el método II, para el proceso B. A continuación serán explicados ambos métodos.

2.4.1 Método I:

Este método fue aplicado utilizando las emulsiones asfálticas, obtenidas en la primera y segunda evaluación, mediante la preparación a partir del proceso A. El procedimiento para obtener estas mezclas asfálticas, utilizando solamente tres tipos de rocas, a seguir: Cal. – Veg.; Gns. – Pal. S. y Aren. – Falcón, fue el siguiente:

En un recipiente se pesaron 100g del tipo de muestra de roca, luego se agregó el % agua de premezcla entre un 4 y 10% dependiendo del tipo de muestra y la absorción del material y 14g de la emulsión asfáltica fabricada. Seguidamente se mezcló por espacio de 2 min., hasta observar buen cubrimiento. Luego la mezcla fue extendida sobre papel absorbente de forma que su espesor fuera aproximadamente entre 5 a 8mm y dejar secar a temperatura ambiente.

Una vez obtenidas las mezclas asfálticas, proceder a determinar las características de cubrimiento, cohesión y adhesión. El procedimiento de los ensayos para determinar estas características es descrito a continuación:



2.4.1.1 Cubrimiento:

Cualitativo: fue realizado mediante la observación visual de forma cualitativa, donde primero se fija la cantidad de agua de premezcla de la siguiente forma: en un recipiente se agregó 100,0g. del material de fragmento de roca, luego se agregó un 8% de agua de premezcla, agitar suavemente y agregar 14,0g. de emulsión asfáltica mezclando suavemente con una espátula por espacio de 2 minutos. Para una primera evaluación la mezcla es extendida sobre papel absorbente, a fin de observar el cubrimiento.

Para realizar la segunda evaluación se procedió de la siguiente forma: se peso en un recipiente 100,0g. de roca (exceptuando la muestra Aren. – Falcón) y se varió el % de agua de premezcla. Primero partiendo de un 8% equivalente a 3,0g. de agua, luego agregando gramo a gramo agua hasta obtener el % óptimo de agua de premezcla en cada uno de los tipos de rocas y dejando fijo los otros parámetros. Una vez obtenidas las mezclas asfálticas se tomaron aproximadamente 5,0g. de cada una de las muestras y se les realizó una sección de fotografía con una cámara digital modelo Fine Pix S3pro a una resolución de 12 millones y escala de macro y microfotos, en el centro de fotografía del IVIC.

Cuantitativo: se procedió a realizar un mallado de 10 x 10cm. sobre la fotografía de las mezclas asfálticas. Donde cada cuadrado representó el 1%, para un total del 100% de cubrimiento del área total. Una vez realizado el mallado se contaron aquellos cuadrados donde se observaban al mineral o roca descubierto, tomando como condición aquellos cuadrados de 1x1cm. donde más del 50% no había cubrimiento, es decir, donde la emulsión asfáltica no cubrió o no hubo rompimiento sobre la superficie mineral. De esta forma obtener un porcentaje de cubrimiento para cada una de las mezclas asfálticas en los cinco tipos de rocas evaluados.

2.4.1.2 Cohesión:

Este ensayo se realizó de forma visual y cualitativo para el método I. Esta propiedad fue realizada de forma cuantitativa en la validación de la emulsión asfáltica por el método II.



2.4.1.3 Adhesión:

➤ **Ensayo de la Prueba de Ebullición en Agua (Boiling Water Test), mediante la norma A.S.T.M D3625:** con este ensayo se determinó el desprendimiento del material, causados por daños debidos a la acción de la humedad a temprana vida del pavimento.

La aplicación de este ensayo, fue realizado con ciertas modificaciones de la siguiente forma: un beakers de 250mL contenido con agua destilada, fue colocado en una plancha hasta el punto de ebullición del agua. Luego se pesaron en una malla 10,0g. de mezcla asfáltica, se introdujo dentro del recipiente por espacio de 3min a ebullición sin que la muestra entre en contacto con el fondo del recipiente. Posteriormente la muestra es introducida en un beakers de 250mL con agua destilada a temperatura ambiente por espacio de 30 seg.; luego se coloca la muestra dentro de una estufa a 110°C hasta obtener peso constante, posterior se calcula el % de material lavado (ver apéndice K).

2.4.2 Método II:

Este método fue aplicado utilizando la emulsión asfáltica preparada a partir del proceso B. Para ello, primero debe obtenerse el % óptimo de agua de premezcla a partir del ensayo de consistencia. Luego otros ensayos que son realizados para mezclas asfálticas destinadas a tratamiento superficial o lechadas asfálticas (Slurry Seal). El procedimiento utilizado para obtener estas mezclas asfálticas a través de los ensayos es el siguiente:

➤ **Consistencia mediante la norma A.S.T.M. C-128:** este ensayo permite determinar el % óptimo de agua de premezcla en la mezcla asfáltica; según la norma el % óptimo debe cubrir la base del cono entre 2,0 y 3,0 cm.

Este ensayo fue realizado preparando 500,0g. de mezcla asfáltica de igual forma como se preparó en el método I, con la modificación de variar el % agua de premezcla partiendo de un 8% (3,0g.) hasta obtener el % óptimo de agua. La mezcla se agrega dentro del cono estandarizado el cual se encuentra sobre la base de papel. Esta base presenta una escala de fluidez que contiene siete (7) circunferencias concéntricas cuyo radio se incrementa en un centímetro. El cono es removido a los 30 seg., dejando de



esta forma que la mezcla se escurra sobre la base para luego obtener el % óptimo de agua.

Una vez obtenidas las mezclas asfálticas (exceptuando la muestra Aren. – Falcón), se procedió a realizar los siguientes ensayos de abrasión por inmersión, cohesión y adhesión.

➤ **Abrasión por Inmersión mediante la norma A.S.T.M. D 3910 – 80a:** este ensayo permitió conocer la resistencia a la abrasión en inmersión con agua de una mezcla asfáltica.

Para realizar este ensayo fueron utilizados moldes de aro de metal de altura: 6mm, ancho: 8mm y diámetro: 19.71cm, en el cual se agregó la mezcla asfáltica sobre un papel absorbente manteniéndose en reposo. Posteriormente se introdujo en una estufa a 60°C por 24 h. Luego se colocó a inmersión con agua en el recipiente del equipo durante unos segundos a temperatura de 25°C. Seguidamente se accionó la maquina de abrasión durante 5min., la muestra fue posteriormente retirada y secada en la estufa a 60°C, hasta obtener peso constante. Por diferencia de peso se calculó el factor de desgaste de lechada en pista humedad, que no es más que la cantidad en gramos por área, que se pierden en el pavimento húmedo por m². La norma permite un máximo de 800 g/m² de desgaste en mezclas asfálticas.

2.4.2.1 Cubrimiento:

Fue realizado de forma cuantitativa igual al método I.

2.4.2.2 Cohesión:

Es importante señalar que el ensayo de cohesión aparece publicado de ISSA 1985 de la convención 12 en Nueva Orleans: este ensayo permite conocer como progresa el curado y fraguado de una mezcla para lechada asfáltica según transcurre el tiempo. Esto servirá de guía para el constructor, en el momento de compactar y abrir el transito superficial una vez colocada la lechada asfáltica sobre el pavimento.

El mencionado ensayo se realizó utilizando moldes de aros de metal, para tipo II presenta características de altura: 6mm, ancho: 3mm y diámetro: 5,6cm. Mientras que



para tipo III presenta características de altura: 9mm, ancho: 3mm y diámetro: 5,6cm. En dichos aros se agregó la mezcla asfáltica sobre un papel absorbente y se dejó reposar a una temperatura de 25°C. La muestra se colocó, en el cohesiómetro donde un pistón mantiene una presión de 200KPa (30 Kg/cm), seguidamente se accionó la maquina presionando el pistón contra la muestra durante 7 seg. y con el medidor de torsión previamente calibrado a cero se aplicó un giro de 90° en sentido a las agujas del reloj. El valor que se reporta por encima de 20 Kg. permite determinar un curado total y permitirá el libre transito en la vía.

2.4.2.3 Adhesión:

Realizado igual al método I, según norma A.S.T.M D 3625.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS

La caracterización de los fragmentos de rocas fue realizada, mediante análisis químico, a través de la aplicación de técnica de espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado (ICP); así como mediante el estudio mineralógico a través del análisis visual, petrográfico y aplicando la técnica de Difracción de Rayos X. Estos análisis fueron realizados en el Instituto de Ciencias de la Tierra, UCV. Seguidamente son presentados los resultados obtenidos de la caracterización de cada una de las muestras:

Muestra: Cal.- Veg.

La muestra Cal. – Veg., pertenece al grupo Villa de Cura, litológicamente es caracterizada por ser caliza maciza del Paleoceno superior – Eoceno inferior. Esta muestra fue caracterizada mediante los análisis que seguidamente son descritos.

Análisis visual siguiendo las recomendaciones dada por A.S.T.M. D2488, indica que se trata de una roca de color gris oscuro, con textura muy fina, que reacciona con el ácido clorhídrico. La forma de los granos son planas, presentan aproximadamente unas dimensiones de ancho de 5 a 10mm, largo entre 10 y 15mm, y espesor <5mm. La Figura 31 visualiza el análisis granulométrico certificado por la cantera, donde es clasificado como un material tipo polvillo $\leq \frac{3}{8}$ pulgadas, con un porcentaje de pasantes N° 200 de 10,00% y un contenido de arcilla aproximado de < 2%.

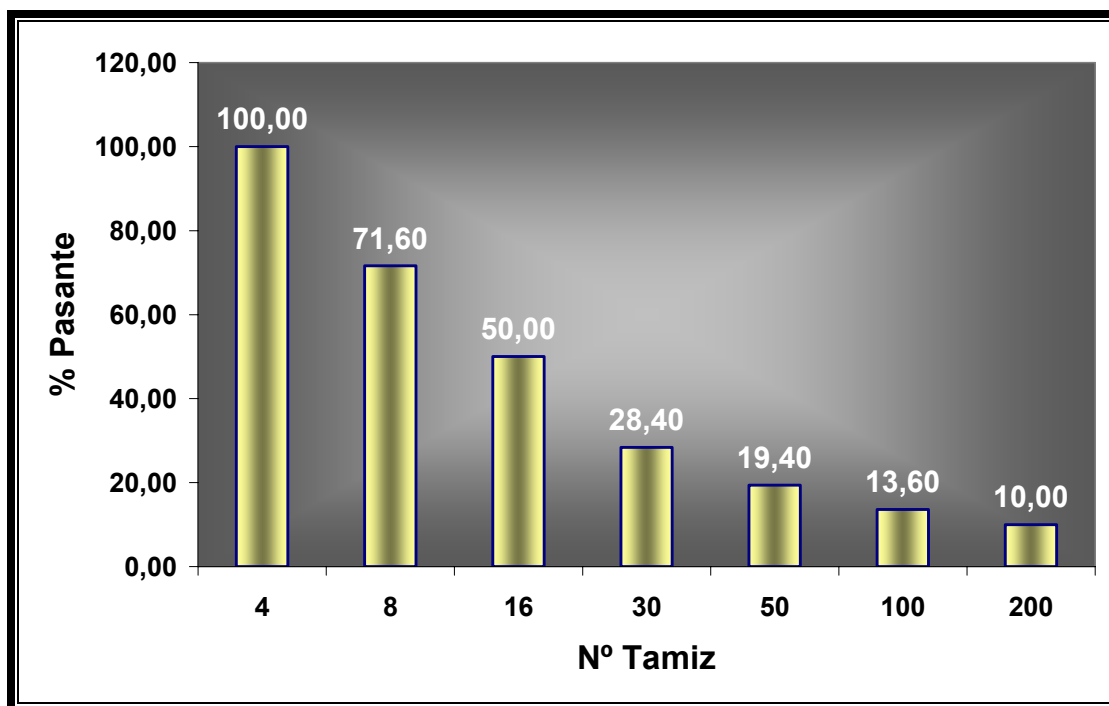


Figura 31. Análisis granulométrico de la roca proveniente de la cantera El Vegón C.A

Se pudo observar mediante la Figura 31, que la distribución granulométrica es aceptada según normativa A.S.T.M. E11 y que dicho material puede ser utilizado en obras civiles de pavimentación en tratamiento superficial.

Por su parte, el análisis petrográfico realizado a las secciones finas correspondiente a la Figura 32, se observó presencia de fósiles entre los cuales destacan de forma general los foraminíferos bentónicos, algas coralinas, gasterópodos entre otros. En la sección (a), a la izquierda se muestra un Ostrácodo y fragmento de equinodermo a la derecha; la sección (b) se observa alga roja y fragmentos de algas rojas, bivalvos y miliódus, en la sección (c). La composición es aproximadamente 30% de cemento calcáreo (esparita) y aproximadamente 10% de lodo calcáreo (micrita), algunos fósiles están rellenos de cemento (esparita) y el contenido de cuarzo esta por debajo de un 3%.

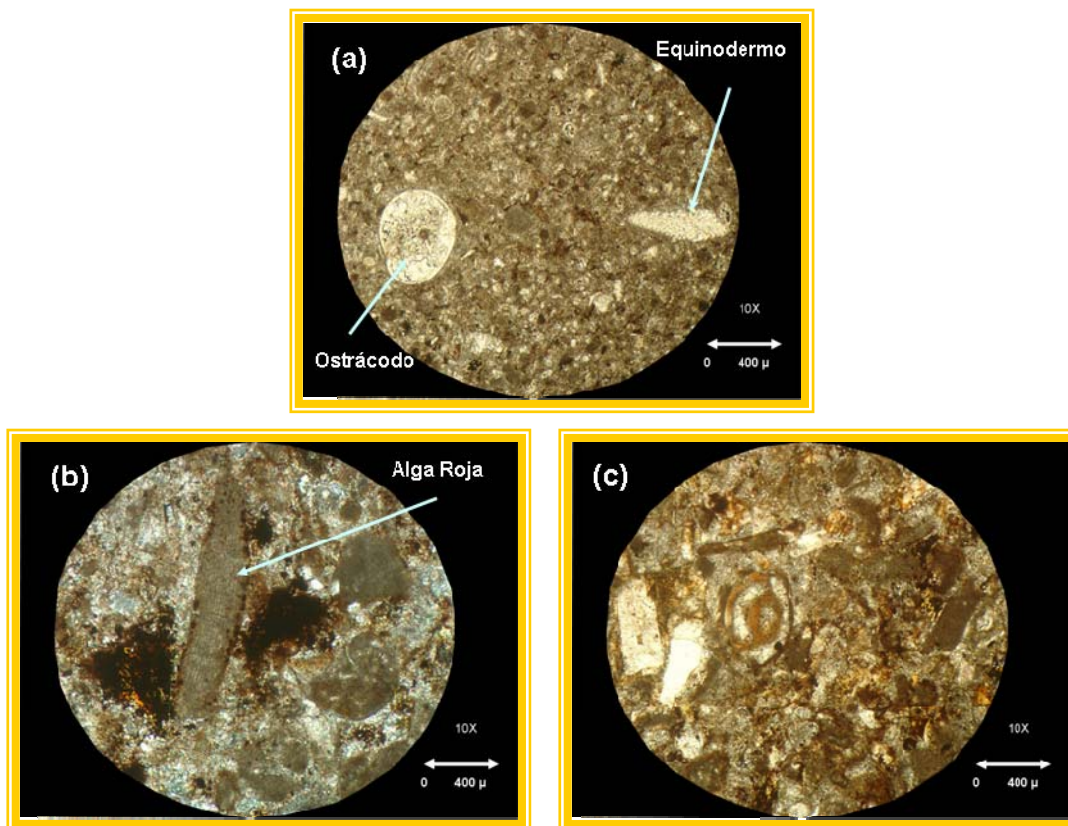


Figura 32. Imágenes fotográficas de las secciones finas en las rocas de la cantera El Vegón C.A

El análisis por Difracción de Rayos X, permitió verificar el alto contenido de facie mineral tipo calcita en esta roca, así mismo, se determinó una baja concentración de cuarzo y arcillas (montmorillonita, caolinita) el difractograma obtenido se presenta en el apéndice B.

El ensayo de pérdida al rojo (ver apéndice A) reportó un 40,08 % de CaCO_3 . Para realizar el análisis de la composición química, una vez obtenidas la muestra en solución y analizada por la técnica de ICP, fueron determinados los siguientes elementos. La Tabla 7 presenta los siete elementos determinados en forma de óxidos, donde se obtuvo alto porcentaje de CaO , esto confirma lo obtenido por el análisis petrográfico y la pérdida al rojo de una roca sedimentaria tipo caliza. También podemos observar alto contenido de SiO_2 y Al_2O_3 que pueden estar asociadas a fases mineralógicas de arcillas como caolinita y montmorillonita reportado por DRX.



Tabla 7. Composición química de las roca recolectada en la cantera El Vegón C.A (Edo. Aragua)

MUESTRA	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% MgO	% CaO	% Na ₂ O	% K ₂ O
Cal. – Veg.	48,27	6,38	0,85	0,92	43,26	0,15	0,17

Con lo antes señalado, este tipo de roca puede ser clasificada como una roca sedimentaria de tipo caliza con alto contenido de arcillas y clasificada según Dunham como Packstone (Méndez, 2004).

Muestra: Cal. – Emp.

La muestra Cal. – Emp., pertenece al grupo Villa de Cura, litológicamente es caracterizada por ser caliza maciza del Paleoceno superior – Eoceno inferior. La cantera explota aproximadamente unas 300 T/día. Esta muestra fue caracterizada mediante los análisis que seguidamente son descritos.

Análisis visual siguiendo las recomendaciones dada por A.S.T.M. D2488, indica que se trata de una roca de color gris claro - blanco, con textura muy fina y reacciona con el ácido clorhídrico. La forma de los granos son planas y presentan aproximadamente unas dimensiones de ancho < 10mm, largo entre 5 y 15mm, y espesor < 5mm. El análisis granulométrico no fue entregado por la cantera, sin embargo fue clasificado como un material tipo polvillo el cual presenta un contenido de arcilla aproximado < 0,5%.

Debido a que no se contaba con la distribución granulométrica, se realizó el ensayo según normativa A.S.T.M. E11. En la Figura 33 se visualiza el análisis granulométrico realizado en la planta de asfalto SECOFALCA, obteniendo una distribución bastante desigual y un % de pasante N° 200 de 0,80%.

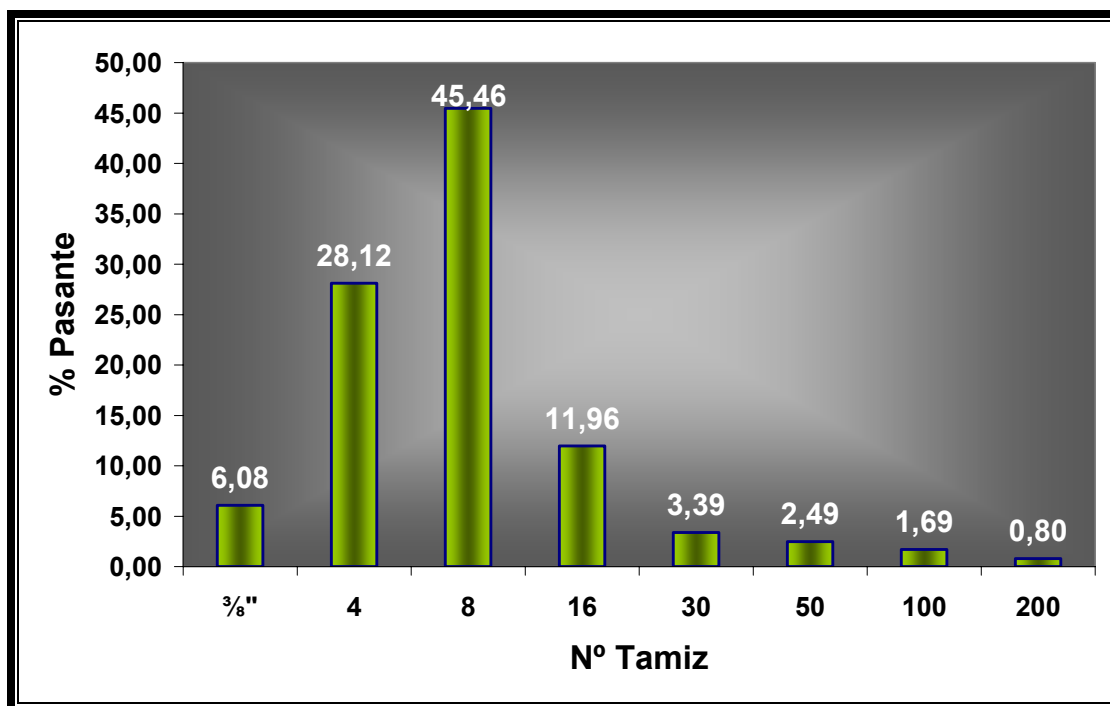


Figura 33. Análisis granulométrico de la roca proveniente de la cantera Empronacal C.A

Estos resultados obtenidos demuestran que el material no cumple con lo especificado en la norma para tratamiento superficial, esto puede ser debido a que la recolección del material en la cantera no fue representativo, a pesar que se realizó el muestreo lo mas heterogéneo posible en la pila de material.

Por su parte, el análisis petrográfico realizado a las secciones finas correspondiente a la Figura 34, permitió observar presencia de fósiles entre los cuales destacan de forma general foraminíferos bentónicos, algas coralinas, equinodermos y peloides, entre otros. En la sección (a) se observan algas rojas y verdes; sección (b) fragmentos esparitizados de bivalvos y ostrácodos, entre los cuales hay fragmentos de algas rojas. La composición es aproximadamente 35% de cemento calcáreo (esparita) y aproximadamente 15% de lodo calcáreo (micrita), algunos fósiles están rellenos de cemento (esparita). No se observó presencia de mineral de cuarzo.

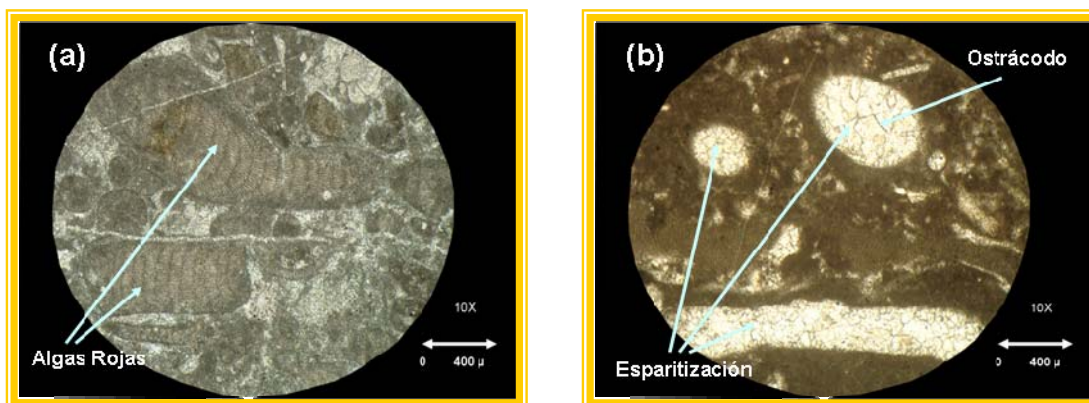


Figura 34. Imágenes fotográficas de las secciones finas en la roca de la cantera Empronacal C.A

El análisis por Difracción de Rayos X, permitió verificar el alto contenido de facie mineral tipo calcita en esta roca, así mismo, se determino una baja concentración de cuarzo y arcillas (montmorillonita, caolinita) el difractograma obtenido se presenta en el apéndice C.

El ensayo de perdida al rojo (ver apéndice A) reportó un 42,73 % de CaCO_3 . Para realizar el análisis de la composición química, una vez obtenidas la muestra en solución y analizada por la técnica de ICP, fueron determinados los siguientes elementos. La Tabla 8 presenta los siete elementos determinados en forma de óxidos, donde se obtuvo alto porcentaje de CaO, esto confirma lo obtenido por el análisis petrográfico y la perdida al rojo de una roca sedimentaria tipo caliza. También podemos observar alto contenido de SiO_2 y Al_2O_3 que pueden estar asociadas a fases mineralógicas de arcillas como caolinita y montmorillonita reportado por DRX.

Tabla 8. Composición química de la roca recolectada en la cantera Empronacal C.A

MUESTRA	% SiO_2	% Al_2O_3	% Fe_2O_3	% MgO	% CaO	% Na_2O	% K_2O
Cal. – Emp.	51,20	3,60	0,24	0,87	43,83	0,14	0,12

Con lo antes señalado, este tipo de roca sedimentaria puede ser clasificada como caliza con bajo contenido de arcilla y clasificada según Dunham de tipo Packstone – grainstone de peloides (Méndez, 2004).



Muestra: Cal. - CVG

La cantera se encuentra ubicada dentro de la formación Roblecito de edad Terciario correspondiente al Eoceno Tardío – Mioceno Temprano. La caliza que allí se explota y de donde fue captada la muestra Cal. – CVG, pertenece a la Formación Peñas Blancas de edad Terciario correspondiente al Eoceno Medio. Actualmente la cantera explota aproximadamente unas 30 T/día. Esta muestra fue caracterizada mediante los análisis que seguidamente son descritos.

Análisis visual siguiendo las recomendaciones dada por A.S.T.M. D2488, indica que se trata de una roca de color gris con ciertos aglomerados de coloración roja y blanca, la textura es fina, que reacciona con el ácido clorhídrico. La forma de los granos son planos, presentan aproximadamente unas dimensiones de ancho de 5 a 10mm, largo entre 10 y 20mm, y espesor entre 2 y 8mm. La Figura 35 visualiza el análisis granulométrico certificado por la cantera, donde es clasificado como un material tipo polvillo $\leq \frac{3}{8}$ pulgadas, con un porcentaje de pasantes N° 200 de 1,93 % y un contenido de arcilla aproximado de < 2%.

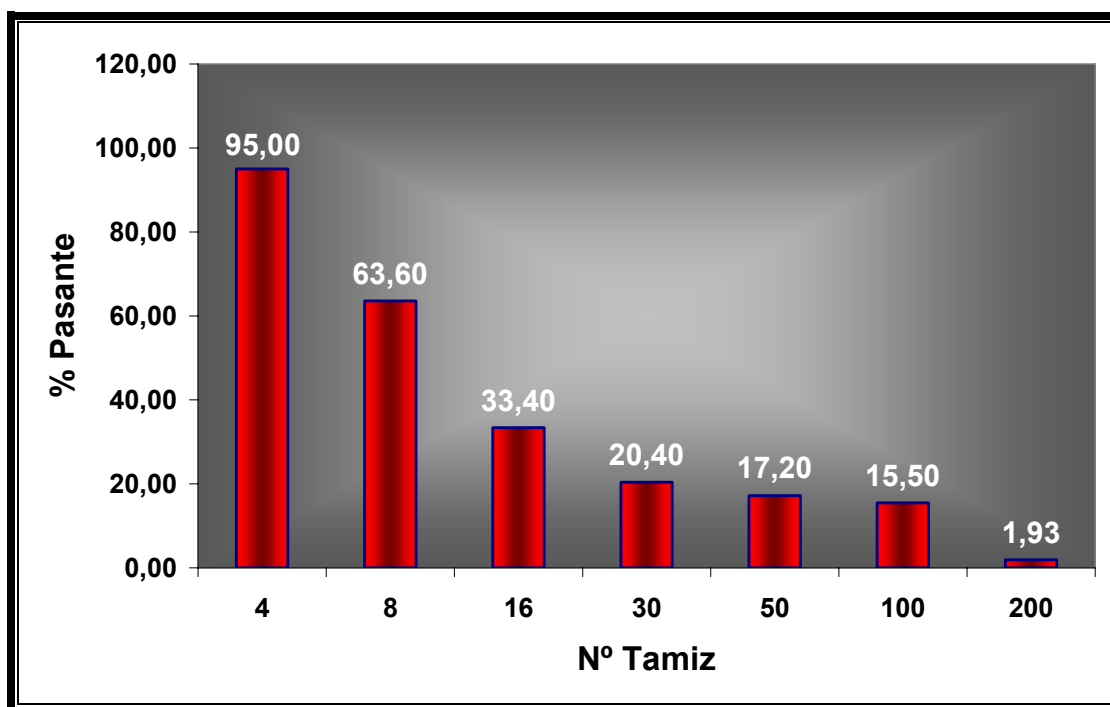


Figura 35. Análisis granulométrico de la roca proveniente de la cantera Conacal CVG



Estos resultados obtenidos demuestran que el material no cumple con lo especificado en la norma para tratamiento superficial, esto puede ser debido a que la recolección del material en la cantera no fue representativo, a pesar de que se realizó el muestreo lo más heterogéneo posible en la pila de material.

Por su parte, el análisis petrográfico realizado a las secciones finas correspondiente a la Figura 36, permitió observar presencia de fósiles entre los cuales destacan de forma general foraminíferos bentónicos, lepidosiclina, briozuarios, bivalvos muy desgastados, algas rojas, equinodermos, entre otros. La Figura 36 se observa diversos bioclastos con fragmentos grandes de bivalvos. La composición es aproximadamente 30% de cemento calcáreo (esparita) y aproximadamente 10% de lodo calcáreo (micrita), algunos fósiles están rellenos de cemento (esparita) y el contenido de cuarzo es <1%.



Figura 36. Imágenes fotográficas de las sección fina en la rocas de la cantera Conacal CVG

El análisis por Difracción de Rayos X, permitió verificar el alto contenido de facie mineral tipo calcita en esta roca, así mismo, se determinó una baja concentración de cuarzo y arcillas (montmorillonita, caolinita) el difractograma obtenido se presenta en el apéndice D.

El ensayo de pérdida al rojo (ver apéndice A) reportó un 40,25 % de CaCO_3 . Para realizar el análisis de la composición química, una vez obtenidas la muestra en solución y analizada por la técnica de ICP, fueron determinados los siguientes elementos. La Tabla 9 presenta los siete elementos determinados en forma de óxidos,



donde se obtuvo alto porcentaje de CaO, esto confirma lo obtenido por el análisis petrográfico y la pérdida al rojo de una roca sedimentaria tipo caliza. También podemos observar alto contenido de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ que pueden estar asociadas a fases mineralógicas de aluminosilicatos de arcillas y cementos ferruginosos pertenecientes a la formación Mesa.

Tabla 9. Composición química de la roca recolectada en la cantera Conacal CVG

MUESTRA	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% MgO	% CaO	% Na ₂ O	% K ₂ O
Cal. – CVG	44,46	5,51	1,40	0,66	47,65	0,15	0,18

Con lo antes señalado, este tipo de roca sedimentaria puede ser clasificada como caliza con alto contenido de hierro y clasificada según Dunham como tipo Packstone (Méndez, 2004).

Muestra: Gns. – Pal. S.

Las muestras Gns. – Pal. S. fueron captada dentro de la cantera, que actualmente explota un batolito del Complejo Imataca de edad Precámbrico Temprano, aproximadamente unos 3000 T/día. Esta muestra fue caracterizada mediante los análisis que seguidamente son descritos.

Análisis visual siguiendo las recomendaciones dada por A.S.T.M. D2488, indica que se trata de una mezcla de dos tipos de rocas. Donde un tipo de roca presenta una coloración de blanco a gris y otra de coloración negra. La textura es fanerítica y no presentan reacción antes el ácido clorhídrico. La forma de los granos son angulares y algunas alargadas, presentan aproximadamente unas dimensiones de ancho de 5 a 10mm, largo entre 10 y 20mm, y espesor < 5mm. La Figura 37 reporta el análisis granulométrico certificado por la cantera, como un material tipo arrocillo ≤ ½ pulgadas, con un porcentaje de pasantes N° 200 de 11,23 % y con un contenido de arcilla aproximado de < 1%.

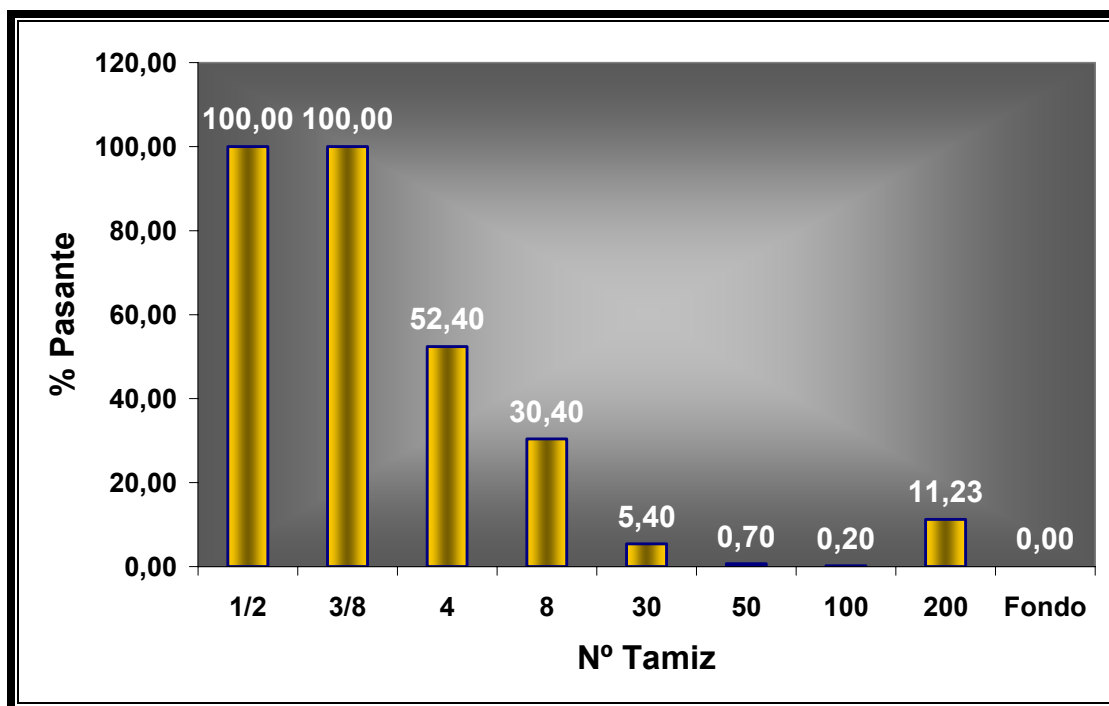


Figura 37. Análisis granulométrico de la mezcla de ambas rocas proveniente de la cantera Palma Sola C.A

Se pudo observar que la distribución granulométrica es aceptada según la norma (A.S.T.M. E11) y este tipo de material puede ser utilizado en tratamiento superficial.

El análisis petrográfico de las secciones finas obtenidas de los dos tipos de rocas, permitió señalar que los minerales presente en la roca de color claro son: cuarzo (30 - 40%), feldespatos - plagioclasa (30 – 35%), biotita (<10%) y otros (<5%). Mientras que los minerales presente en la roca de color oscura, presenta minerales del grupo de los anfíboles como actinolita, horblenda (60 – 70%), plagioclasa cálcica de tipo andesina An_{30-50} (10 – 20 %) y otros minerales de apatito y opacos (10%) La Figura 38 muestra los minerales presente en los dos tipos de rocas recolectada en la cantera, en donde la sección (a) se observa los minerales presente en la roca de color claro, mientras que en la sección (b) se observa los minerales presente en la roca de color oscuro, en donde se aprecia a la mica biotita orientada. Esto permite indicar esfuerzo compresivo ocurrido en la roca, que permiten la orientación de dicho mineral micaceo.

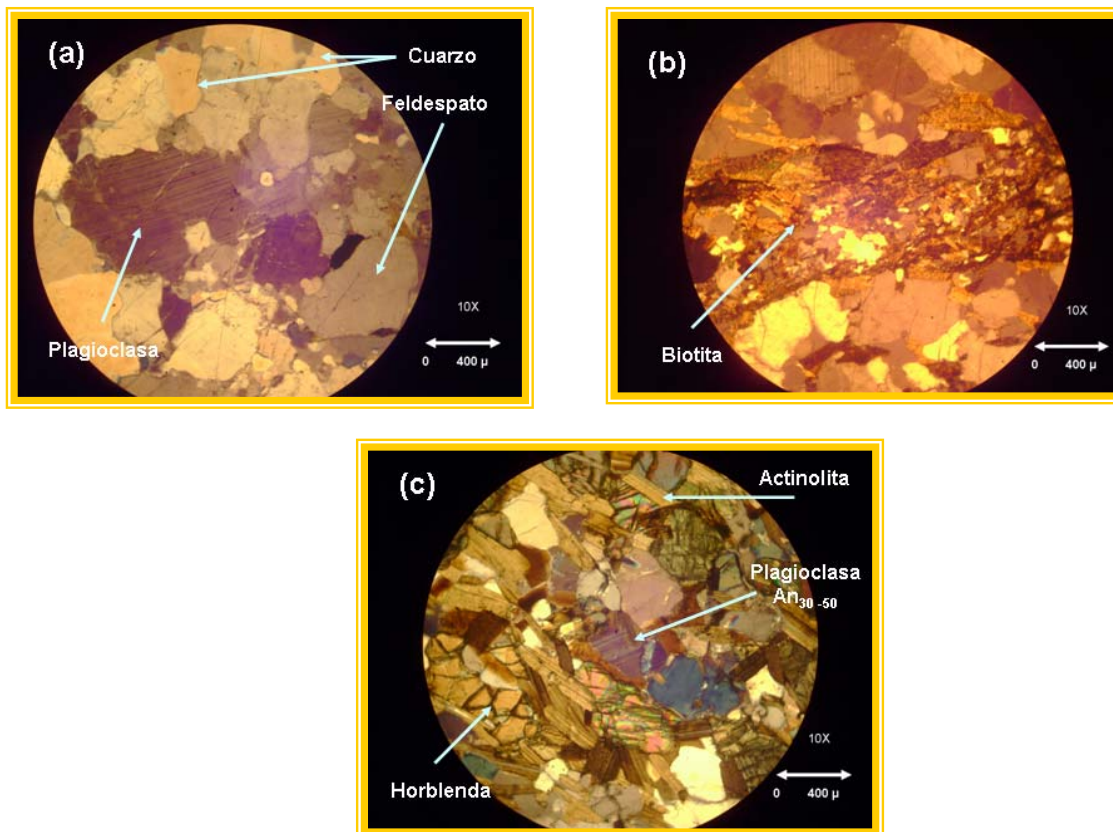


Figura 38. Imágenes fotográficas de las secciones finas en las rocas de la cantera Palma Sola

El análisis por Difracción de Rayos X, permitió verificar alto contenido de facies minerales tipo cuarzo, feldespatos (Microclino), plagioclasea (albita), Biotita y actinolita, en las dos rocas analizadas. El difractograma obtenido se presenta en el apéndice E.

Para realizar el análisis de la composición química, una vez obtenidas la muestra en solución y analizada por la técnica de ICP, fueron determinados los siguientes elementos. La Tabla 10 presenta los siete elementos determinados en forma de óxidos, donde se obtuvo la composición química para la mezcla de ambas rocas, donde podemos evidenciar que el alto contenido de óxido de Si da presencia a rocas tipo félsica, principalmente cuarzo. Los óxidos de Al, Na y K, están asociados a minerales de aluminosilicatos como plagioclasea (albita), feldespatos (microclino); mientras que los alto valores de óxido de Fe y Mg deben su presencia a minerales como anfíboles (actinolita, horblenda) y mica biotita; mientras que la concentración de óxido de Ca, se debe a la plagioclasea tipo cálcica (andesina) y al mineral fosfato tipo apatito observado



en el análisis petrográfico. Estos minerales ferrogmanesianos son comunes en rocas de tipo máfica.

Tabla 10. Composición química de la mezcla de ambas rocas recolectada en la cantera Palma Sola C.A. (Edo. Bolívar)

MUESTRA	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% MgO	% CaO	% Na ₂ O	% K ₂ O
Gns. – Pal. S.	68,85	13,75	7,65	1,82	2,41	2,75	2,77

Mediante el estudio realizado, estas rocas pueden ser clasificadas como rocas de tipo metamórficas. Donde la roca de color clara es un Gneis Cuarzo – feldespático – biotítico, proveniente de un protolito ígneo como un granito. Mientras que la roca oscura como una Anfibolita la cual su protolito es de origen ígneo máfico (basalto o gabro). Este tipo de roca anfibolita, están asociadas a un ambiente geológico de cinturones orogénicos de gran extensión, con un régimen de esfuerzos dinámicos que pueden generar varias fases de deformación. Llevándose a cabo procesos de compresión y calentamiento que van a controlar la presión y temperatura, probablemente pueden ser formadas en las partes más profundas de los pliegues montañosos y en un ambiente tectónico de bordes de placa convergente.

Muestra: Gns. – Los Andes

La muestra Gns. – Los Andes, no fue recolectada directamente en la cantera ya que el material se encontraba en el depósito del laboratorio de Aplicaciones Técnica FUN de la empresa Clariant Venezuela. No obstante, esta muestra fue caracterizada siguiendo una metodología similar a la aplicada en las muestras antes citadas, la cual es seguidamente descrita.

Análisis visual siguiendo las recomendaciones dada por A.S.T.M. D2488, indica que las rocas presentan una coloración de blanco a gris, de textura fanerítica y no presenta reacción antes el ácido clorhídrico. La forma de los granos son angulares y planas alargadas, presentan aproximadamente unas dimensiones de ancho de 5 y 8mm, largo entre 10 y 15mm y espesor <5mm. Debido a que no se contaba con la certificación y distribución granulométrica, pero si con la clasificación del material el cual es de tipo arrocillo $\leq \frac{1}{2}$ pulgadas se realizó el ensayo siguiendo la normativa A.S.T.M.



E11 en la planta de asfalto SECOFALCA. La Figura 39 visualiza el análisis granulométrico realizado a la muestra Gns. – Los Andes, donde se aprecia una distribución bastante desigual y un % de pasante N° 200 de 10,18 %.

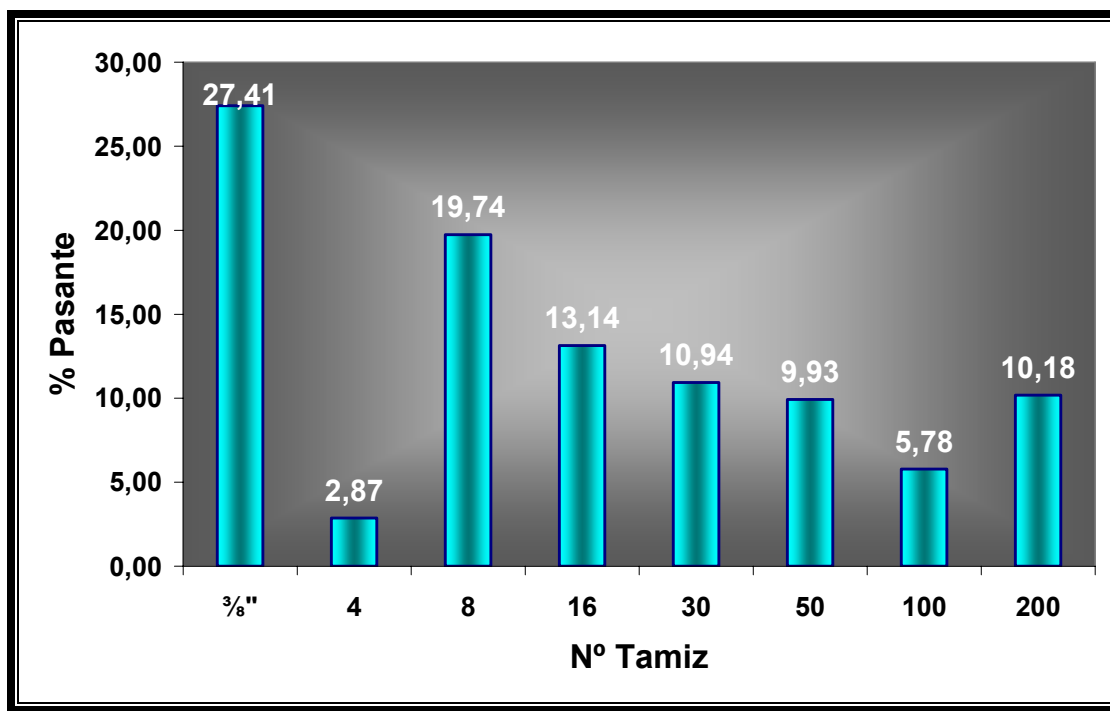


Figura 39. Análisis granulométrico de la roca proveniente de la cantera Los Andes.

Estos resultados obtenidos demuestran que el material no cumple con lo especificado en la norma para tratamiento superficial, esto puede ser debido a que la recolección del material en la cantera no fue representativo, a pesar que se realizó el muestreo lo mas heterogéneo posible en la pila de material.

El análisis petrográfico de las secciones finas realizadas para esta roca, indicó que los minerales presentes en la roca de color claro son: cuarzo (30 - 40%), plagioclasa (albita) (30 - 35%), moscovita (<10%) y otros (<5%). La Figura 40 presenta las imágenes captadas de los minerales presente en la roca, en donde la sección (a) se observan minerales de feldespato, plagioclasa y otros. Mientras que para la sección (b) se observa la moscovita alterada, esto puede ser producto de soluciones hidrotermales que sufrió la roca y por ende ocurre un proceso de clorotización en la mica.

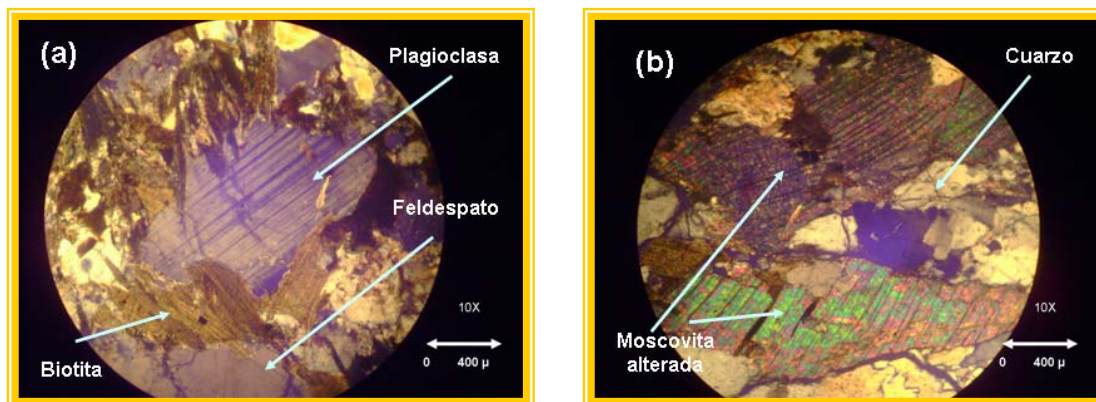


Figura 40. Imágenes fotográficas de las secciones finas en las rocas de la cantera Los Andes C.A

El análisis por Difracción de Rayos X, permitió verificar alto contenido de facie mineral tipo cuarzo, plagioclasa (albita), moscovita, biotita y clinocloro en la roca analizada. El difractograma obtenido se presenta en el apéndice F.

Para realizar el análisis de la composición química, una vez obtenidas la muestra en solución y analizada por la técnica de ICP, fueron determinados los siguientes elementos. La Tabla 11 presenta los siete elementos determinados en forma de óxidos, donde se obtuvo un valor alto de concentración de óxido de Si lo que representa a una roca tipo félsica donde el mineral predominante es cuarzo, el contenido de óxido de Al, Fe, Mg y K a minerales de aluminosilicatos como: moscovita, biotita y clinocloro; el contenido de óxido de Na al mineral de la plagioclasa tipo albita. Mientras que la concentración de óxido de Ca puede ser encontrado en algún mineral micáceo producto de la alteración de otro mineral como lo puede ser el reemplazo de iones Ca por iones Na en la estructura de la moscovita para obtener mineral micáceo tipo margarita, aunque no hay evidencia de presencia de este mineral en el análisis por DRX.

Tabla 11. Composición química de las roca de la cantera Los Andes C.A. (Edo. Mérida)

MUESTRA	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% MgO	% CaO	% Na ₂ O	% K ₂ O
Gns. – Los Andes	68,49	16,78	6,85	1,62	1,61	1,94	2,72

Mediante el estudio realizado, esta roca puede ser clasificada como roca de tipo metamórficas y de tipo Gneis Cuarzo – feldespático – moscovítico.



Muestra: Aren. - Falcón

Esta muestra fue recolectada en la cantera Falcón, ubicada en una zona en donde predominan rocas de la Formación Río Seco de edad Terciario (Plioceno). El lugar de donde extrae el material, está localizado a 8 Km de la cantera. La caracterización de esta muestra, involucró los análisis que se describen a continuación.

Análisis visual siguiendo las recomendaciones dada por A.S.T.M. D2488, no pudo ser realizado ya que el material utilizado es tipo gravas finas y arenas.

El cuanto al análisis granulométrico no fue entregado por la cantera, ya que para el momento de la recolección de la muestra, la maquina clasificadora se encontraba dañado. Sin embargo, el material recolectado es una mezcla entre piedra de $\frac{1}{2}$ pulgada, arrocillo y polvillo $\leq \frac{3}{8}$ pulgadas. Esto conllevó a realizar una separación a través de un tamiz N°7 (2.38mm), para de esta forma tener un material aproximadamente tipo polvillo, con cuyo material realizar las mezclas asfálticas.

A pesar que no se trabajó con la granulometría gruesa, es decir, la que no paso a través del tamiz N° 7, se realizó análisis petrográfico solo a una muestra la cual esferveció ante la presencia de HCl por ser un carbonato. La Figura 41 correspondiente a la sección (a), se observó presencia de fósiles entre los cuales destacan los foraminíferos bentónicos nummolites y en la sección (b) se observan fragmentos de algas rojas, rodeado de cemento de esparita.

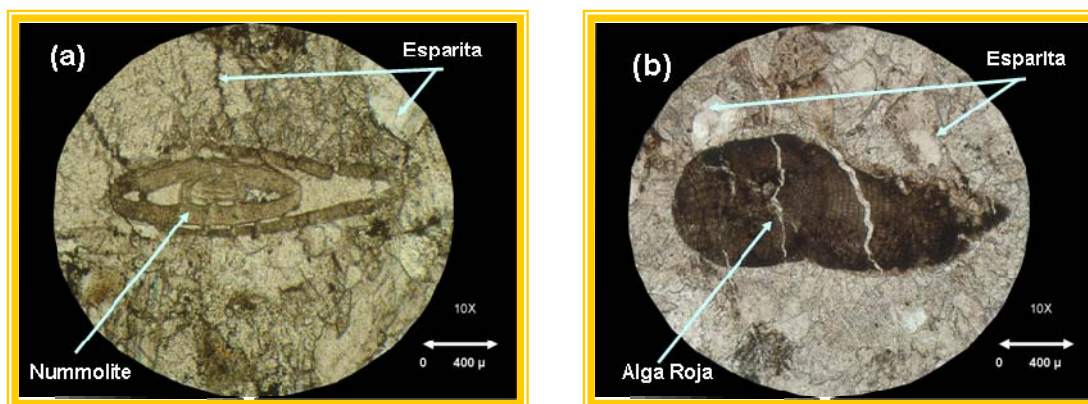


Figura 41. Imágenes fotográficas de las secciones finas en las rocas de la cantera Falcón



El análisis por Difracción de Rayos X, permitió verificar alto contenido de facie mineral tipo cuarzo y bajo contenido en minerales como plagioclasa (albita), calcita, moscovita y caolinita entre otros. El difractograma obtenido se presenta en el apéndice G.

Para realizar el análisis de la composición química, una vez obtenidas la muestra en solución y analizada por la técnica de ICP, fueron determinados los siguientes elementos. La Tabla 11 presenta los siete elementos determinados en forma de óxidos, donde se obtuvo un valor alto de concentración de óxido de Si corresponde a rocas de tipo sedimentarias como areniscas. El porcentaje de óxido de Al a minerales de aluminosilicatos como caolinita y alto porcentaje de óxido de Fe puede ser debido a bandeamientos de óxidos de hierro observados en las muestras. Mientras que el porcentaje de óxido de Ca, es debido a restos de rocas tipo calizas, las cuales presentan cemento (esparita) y concuerda con la muestra analizada en petrografía.

Tabla 12. Composición química de las rocas recolectada en la cantera Falcón. (Edo. Falcón)

MUESTRA	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% MgO	% CaO	% Na ₂ O	% K ₂ O
Aren. - Falcón	72,96	6,41	7,24	0,83	11,71	0,45	0,40

Por el estudio realizado de la mezcla de rocas pueden ser de tipo arenisca y la del estudio petrográfico a una caliza clasificada según Dunham como tipo Packestone (Méndez, 2004)

2 CARACTERIZACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS

2.1 Asfalto

En Venezuela se obtienen distintos tipos de asfalto (ver figura 4) a partir de la refinación del petróleo. Uno de los más utilizados por su dureza en la pavimentación de vías es el cemento asfáltico tipo A-20, este tipo de asfalto presenta grado de penetración 60/70 y clasificado como duro – semiduro; suministrado por la refinería Amuay a las plantas de asfalto. La Tabla 13 muestra algunas de las propiedades y/o



análisis que son realizados a este tipo de cemento asfáltico y entregado a través de un reporte de inspección de calidad realizado por la refinería.

Tabla 13. Caracterización del cemento asfáltico A-20 de dureza 60/70

ANÁLISIS	NORMA	VALORES	UNIDADES
Grav. Espec. 15,5°C (60°F)	ASTM D-70	1,026	Adimens.
Grav. Especifica 60/60°F	ASTM D-70	1,026	Adimens.
Grav. API 15,5°C (60°F)	ASTM D-1298/D-287	6,4	Grav. API
Penetración a 25°C	ASTM D-5	67	MM/10
Visc. Absoluta a 140°F/60°C	ASTM D-2171	2805	Poises
Visc. Cinemática a 275°F/135°C	ASTM D-2170	469,6692	CST
Pto. de Ablandamiento	ASTM D-36	48,2	Grad. C
Ductilidad a 25°C (77°F)	ASTM D-113	142,0	cm.
Pto. Inflamación CCA/MAN	ASTM D-92	280	GRAD C
Temp/Visc. Cin. 150 CST	ASTM D-2170	180,5	GRAD C
Temp/Visc. Cin. 190 CST	ASTM D-2170	174,2	GRAD C
Índice de Penetración		-0,78	Adimens.
Cambio de masa	ASTM D-1754	-0,10	Peso %
Visc. Abs. a 60°C DESP.	ASTM D-1754	5812	Poises
Ductilidad a 25°C DESP.	ASTM D-1754	115	cm
Reducción de penetración	ASTM D-1754	13	%

Una vez obtenida la fase oleica se procedió a realizar las emulsiones asfálticas a través de dos procesos. Para el proceso A se utilizó como equipo mezclador un Mixer; mientras que para el proceso B se empleó un Molino coloidal. Cada uno de sus resultados será explicado por separado, a fin de tener un mejor control sobre cada uno de los procesos.



2.2 Proceso A: empleando un Mixer

2.2.1 Selección de los surfactantes:

Los surfactantes a ser evaluados en el proceso A, provienen de la línea Emulsiv® de la empresa Clariant Venezuela, donde algunos de ellos son puro o mezclas de surfactantes. Estos son de tipo catiónico y su estructura química presentan distintas cadenas alquílicas, a fin de verificar si esta diferencia pudieran evidenciar algún cambio en la formación de la emulsión o en las propiedades de adhesividad en las mezclas asfálticas. La Tabla 14 presenta una breve descripción de la composición de los productos o surfactante a ser evaluados en las emulsiones y mezclas asfálticas.

Tabla 14. Mezcla de surfactantes a ser evaluados en las emulsiones asfálticas.

NOMENCLATURA	NOMBRE COMERCIAL	COMPOSICIÓN
S 1	Emulsiv® 196/95 + Genamin® TAP100	Mezcla derivado de lignina más diamina.
S 14	Emulsiv® 196/07 + Genamin® TAP100	Mezcla derivado de lignina más diamina (más diluido que S1).
S 2	Emulsiv® M375	Diamina.
S 3	Emulsiv® M1785	Mezcla derivado de lignina más dialquil amina.
S 4	Emulsiv® M475	Mezcla derivado de lignina más alquil amina.
S 7	Emulsiv® M175	Mezcla derivado de lignina más alquil amido amina.
S 10	Emulsiv® M515	Mezcla de diamina con alquil amina.
S 13	Emulsiv® M325	Mezcla de diamina con dialquil amina

Una vez seleccionados los surfactantes para realizar las emulsiones asfálticas empleando un Mixer (proceso A), se procedió a realizar en dos fases, a saber: la fase I para evaluar el comportamiento de los distintos surfactantes y estabilidad de la emulsión, así como el descarte de algunas mezclas asfálticas. Mientras que la fase II, permitió evaluar aquellos surfactantes seleccionados de la fase I, donde se debe modificar condiciones como: dosis del surfactante para mejorar la estabilidad de la emulsión, así como el % agua de premezcla para mejorar cubrimiento en las mezclas



asfálticas. A continuación se presentan los resultados obtenidos de cada uno de las fases y evaluaciones realizadas.

2.2.2 Fase I:

2.2.2.1 Emulsiones asfálticas:

Para esta primera evaluación fueron seleccionados 12 surfactantes (S1 hasta S12) presente en la Tabla 6, cinco de rompimiento lento (RL) y siete de rompimiento rápido (RR). Los resultados obtenidos de esta primera evaluación en cuanto al comportamiento de cada uno de los surfactantes utilizados en las emulsiones asfálticas son reportados en la Tabla 15, donde se muestran los valores obtenidos de las propiedades y ensayos realizados en las emulsiones asfálticas (ver apéndice H).

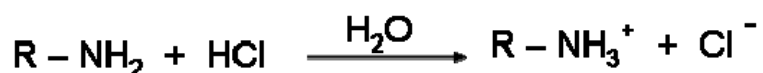


Tabla 15. Evaluación y ensayos de las emulsiones asfálticas primera evaluación

Surfactantes	Dosis %	Carga	Ruptura	Coloración	pH	HCl (g)	%Retenido	%Residuo	%Sedimentación
Emulsió 18806 + Genamin® TAP 100	1.3 x 0.2	(+)	RL	Marrón	1.66	0.61	1.40	81.98	0.60
Emulsió M375	0.9	(+)	RR	Incoloro	1.93	0.50	9.36	62.20	14.80
Emulsió M1785	1.0	(+)	RL	Marrón	1.96	0.12	10.19	62.30	28.00
Emulsió M475	0.9	(+)	RR	Marrón	2.00	0.23	11.05	63.40	28.67
Emulsió M475 + Genamin® TAP 100	0.9 x 0.2	(+)	RR	Marrón	1.92	0.59	13.70	62.40	32.26
Emulsió M475 + Genamin® TP4A	0.9 x 0.2	(+)	RR	Marrón	1.99	0.75	16.36	59.44	30.00
Emulsió M175	0.9	(+)	RL	Marrón	2.10	0.40	1.35	62.37	20.63
Emulsió M175 + Genamin® TAP 100	0.9 x 0.2	(+)	RL	Marrón	1.94	0.39	11.15	84.17	30.00
Emulsió M175 + Genamin® TP4A	0.9 x 0.2	(+)	RL	Marrón	1.97	0.30	35.35	81.63	43.75
Emulsió M516	0.8	(+)	RR	Incoloro	1.85	0.45	8.07	60.20	30.00
Emulsió M516 + Genamin® TAP 100	0.8 x 0.2	(+)	RR	Incoloro	1.97	0.71	11.69	60.71	32.26
Emulsió M516 + Genamin® TP4A	0.8 x 0.2	(+)	RR	Incoloro	1.97	0.05	23.81	81.26	28.03



Puede observarse en la Tabla 15, que la coloración de la fase acuosa varia dependiendo de la composición presente en los surfactante. Aquellos que poseen una coloración marrón en la fase acuosa, presentan compuestos de tipo lignina; mientras que aquellos donde la fase acuosa es incolora, no poseen este compuesto. La concentración de HCl utilizado permite acidificar la fase hasta un pH que oscila entre 1,8 – 2,1, observando que la cantidad agregada es mayor para aquellas mezclas de surfactantes donde se incrementan los grupos aminos. Estos grupos necesitan mucho más ácido para protonar los grupos presentes, puede ser visualizado a través de la siguiente ecuación:



Por su parte, el porcentaje de retenido obtenido (Tabla 15), esta dentro de la relación utilizada, ya que fue de 60% de asfalto en la emulsión asfáltica evaluadas. El menor valor obtenido fue 59,44%, que puede ser atribuido a la perdida de asfalto al momento de aplicar la técnica. Mientras que el mayor valor fue 64,17%, indicando que aún puede haber quedado retenido dentro del sistema agua proveniente de la fase acuosa.

Para un mejor entendimiento del % retenido y % sedimentación, son utilizadas las Figuras 42 y 43, mostradas a continuación.

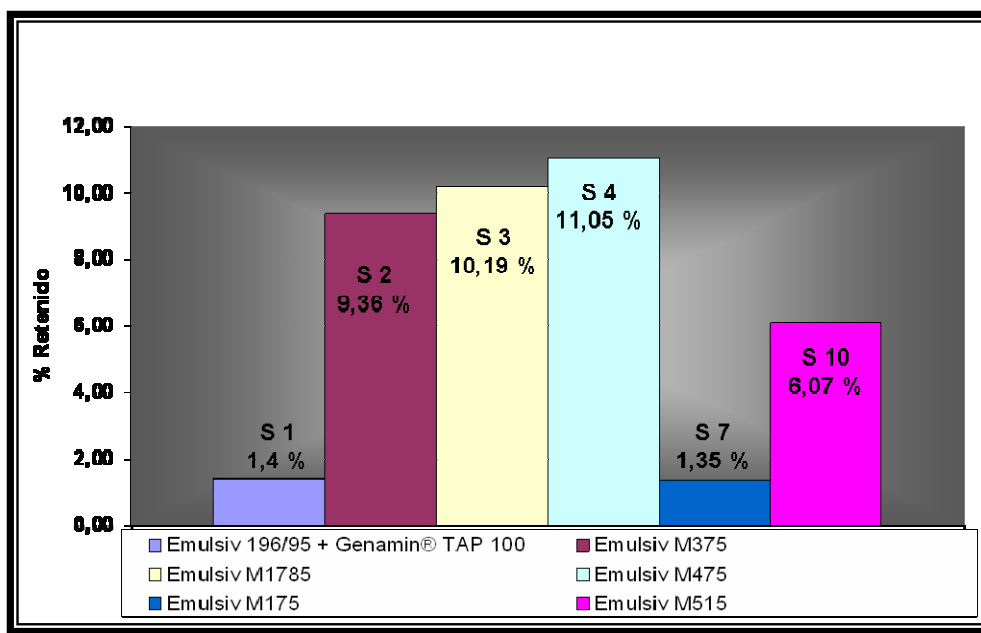


Figura 42. Ensayo del % Retenido de las emulsiones asfálticas, en los surfactantes puros evaluados.



La Figura 42 puede observarse la distribución del % retenido utilizando tamiz N°30, para cada uno de los surfactantes puros evaluados en las emulsiones asfálticas. Los % obtenidos son altos y no cumplen con lo establecido por la norma 0,1 % en tamiz N°20. De igual forma puede indicarse que las emulsiones asfálticas obtenidas con el Mixer no logran obtener un tamaño de gotas finas de asfalto; por ello puede señalarse que se está en presencia de emulsiones asfálticas inestables.

Por su parte la Figura 43 están representados los grupos de Emulsiv® M475 (a), Emulsiv® M175 (b) y Emulsiv® M515 (c) donde se trato de incrementar la carga positiva a los glóbulos de asfalto, agregándole surfactantes como el Genamin® TAP100 (diamina) y Genamin® TP4A (tetramina), a las emulsiones evaluadas.

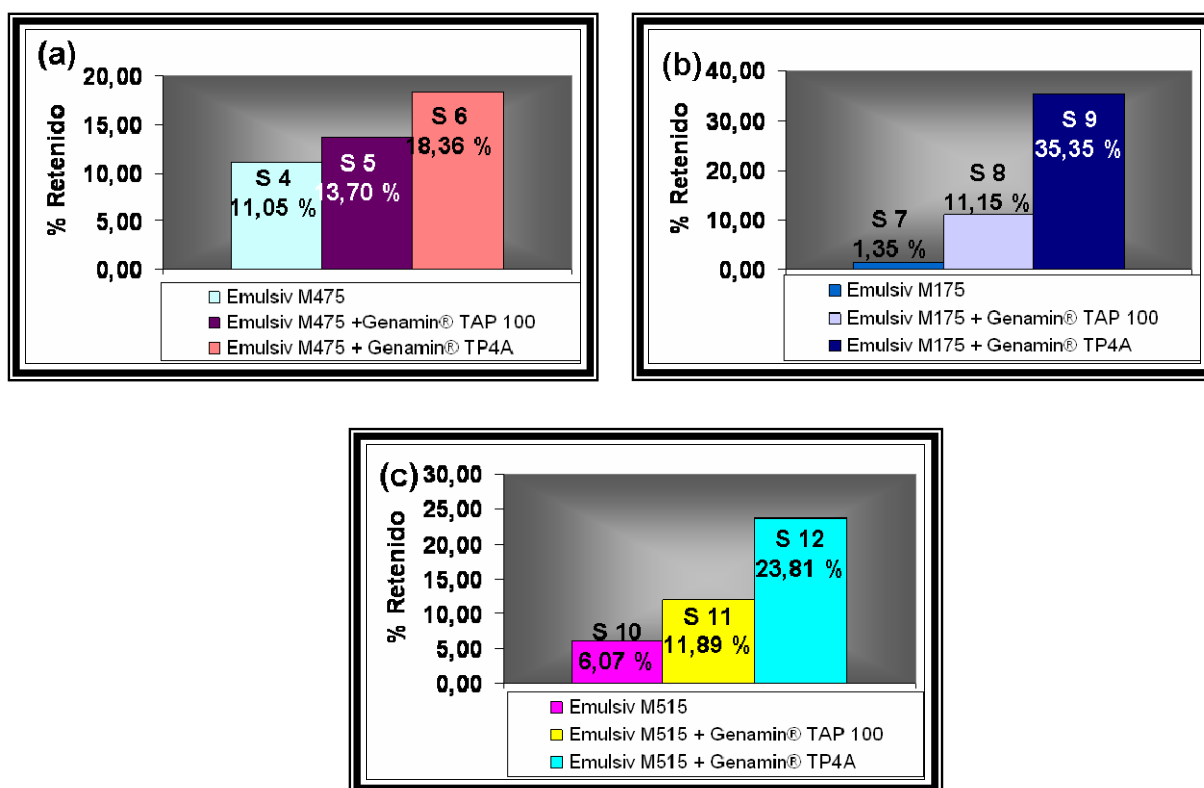


Figura 43. Ensayo del % Retenido de las emulsiones asfálticas de mezclas de surfactantes evaluados incrementando grupos aminos

Obsérvese que de la Figura 43, podemos indicar que la tendencia entre los tres grupos es de forma ascendente, donde los grupos (a) y (c) son de ruptura rápida y entre su mezcla están presente grupos de alquil amina, por lo que el comportamiento es muy



parecido. No obstante, el grupo (c) de ruptura lenta, presenta grupo de alquil amido amina, por ende su comportamiento es bastante diferente con respecto a los otros dos.

Podemos indicar, que el aumento progresivo de carga en la emulsión permitió un incremento del % retenido, lo que indica que debe estar ocurriendo un proceso de atracción, es decir, coalescencia entre las gotas de asfalto. Este proceso de atracción entre las gotas, puede ser debido a que no hubo un recubrimiento efectivo de los surfactantes entre los glóbulos de asfalto y por lo tanto alguno de ellos puede estar actuando como cosurfactantes.

El % retenido también se ve reflejado en el incremento del % sedimentación, el cual también es bastante alto comparado con el valor de la norma (< 5%), La Figura 44 muestra una relación existente entre el % retenido y el % sedimentación para los surfactantes puros evaluados en las emulsiones asfálticas.

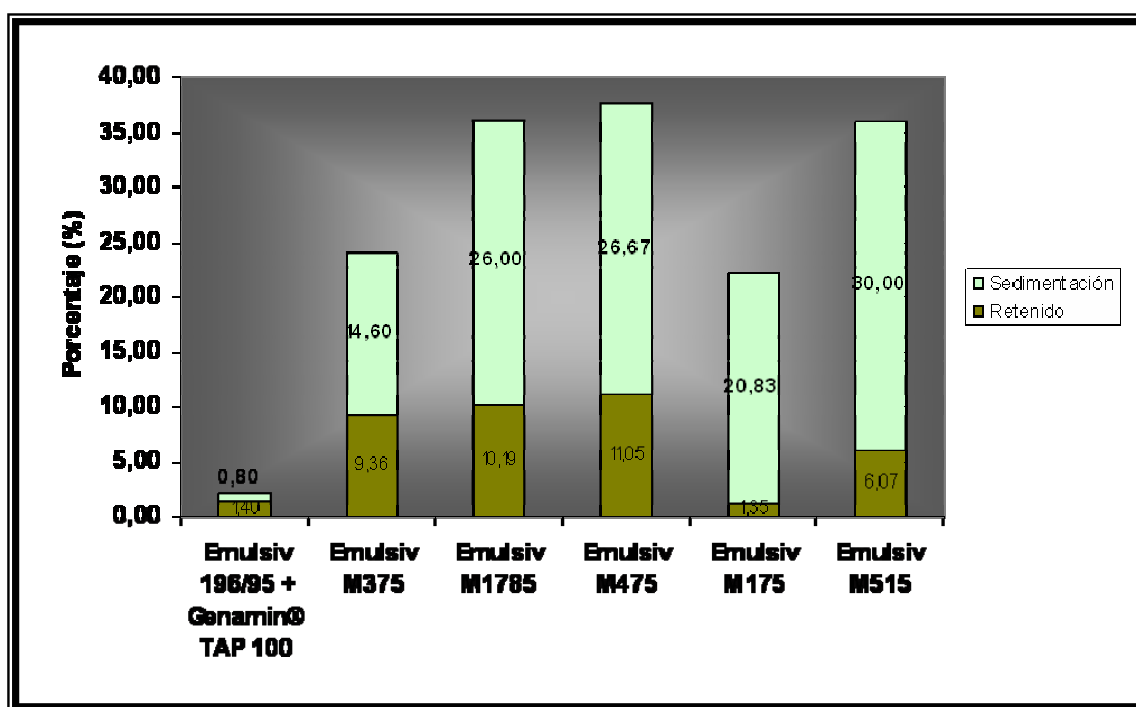


Figura 44. Comparación entre el % Retenido y el % Sedimentación de las emulsiones asfálticas de surfactantes puros

El incremento en el % sedimentación es indicio que se está en presencia de emulsiones asfálticas inestables, a consecuencia de que al transcurrir el tiempo conlleva a la separación de ambas fases. Esta separación puede deberse al proceso de



coalescencia entre las gotas de asfalto, estas son de gran tamaño por lo que la fuerza de interacción entre el asfalto y el surfactante puede ser débil. Esto permite indicar que debido a la dimensiones de los glóbulos de asfalto, pudo haber quedado espacios entre las moléculas de los surfactantes, permitiendo la unión y posterior incremento de las gotas de asfalto. Así mismo, la Figura 44 permite observar que a menor % retenido menor % sedimentación o viceversa. Entre los surfactantes evaluados el que presentó menor valor fue el Emulsiv® 196/95 + Genamin® TAP100 y el de mayor valor fue el Emulsiv® M475.

La Figura 45 presenta por separado la relación existente entre el % retenido y % sedimentación, para las mezclas de surfactantes en cada uno de los grupos donde se incrementó la carga positiva en la emulsión asfáltica.

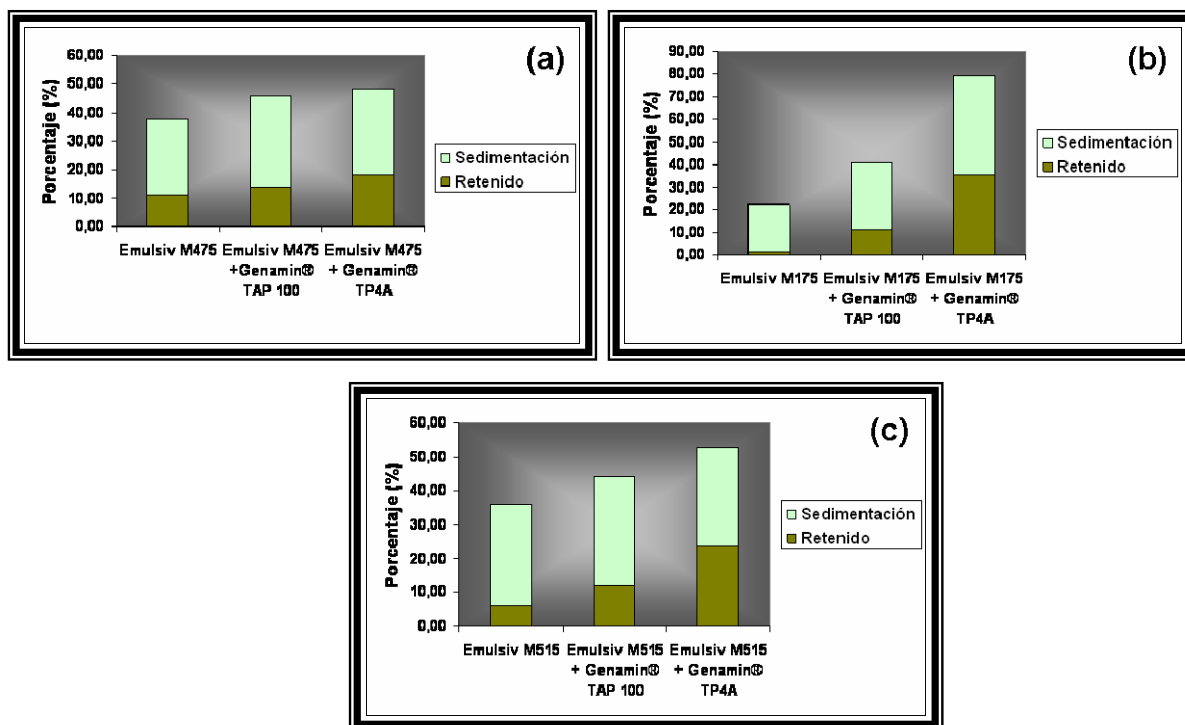


Figura 45. Comparación entre el % Retenido y el % Sedimentación de las emulsiones asfálticas en mezclas de surfactantes

Nótese que los tres grupos (a), (b) y (c) presentan una tendencia ascendente, que está relacionada con el incremento observado en el % retenido. Razón por lo cual al incrementar el % retenido también incrementa el % sedimentación, debido a que a mayor tamaño de los glóbulos de asfalto mayor coalescencia entre las gotas de asfalto.



El proceso de coalescencia representado en la Figura 46, ocurre cuando dos o más gotas (a) se unen para formar otra gota de mayor tamaño. Esto ocurre debido a que la capa de surfactante que rodea la gota (b) sufre un deterioro y no rodea completamente a la gota permitiendo que se rompa la repulsión entre ellas y se forme una gota de mayor tamaño (c), lo que conlleva a la separación de fases (Salager, 1991).

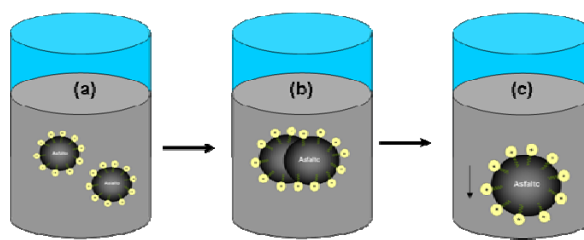


Figura 46. Proceso de coalescencia que puede ocurrir en las emulsiones asfálticas

2.2.2.2 Mezclas asfálticas (Método I):

Una vez obtenidas las emulsiones asfálticas a partir del proceso A, se procedió a realizar las mezclas asfálticas con solo tres (3) tipos de rocas, obteniéndose un total de 36 muestras. Cada una de ellas les fue evaluada el cubrimiento, la cohesión y la adhesión de forma cualitativa.

La Tabla 16 presenta las condiciones a modificar en las emulsiones asfálticas obtenidas durante la fase I. En la misma puede observarse que de las 36 muestras evaluadas solo 10 muestras de mezclas asfálticas presentaron buen cubrimiento, cohesión y adhesión. Esta evaluación también permitió el descarte de la muestra Aren. – Falcón, la cual no obtuvo buen comportamiento de cubrimiento, cohesión y adhesión para ninguno de los surfactantes evaluados. Debido a que la muestra es tipo arena, compuesta mayoritariamente por cuarzo y cuya carga superficial neta es neutra, lo que no permite que ocurra una buena interacción con la emulsión asfáltica catiónica. Además, no es capaz de hidrolizarse al entrar en contacto con la emulsión por ser un mineral resistente a los agentes exógenos. La Figura 47 se visualiza la imagen fotográfica del mal cubrimiento de la mezcla asfáltica, obtenida al interaccionar la emulsión asfáltica con el tipo de muestra Aren. – Falcón.



Figura 47. Mezcla asfáltica de la muestra Aren. – Falcón de la cantera Falcón.



Tabla 16. Modificaciones a realizar para mejorar el ensayo de cubrimiento, adhesión y cohesión en las mezclas asfálticas de la primera evaluación.

Surfactantes	Dosis %	Carga	Ruptura	Cal. - Veg.	Gns. - Pal.S.	Aren. - Falcón
Emulsió 198.85 + Genamin® TAP 100	1.3 y 0.2	(+)	RL	> H ₂ O	> H ₂ O	
Emulsió M976	0.8	(+)	RR	> H ₂ O .(1.1 y 1.3%)		
Emulsió M1786	1.0	(+)	RL	> H ₂ O .(1.2%)	> H ₂ O .(1.2%)	
Emulsió M476	0.8	(+)	RR	> H ₂ O .(1.1 y 1.3%)	> H ₂ O .(1.1 y 1.3%)	
Emulsió M476 + Genamin® TAP 100	0.8 y 0.2	(+)	RR			
Emulsió M476 + Genamin® TP4A	0.8 y 0.2	(+)	RR			
Emulsió M176	0.8	(+)	RL	> H ₂ O .(1.1 y 1.3%)	> H ₂ O .(1.1 y 1.3%)	
Emulsió M176 + Genamin® TAP 100	0.8 y 0.2	(+)	RL			
Emulsió M176 + Genamin® TP4A	0.8 y 0.2	(+)	RL			
Emulsió M616	0.8	(+)	RR	> H ₂ O .(1.1 y 1.3%)		
Emulsió M616 + Genamin® TAP 100	0.8 y 0.2	(+)	RR			
Emulsió M616 + Genamin® TP4A	0.8 y 0.2	(+)	RR			

Leyenda:

- El >H₂O, representa que debe aumentarse del contenido de agua de premezcla en la mezclas asfáltica a ser evaluadas en la fase II.
- Los número entre paréntesis, representa el aumento de la dosis del surfactante.
- Los  representan muestras con mal comportamiento.



Por su parte, las muestras Cal. – Veg. y Gns. – Pal. S. si obtuvieron buen comportamiento de cubrimiento, cohesión y adhesión, al interaccionar con los distintos surfactantes puros. Sin embargo en algunos casos se debe incrementar el % de agua de premezcla (ver apéndice I), como la dosis del surfactante para ser evaluadas en la fase II.

Mientras aquellos surfactantes donde se trató de aumentar la carga positiva en la emulsión, agregándoles grupos aminos como el Genamin® TAP100 (diamina) y Genamin® TP4A (tetramina), fueron obtenidos malos resultados. Esto puede señalarse debido a que se observó en las mezclas asfálticas, glóbulos de asfalto en la superficie de los minerales lo que indica un rompimiento prematuro de la emulsión al entrar en contacto con la roca.

El rompimiento prematuro antes señalado, puede ser debido a que los grupos Emulsiv M475, M175 y M515, presentan surfactantes de tipo alquil amina y alquil amido amina (anfótero), que al combinarse con grupos diamina o tetramina se pueden estar generando cargas negativas. Estas cargas negativas se pueden estar generando debido a los surfactantes anfótero presentes, conllevando a un proceso de neutralización de la carga de la emulsión permitiendo que no ocurra interacción con los sitios activos (cargas negativas) presente en los minerales de las rocas.

2.2.3 Fase II

Para la fase II, se evaluaron los surfactantes seleccionados de la fase I, donde se deben modificar las condiciones como: dosis del surfactante para algunos casos y el % agua de premezcla en las mezclas asfálticas. A continuación se presentan los resultados obtenidos de esta fase y las evaluaciones realizadas.

2.2.3.1 Emulsiones asfálticas:

Para la segunda evaluación fueron descartados seis (6) tipos de surfactantes Emulsiv® M475, M175 y M515, junto a sus combinaciones con Genamin® TAP100 (diamina) o Genamin® TP4A (tetramina). Igualmente se excluyó a la roca Aren. – Falcón.

Para esta evaluación fueron finalmente tomados ocho (8) surfactantes, seis (6) previamente evaluados en la fase I y agregados dos (2) nuevos tipos de surfactantes el



Emulsiv® 196/07 + Genamin® TAP100 y el Emulsiv® M325; destacándose entre ellos, cuatro de rompimiento lento (RL) y cuatro de rompimiento rápido (RR). También se tomó en cuenta las modificaciones del % de agua de premezcla óptimo, así como el incremento en algunos casos de la dosis del surfactante en las emulsiones asfálticas. La Tabla 17 muestran los resultados obtenidos de los ensayos realizados a cada una de las emulsiones asfálticas para esta segunda evaluación.

Tabla 17. Evaluación y ensayos de las emulsiones asfálticas para la segunda evaluación.

Surfactantes	Dosis %	Carga	Ruptura	Fase acuosa	pH	HCl (g)	% Retenido	% Residuo	% Sedimentación
Emulsiv 196/06 + Genamin® TAP 100	1.3 y 0.2	(+)	RL	Medio	1.86	0.67	2.23	64.60	8.80
Emulsiv 196/07 + Genamin® TAP 100	1.3 y 0.2	(+)	RL	Medio	1.86	0.61	10.49	67.60	31.00
Emulsiv M325	1.1	(+)	RR	Incólido	1.88	0.72	2.32	61.20	22.30
Emulsiv M1795	1.2	(+)	RL	Medio	1.88	0.18	2.00	60.60	22.30
Emulsiv M176	0.9	(+)	RR	Medio	1.89	0.41	1.69	62.80	24.20
Emulsiv M176	0.9	(+)	RL	Medio	1.89	0.39	0.69	62.40	20.70
Emulsiv M316	0.9	(+)	RR	Incólido	1.86	0.41	4.66	61.80	22.00
Emulsiv M326	0.9	(+)	RR	Incólido	1.89	0.69	24.69	69.00	30.00



En la tabla antes expuesta puede observarse que los surfactantes evaluados en las emulsiones asfálticas el pH estuvo controlado entre 1,88 – 1,98. La cantidad de ácido suministrada para protonar los grupos aminos estuvo entre 0,16 y 0,72 g. El menor valor del % residuo fue para el Emulsiv® M375 de 57,60 %, indicando que ocurrió pérdida de asfalto al aplicar la técnica; mientras que el mayor valor fue para Emulsiv® 196/95 + Genamin® TAP100 de 64,50 %, apuntando a que pudo haber quedado agua absorbida en el asfalto ya que el porcentaje utilizado en la emulsión fue de aproximadamente 60 %.

El % retenido fue obtenido utilizando un tamiz N° 18, no obstante que a pesar que no es el establecido por la norma (tamiz N°20), de igual forma fue utilizado para obtener el % retenido. La Figura 48 presenta el % retenido obtenido para cada una de las emulsiones evaluadas.

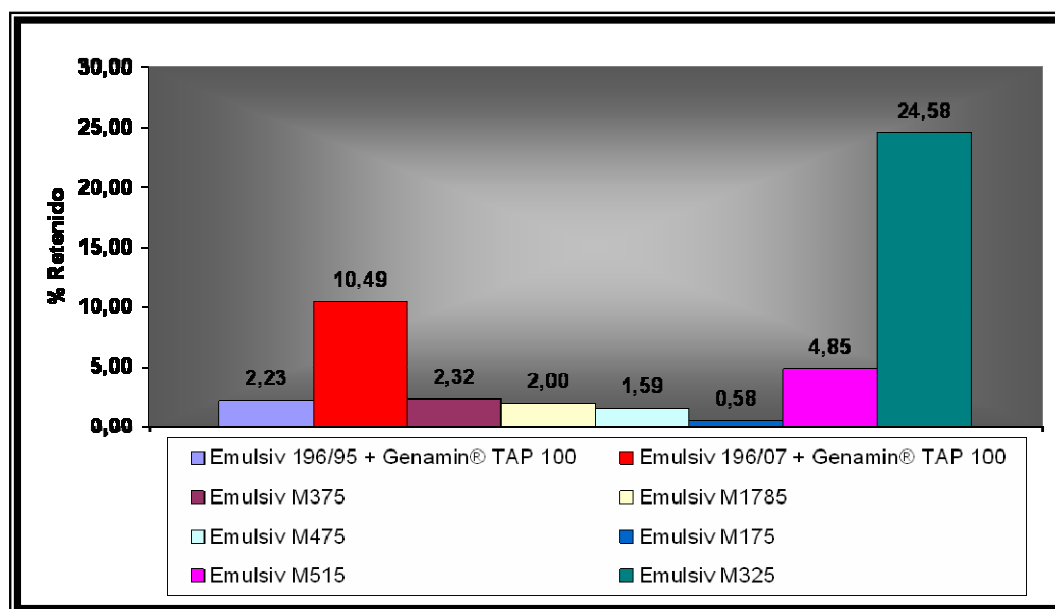


Figura 48. Ensayo del % Retenido de las emulsiones asfálticas en cada uno de los surfactantes utilizados

Podemos indicar, de la figura antes expuesta que el menor valor del % retenido fue para la emulsión asfáltica del surfactante Emulsiv® M175 (0,58 %) de rompimiento lento (RL), mientras que el mayor valor fue para la emulsión del Emulsiv® M325 (24,58 %) de rompimiento rápido (RR). Estos % retenidos indican que el tamaño de las gotas obtenidas con el Mixer para esta segunda evaluación son mas pequeñas comparadas



con las obtenidas en la primera evaluación. También se pudo observar que al aumentar la dosis del surfactante en algunos casos disminuye el % retenido, observándose en el Emulsiv® M1785 y Emulsiv® M375. La Figura 49 muestra la relación existente entre el % retenido y el % sedimentación para cada uno de los surfactantes evaluados en la fase II.

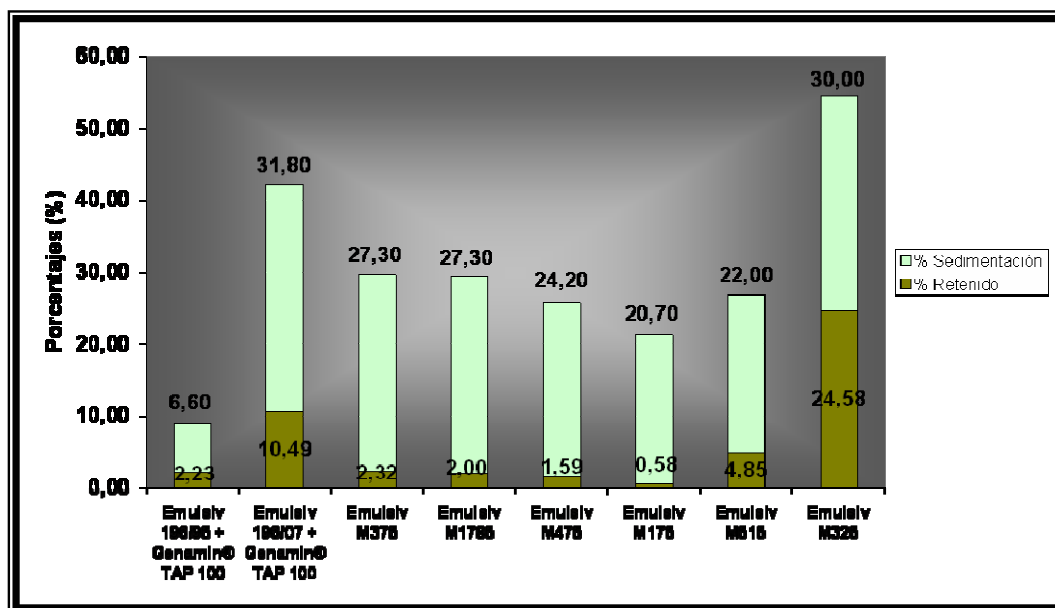


Figura 49. Comparación entre el % Retenido y el % Sedimentación de las emulsiones asfálticas.

De la figura antes expuesta, puede extraerse la existencia de la relación entre el % retenido y el % sedimentación. Esto permite observar que estamos en presencia de emulsiones asfálticas inestables, por lo que al transcurrir el tiempo se observa que se incrementa el % sedimentación. De los resultados obtenidos el menor valor fue para el Emulsiv® 196/95 + Genamin® TAP100 (6,60 %) y el mayor valor para el Emulsiv® 196/07 + Genamin® TAP100 (31,80 %). Esto es indicativo que al transcurrir el tiempo se incrementa la separación de las fases y por ende la sedimentación, lo cual debe estar ocurriendo un proceso de coalescencia entre las gotas de asfalto.

Para confirmar lo antes dicho se realizó el estudio de distribución de tamaño de gotas utilizando un software (Gwyddion 2.1), que permite determinar la distribución de gotas a partir de fotografías tomadas a las emulsiones asfálticas con un microscopio de luz polarizada. La Tabla 18 puede observarse los resultados obtenidos de la distribución de gotas para cada una de las emulsiones asfálticas evaluadas en esta fase.



Tabla 18. Distribución granulométrica de las emulsiones asfálticas realizadas con el Mixer en la segunda evaluación.

SURFACTANTES	FOTOS	DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA	PROMEDIO DE LAS GOTAS
Emulsiv 196/95 + Genamin® TAP100			
Emulsiv 196/07 + Genamin® TAP100			
Emulsiv M1785			
Emulsiv M475			
Emulsiv M175			
Emulsiv M515			
Emulsiv M325			

De la tabla 18 puede extraerse que los surfactantes evaluados en las emulsiones asfálticas, la distribución del tamaño de gotas es heterogénea, ya que la distribución es



de tipo bimodal y hasta multimodal. Esto confirma que las emulsiones pueden romperse rápido, por la variabilidad existente entre los tamaños de las gotas de asfalto. Estos valores obtenidos demuestran la presencia de emulsiones asfálticas inestables obtenidas a partir del Mixer (proceso A), donde no se logra obtener tamaño de gotas de asfalto homogéneo, que permitan una distribución normal. Esta consecuencia es debido a que el equipo no permite un mezclado instantáneo, ni tampoco una agitación rápida para obtener emulsiones asfálticas con gotas de menor tamaño.

2.2.3.2 Mezclas asfálticas (Método I):

Una vez obtenidas las emulsiones asfálticas a partir del proceso A, se procedió a realizar las mezclas asfálticas con los cinco (5) tipos de rocas, obteniéndose un total de 40 muestras. Cada una de ellas les fue evaluada el cubrimiento, la cohesión y la adhesión de forma cualitativa. Esto permitió obtener como resultado una aceptación de 25 muestras y descartando las restantes. La Tabla 19 presenta los resultados obtenidos de esta segunda evaluación, realizada a las distintas mezclas asfálticas.



Tabla 19. Ensayo de cubrimiento, cohesión y adhesión de las mezclas asfálticas en la segunda evaluación.

Surfactantes	Dosis %	Carga	Ruptura	Cal. - Veg.	Cal. - Emp.	Cal. - CVG	Gns. - Pal.S	Gns. - Los andes
Emulsión 182465 + Garammba TAP-100	1.3 y 0.2	(*)	RL	4	2	2	3	3
Emulsión 182407 + Garammba TAP-100	1.3 y 0.2	(*)	RL		6	4		2
Emulsión M376	1.1	(*)	RR			6	4	
Emulsión M1786	1.2	(*)	RL	1	1	1	1	
Emulsión M476	0.9	(*)	RR	3	4	6		6
Emulsión M175	0.9	(*)	RL	2	3	3	2	4
Emulsión M616	0.9	(*)	RR					1
Emulsión M326	0.9	(*)	RR			7		

Leyenda:

Los números representan las posiciones en orden descendente de cubrimiento.

Los  representan muestras con mal comportamiento.



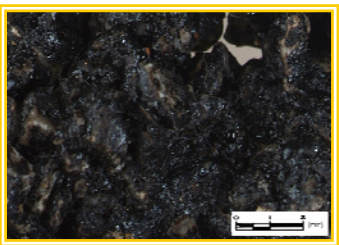
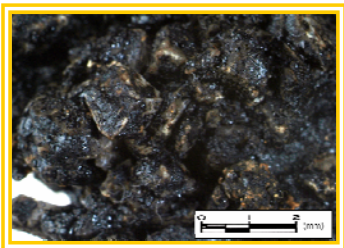
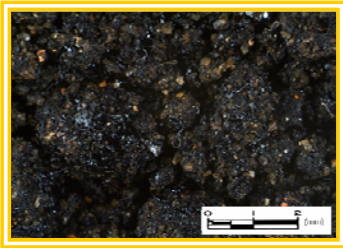
La tabla antes expuesta puede observarse que los números representan de forma cualitativa el cubrimiento obtenido en cada una de las muestras, a saber: número 1 excelente, 2 bueno, 3 regular y así sucesivamente en orden descendente de cubrimiento. Podemos observar que de todas las mezclas evaluadas, la emulsión asfáltica del surfactante Emulsiv® M1785 fue el que presentó excelente comportamiento de cubrimiento, cohesión y adhesión, al interaccionar con cuatro (4) de los cinco tipos de rocas evaluados. Por tal sentido se procedió a realizar la evaluación de forma detallada del cubrimiento por la técnica de macro y microfotografía realizada en el centro de fotografía IVIC. Seguidamente son presentados y discutidos los resultados obtenidos en dichas mezclas asfálticas.

a. Cubrimiento:

Una vez seleccionada las mezclas asfálticas de excelente comportamiento, se procedió a evaluar las fotos de la siguiente manera: primero verificando el cubrimiento de la emulsión asfáltica del surfactante Emulsiv® M1785 en los cuatro tipos de rocas presentados en la Tabla 20, segundo el cubrimiento de cuatro tipos de surfactantes para un mismo tipo de roca (Tabla 18)



Tabla 20. Cubrimiento de la emulsión asfáltica (Emulsiv® M1785) con los distintos tipos de rocas.

MUESTRA	FOTOS	OBSERVACIÓN
Caliza Cal. – Veg. (Cantera El Vegón C.A, Edo. Aragua)		Cubrimiento es bajo (70%), ya que se observan muchos glóbulos de asfalto, lo cual indica rompimiento prematuro de la emulsión al entrar en contacto con los minerales de calcita y cuarzo.
Caliza Cal. – Emp. (Cantera Empronacal, Edo. Aragua)		Cubrimiento del 95%, se aprecian muy pocos glóbulos de asfalto, lo cual indica un buen rompimiento de la emulsión al entrar en contacto con los minerales de calcita en la roca.
Caliza Cal. - CVG (Cantera Conacal CVG, Edo. Anzoátegui)		Cubrimiento de un 83%, ya que se observan espacios en los minerales de calcita y óxidos de hierro. Hubo buen rompimiento de la emulsión al entrar en contacto con la roca.
Gneis Gns. – Pal.S. (Cantera Palma Sola C.A, Edo. Bolívar)		Cubrimiento de un 80%, se observan que hay minerales como óxidos de hierro y algunos cuarzo que no fueron recubierto por la emulsión, así como también el material fino.



La tabla antes expuesta, puede observarse como varía el cubrimiento de un mismo tipo de emulsión asfáltica al variar el tipo de roca, donde la mineralogía influye así como la granulometría y la composición química presente. Se debe destacar que los porcentajes obtenidos son el producto de un mallado de 10x10cm. realizado a las imágenes fotográficas de las mezclas asfálticas, para obtener de forma cuantitativa los espacio donde no cubrió la emulsión (ver Apéndice J). A continuación serán discutidas en orden descendente de cubrimiento cada una de las rocas evaluadas.

La primera muestra Cal. – Emp. clasificada como una caliza tipo Packestone, con bajo contenido de arcillas presentó un excelente cubrimiento del 95%. Este excelente cubrimiento es atribuido a la presencia de granos angulares pocos alargados, bajo % de fragmentos de rocas tamaño fino y bajo contenido de arcilla $< 0,5\%$, entre los que destacan montmorillonita y caolinita. Esto permite que la emulsión se adhiera mejor al entrar en contacto con la superficie mineral, permitiendo que se produzca un cambio en la superficie mineral de hidrofílica a lipofílica y los glóbulos de asfalto recubran mejor la superficie del mineral en la roca.

La segunda muestra Cal. – CVG clasificada como una caliza tipo Packestone, la cual contiene alto contenido de óxido de hierro, esta mezcla presentó un cubrimiento del 83%. Este cubrimiento puede ser atribuido a la presencia de granos angulares, planos y alargados; el % de pasante N° 200 de 1,93% y un contenido de arcilla $< 2\%$, hay presencia de óxidos de hierro. Por lo antes expuesto podemos atribuirle la disminución del cubrimiento, al alto contenido de óxido de hierro y la forma irregular bastantes alargados que presenta la superficie del agregado, lo cual en algunos caso no fueron recubiertos por las glóbulos de asfalto. Esto permite que en dichas zonas de la superficie mineral no se observe cubrimiento y por ende no se produzca un cambio de hidrofílica a lipofílica en la roca.

Por su parte, la tercera muestra Gns. – Pal.S., la cual es una mezcla de dos tipos de rocas, entre las cuales tenemos una roca félsica (gneis félsico) y una roca básica (anfíbolita). Esta mezcla presentó un cubrimiento del 80%, puede ser atribuido a la presencia de granos angulares y alargados, el % de pasante N° 200 de 11,23% y el



contenido de arcilla aproximado es $< 1\%$. Por lo antes expuesto, la heterogeneidad en la muestra en cuanto a la mineralogía y el material fino pueden estar induciendo a una ruptura prematura de la emulsión asfáltica. Esta ruptura puede ser debido a la competencia entre los sitios activos de los distintos agregados minerales y la adsorción con el surfactante, lo que no estaría permitiendo un buen cubrimiento de la emulsión por la hidrofobicidad presente en la superficie mineral de las rocas.

La cuarta muestra Cal. – Veg. clasificada como una caliza tipo Packestone, la cual contiene alto contenido de arcillas, presentó un cubrimiento del 70%. Este cubrimiento puede ser atribuido a la presencia de granos bastantes planos, % de pasantes N°200 de 10,00% y un contenido de arcillas $< 2\%$ entre los que destacan montmorillonita y caolinita. Este alto contenido de fragmentos de material fino y arcillas no permite que la emulsión se adhiera a la superficie mineral de la roca, debido a la competencia que ocurre entre las zonas activas de las arcillas y los minerales presente, por ende ocasiona que ocurra un rompimiento prematuro de la emulsión asfáltica.

De lo antes expuesto, puede señalarse que se tienen dos grupos de rocas, que de acuerdo a su composición química y mineralógica, pueden ser clasificadas como unas de tipo carbonáticas y otras de tipo ácida. Esto permite plantear dos modelos de rompimiento de emulsión asfáltica dependiendo del tipo de roca. La figura 50 muestra el modelo planteado para las rocas tipo carbonáticas (a) y otro para las rocas ácidas (b) como los gneis félsicos (Eckmann *et al.*, 2001).

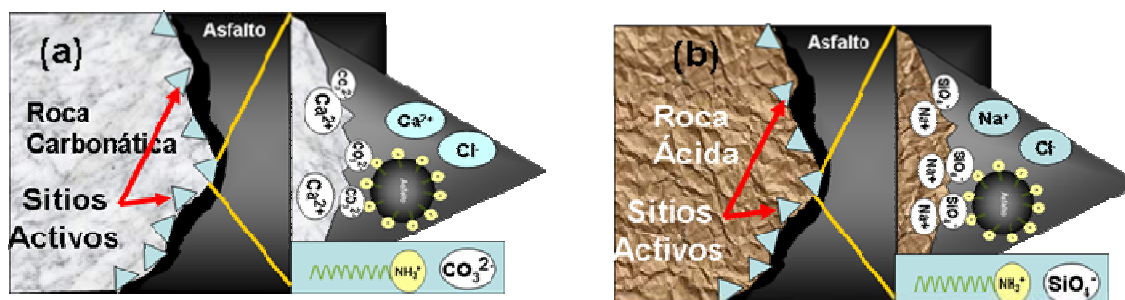
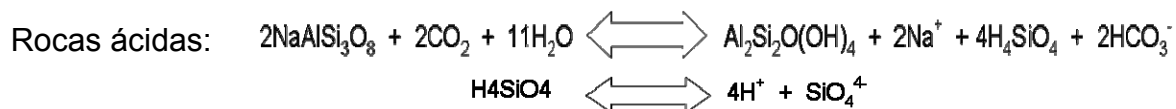
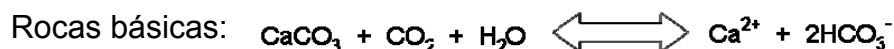


Figura 50. Modelo propuesto para rompimiento de la emulsión asfáltica en tipos de rocas carbonáticas (a) y rocas ácidas (b)



Este modelo propuesto permite, observar la presencia de sitios activos de cargas negativas en la superficie mineral de las rocas. Esto facilita que los glóbulos de asfalto emulsionados con cargas positivas puedan interaccionar con el mineral y formar carbonatos de aminas en rocas carbonáticas ó de silicatos de aminas para rocas ácidas, solo en donde actúen surfactantes tipos aminas (Eckmann *et al.*, 2001). Esta interacción es producto de la disolución parcial causada por la acides presente en la emulsión asfáltica, que puede atacar a la superficie mineral calcita o cemento calcáreo presente en las rocas tipo carbonáticas; así mismo en minerales de silicatos donde los cationes de la red, tales como los iones alcalinos en los feldespatos (plagioclasa tipo albita), son fácilmente solubles cuando se exponen superficies frescas de estos minerales al contacto con soluciones acuosas; por lo que la carga superficial estará controlada por el rompimiento de los enlaces Si – O ó por la carga de la cadena estructural del silicato (Mantilla *et al.*, 2007). A continuación se presenta una posible ecuación, donde se representa la disolución de ambos tipos de minerales en los dos tipos de rocas:

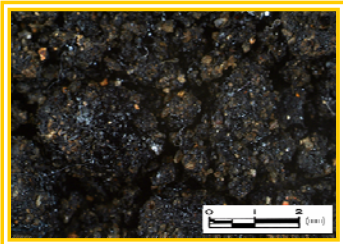
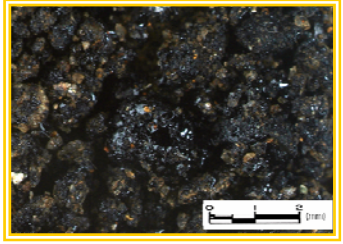
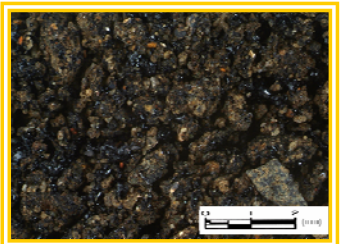
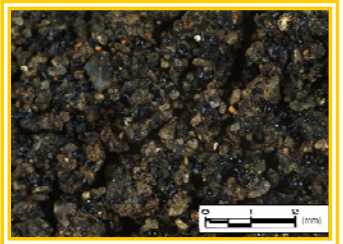


La Tabla 21 presenta como influye el cubrimiento de las emulsiones asfálticas al variar el tipo de surfactante (solamente 4 tipos de los evaluados), dejando fijo el tipo de roca Gns. – Pal.S. (Edo. Bolívar).

En la tabla antes expuesta, puede observarse que la composición química del surfactante, es decir, la cadena alquílica en su extremo es importante conocerla. Ya que dependiendo de este extremo polar o hidrofílica presente en la molécula, permitirá mejorar el cubrimiento e interaccionar con los minerales presentes en la roca para aumentar sus propiedades adhesivas en las mezclas asfálticas.



Tabla 21. Cubrimiento de la emulsión asfáltica al variar el tipo de surfactante en el tipo de roca Gns. – Pal. S.

EMULSIONES ASFÁLTICAS (SURFACTANTE)	FOTOS	OBSERVACIÓN
Emulsiv M1785 (S3)		La emulsión asfáltica es de ruptura lenta (RL) y el cubrimiento fue de un 80%. El surfactante utilizado es una mezcla derivado de lignina más dialquil amina.
Emulsiv M175 (S7)		La emulsión asfáltica es de ruptura lenta (RL) y el cubrimiento fue del 78%. El surfactante utilizado es una mezcla derivado de lignina más alquil amido amina.
Emulsiv M196/95 + Genamin® TAP100 (S1)		La emulsión asfáltica es de ruptura lenta (RL) y el cubrimiento fue del 74% ya que se observa glóbulos de asfalto. El surfactante utilizado es una mezcla derivado de lignina más diamina.
Emulsiv M375 (S2)		La emulsión asfáltica es de ruptura rápida (RR) y el cubrimiento fue del 67% ya que se observa glóbulos de asfalto ó rompimiento prematuro. El surfactante utilizado es una diamina.

De los surfactantes estudiados el **S3** y **S7**, su extremo hidrofílica posee compuestos de tipos lignina con aminas, lo cual permitió una mejor interacción con la roca. Mientras que los otros dos surfactantes, el **S1** posee compuestos tipo lignina con



diaminas y **S2** solo diamina. El cubrimiento y la adhesión disminuyó bastante en el **S2**, por lo que se puede indicar que los surfactantes con compuesto tipo lignina, incrementa el cubrimiento y se adhieren mejor a la superficie mineral presente en las rocas. También se puede señalar que las emulsiones asfálticas de ruptura lenta presentó un mejor cubrimiento que la emulsión asfáltica de rompimiento rápido.

b. Cohesión:

Este ensayo fue realizado de forma cualitativa en cada una de las mezclas asfálticas, reportándose como Excelente (100%), Bueno (75%), Regular (50%) y Malo ($\leq 25\%$). La Tabla 22 muestra los valores obtenidos de dicha evaluación.

Tabla 22. Ensayo de cohesión cualitativa en las mezclas asfáltica (Método I)

Surfactantes	Dosis %	Carga	Ruptura	Cal. - Veg.	Cal. - Emp.	Cal. - CVG	Gns. - Pal.S	Gns. - Les Andes
Emulsi ^o 8662 + Genamin ^o TAP 100	1.3 y 0.2	(+)	RL	Bueno	Excelente	Excelente	Bueno	Malo
Emulsi ^o 8847 + Genamin ^o TAP 100	1.3 y 0.2	(+)	RL	Bueno	Malo	Excelente	Bueno	Malo
Emulsi ^o M37E	1.1	(+)	RR	Malo	Malo	Bueno	Bueno	Malo
Emulsi ^o M176B	1.2	(+)	RL	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Regular
Emulsi ^o M47E	0.9	(+)	RR	Regular	Excelente	Excelente	Malo	Malo
Emulsi ^o M17E	0.9	(+)	RL	Bueno	Excelente	Excelente	Bueno	Malo
Emulsi ^o M31E	0.9	(+)	RR	Bueno	Malo	Malo	Malo	Bueno
Emulsi ^o M32E	0.9	(+)	RR	Malo	Malo	Bueno	Malo	Malo



Nótese que en la mencionada Tabla 22 de las 40 mezclas asfálticas evaluadas, solo 18 se descartaron por presentar mala cohesión, mientras que 22 fueron aceptadas de forma cualitativa. Estas muestras aceptadas serán utilizadas para realizarles el ensayo de adhesión.

c. Adhesión:

Este ensayo realizado a través de la prueba de ebullición en agua según norma A.S.T.M D3625, permite evaluar el límite máximo de desprendimiento $< 5\%$ en mezcla asfáltica (ver Apéndice K). Dicho ensayo se realizó por duplicado a cada una de las muestras que fueron aceptadas en la evaluación visual de cubrimiento y cohesión. Las Figuras 51, 52, 53, 54 y 55 muestran los resultados obtenidos del promedio para las dos medidas realizadas en aquellas mezclas asfálticas previamente seleccionadas o evaluadas en el ensayo de adhesión por tipo de roca. Al extremo derecho de la grafica se presentan la imagen fotográfica del menor y mayor valor obtenido del ensayo de adhesión. En el Apéndice K, se presenta la tabla con todos los valores obtenidos.

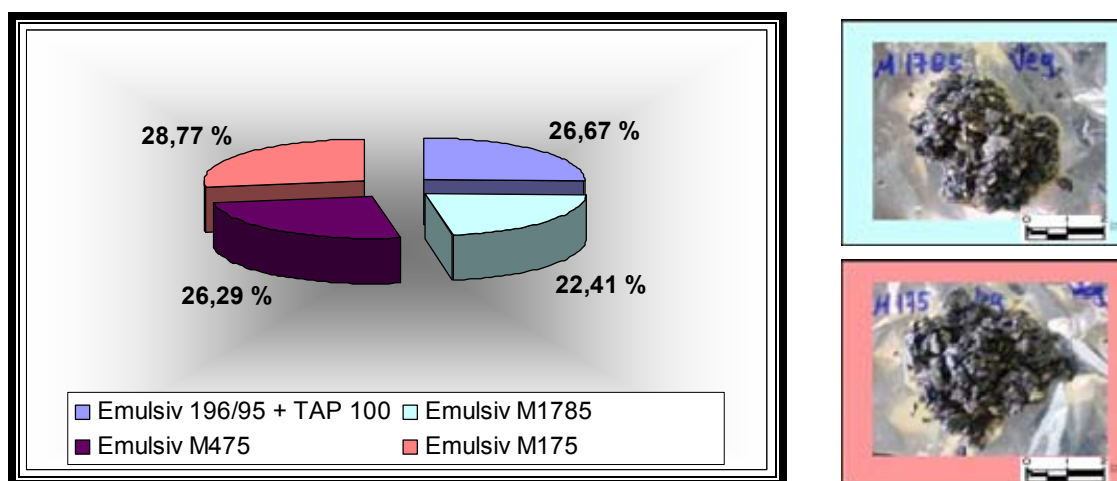


Figura 51. Ensayo de adhesión en las mezclas asfálticas del tipo de roca Cal. – Veg. (Edo. Aragua)

La Figura 51 podemos observar que solo cuatro muestras fueron evaluadas y que ninguna de las mezclas asfálticas reportadas por el ensayo de adhesión son aceptadas dentro de lo establecido por la norma ($< 5\%$). Estos altos valores pueden ser debido a que la roca de interés presenta un alto contenido de fragmentos de roca tamaño fino y arcillas, lo que no permite una buena adhesión y por lo tanto el desprendimiento de material es mayor al aplicar la técnica. Al lado derecho de la figura



se presentan dos imágenes fotográficas, la parte superior el del menor porcentaje de pérdida (Emulsiv® M1785) y en la imagen inferior el de mayor pérdida de material (Emulsiv® M175).

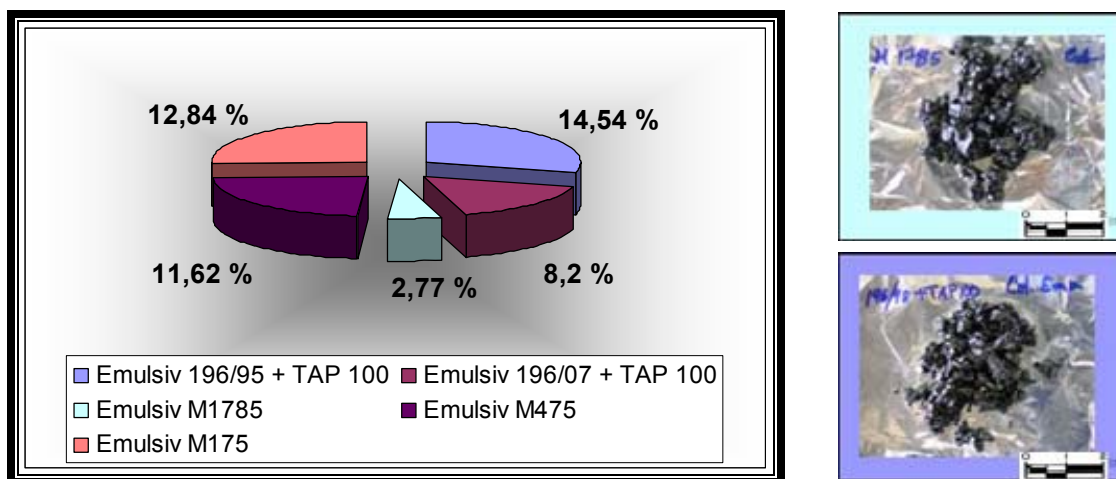


Figura 52. Ensayo de adhesión en las mezclas asfálticas del tipo de roca Cal. – Emp. (Edo. Aragua)

La Figura 52 puede apreciarse que de los cinco tipos de mezclas asfálticas, ensayado en la roca Cal. – Emp., solo el Emulsiv® M1785 (imagen fotográfica superior) cumple con lo establecido por la norma (<5%). La mezcla que obtuvo mayor porcentaje de material desprendido fue el Emulsiv® 196/95 + Genamin® TAP100 (imagen fotográfica inferior). El cubrimiento en las mezclas se mantuvo, indicando que los porcentajes obtenidos es debido al poco contenido de material de fragmentos de rocas tamaño fino y de arcillas que presenta la muestra.

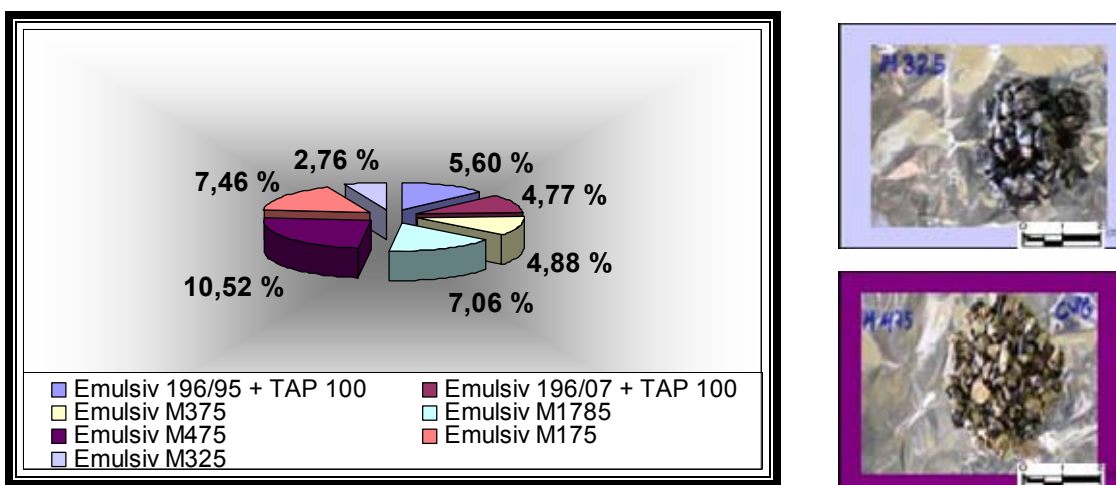


Figura 53. Ensayo de adhesión en las mezclas asfálticas del tipo de roca Cal. - CVG (Edo. Anzoátegui)



En el mismo orden de idea, se puede observar que de las siete mezclas asfálticas ensayadas en la muestra Cal. – CVG, solo tres muestras son aceptadas dentro del valor establecido por la norma ($<5\%$), obteniéndose que el menor porcentaje de desprendimiento de material fue mostrado por el Emulsiv® M325 (imagen fotográfica superior) y el de mayor porcentaje fue el Emulsiv® M475 (imagen fotográfica inferior). El cubrimiento en esta muestra disminuyó bastante, esto indica que la pérdida de material en la mezcla es proveniente de la emulsión asfáltica y no del material fino o arcillas.

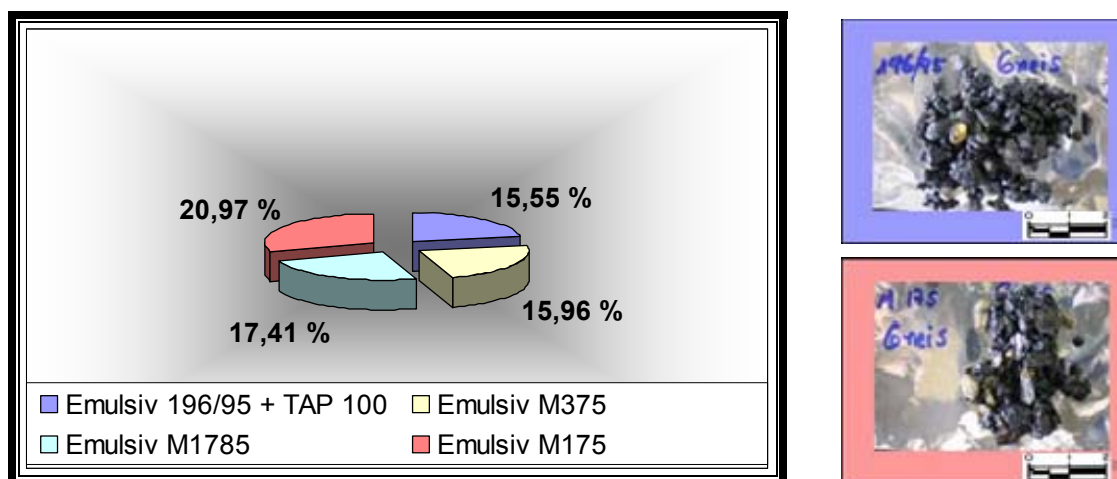


Figura 54. Ensayo de adhesión en las mezclas asfálticas del tipo de roca Gns. – Pal. S. (Edo. Bolívar)

La Figura 54 se muestra que solo cuatro tipos de mezclas asfálticas, perteneciente a la roca Gns. – Pal. S., ninguna son aceptadas dentro del valor establecido por la norma ($<5\%$), ya que están por encima de un 15% de material desprendido. En las imagen fotográfica superior, se presenta el que obtuvo el menor valor de material desprendido (Emulsiv® 196/95 + Genamin® TAP100) y en la imagen fotográfica inferior, el mayor valor de material desprendido (Emulsiv® M175). También podemos observar que el cubrimiento se mantuvo lo cual indica que este porcentaje de material desprendido es producto del alto porcentaje de material fino que presenta este tipo de material.

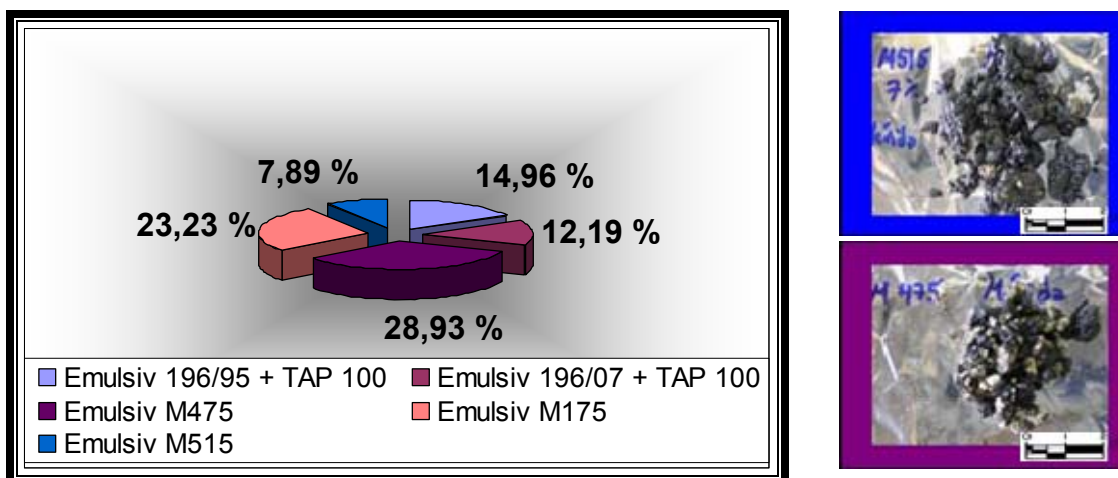


Figura 55. Ensayo de adhesión en las mezclas asfálticas del tipo de roca Gns. – Los Andes (Edo. Mérida)

Con respecto a la Figura 55, puede observarse que fueron evaluadas cinco mezclas asfálticas del tipo de roca Gns. – Los Andes. Los resultados obtenidos indican que ninguna de ellas son aceptadas por la norma ($<5\%$), el cubrimiento se mantuvo en cada una de las mezclas lo cual indica que el material desprendido es producto del alto contenido de material de fragmento de roca tamaño fino y arcillas presente en las muestras. La imagen fotográfica superior presenta la mezcla que obtuvo el menor porcentaje de material desprendido (Emulsiv® M515) y en la imagen fotográfica inferior, la que obtuvo el mayor porcentaje de material desprendido (Emulsiv® M475). El cubrimiento se mantuvo en las muestras lo cual indica que el porcentaje de material desprendido es producto del alto contenido de material de fragmento de roca tamaño fino presente en la muestra.

2.3 Proceso B: empleando un Molino coloidal

2.3.1 Selección del surfactante:

Una vez realizado los ensayos y evaluaciones a los surfactantes empleados en el proceso A y obtenidos los resultados de la primera y segunda evaluación, se procedió a validar a través de este proceso B. En este proceso, se validó el surfactante presente en la emulsión asfáltica que obtuvo el mejor comportamiento e interacción con los distintos tipos de rocas, a través de ensayos de cubrimiento, cohesión y adhesión



obtenidos en las mezclas asfálticas del método I. Por tal sentido el surfactante aceptado para validar y fabricar la emulsión asfáltica a partir del proceso B, fue el Emulsiv® M1785 de ruptura lenta (RL) con una dosis de 1,2%.

2.3.2 Emulsión asfáltica:

Una vez seleccionado el surfactante se procedió a realizar la emulsión asfáltica y posterior evaluación a través de los distintos ensayos a la emulsión, como a las mezclas asfálticas. La Tabla 23 presentan los resultados obtenidos de la caracterización realizada a la emulsión asfáltica del surfactante Emulsiv® M1785 con la dosis (1,2%) ya establecida en el proceso A de la segunda evaluación.

Tabla 23. Caracterización de la emulsión asfáltica obtenida con el molino coloidal.

PROPIEDADES	VALOR	VALOR SEGÚN LA NORMA	NORMA
Viscosidad Saybolt – Furol a 25°C (seg)	20,22	20 - 100	A.S.T.M. D244 - 88
Tamizado N° 20 (% Retenido)	0,4	0,1	A.S.T.M. D244, COVENIN 1198-92
Residuo por evaporación (% Residuo)	60,3	58 - 63	A.S.T.M. D244, COVENIN 1057-92
Sedimentación, 5 días (%)	1,96	< 5	A.S.T.M. D244, COVENIN 934-32

La Tabla 23 puede observarse los valores obtenidos en cada uno de los ensayos realizados a las emulsiones asfálticas. Los resultados obtenidos son valores que están dentro de lo establecido por la norma, a excepción del % retenido (tamiz N°20), el cual se encuentra por encima de lo establecido a la norma. Esto puede ser debido a un proceso de coalescencia que puede estar ocurriendo entre las gotas de asfalto.

2.3.3 Mezclas asfálticas (Método II):

Una vez obtenida la emulsión asfáltica se procedió a realizar las mezclas asfálticas, cuyos resultados obtenidos son a partir de los ensayos del % óptimo de agua, inmersión por abrasión, cubrimiento, cohesión y adhesión. La Tabla 24 muestra los valores obtenidos en cada uno de los ensayos realizado a las mezclas asfálticas.



Tabla 24. Resultados obtenidos en las diferentes mezclas asfáltica del surfactante Emulsiv M1785.

	Cal.- Veg.	Cal. - Emp.	Cal. - CVG	Gns. - Pal. S.	Gns. - Los Andes
% Óptimo de agua	28,80	24,00	24,30	24,00	28,80
Imersión por abrasión Fa - g/m ²	29,47	38,23	130,98	1,84	3,27
Cubrimiento (%)	100	100	80	90	90
Cohesión (Kg/cm) Tipo II	25,00	20,00	22,30	20,00	27,00
Cohesión (Kg/cm) Tipo III	27,00	22,00	21,30	20,00	28,00
Adhesión (%)	6,01	6,43	2,06	8,12	6,23

A fin de visualizar cada uno de los resultados obtenido de los ensayos realizado a las mezclas asfálticas presentadas en la Tabla 24, fueron realizadas las siguientes figuras para cada ensayo.

➤ Ensayo de consistencia:

Este ensayo permitió determinar el % óptimo de agua de premezcla en la mezcla asfáltica. La Figura 56 representa los porcentajes obtenidos en cada uno de los ensayos realizados a los cinco tipos de rocas.

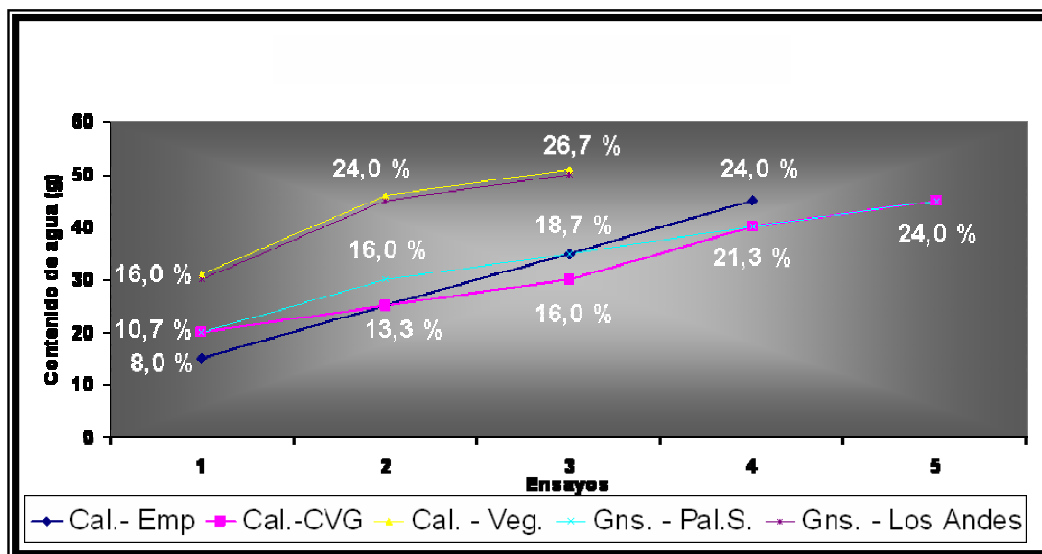


Figura 56. Ensayo de consistencia (% óptimo de agua premezcla) en cada una de las muestras de rocas.



En la figura antes expuesta, puede identificarse la presencia de dos grupos, a saber: el primero está representado por las muestras Cal. – Emp., Cal. – CVG y Gns. – Pal. S. las cuales a través del ensayo obtuvieron un 24 % de agua de premezcla. Estas muestras presentan bajo contenido de material de fragmento de roca tamaño fino (pasante N° 200) e igualmente de arcilla, a excepción de la muestra Gns. – Pal. S. que tiene alto contenido de material fino (pasante N° 200) pero el tipo de roca, es una mezcla de gneis félsico y anfibolita, lo que permite que la roca no absorba tanto contenido de agua.

El segundo grupo esta constituido por las muestras Cal. – Veg. y Gns. - Los Andes, cuyo valor fue de 26,7% de agua de premezcla. Estas muestras contienen alto de material de fragmento de roca tamaño fino (pasante N° 200) e igualmente el contenido alto de arcilla para la muestra Cal. – Veg. Esta muestra es de tipo caliza y presentan arcillas de tipo expansivas (montmorillonita), lo que permite un incremento en el contenido de agua de premezcla.

➤ Inmersión por abrasión:

Este ensayo permite determinar de forma sencilla el factor de abrasión Fa (ver Apéndice L), que permite determinar el desgaste que sufre una mezcla asfáltica a la abrasión en condiciones superficiales. La Figura 57 muestra los resultados obtenidos para cada uno de los tipos de rocas en las mezclas asfálticas.

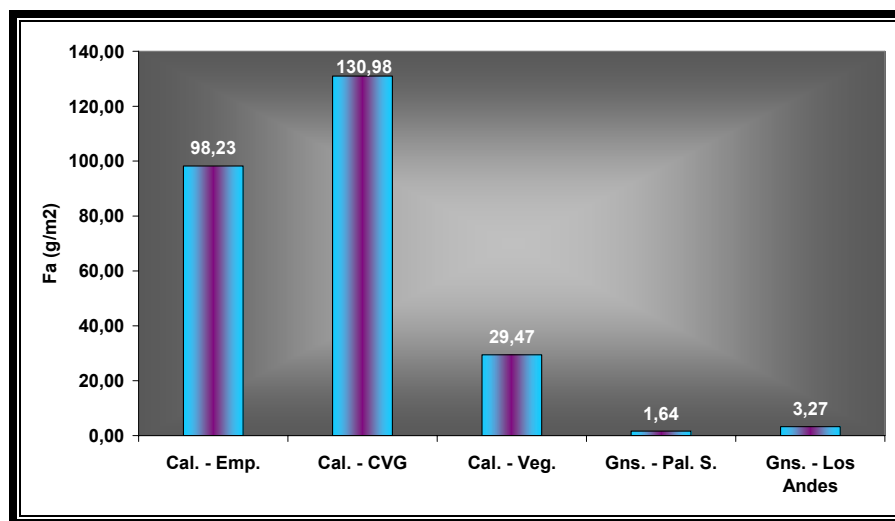


Figura 57. Ensayo de inmersión por abrasión en cada una de las muestras de rocas.



La Figura 57 muestra como varía el factor de abrasión (F_a) para las rocas evaluadas en las mezclas asfálticas. Los cinco tipos de mezclas asfálticas puede ser separados en dos grupos. El primer grupo constituido por las muestras Gns. – Pal. S. y Gns. – Los Andes, las cuales son rocas de tipo metamórficas donde los minerales presente ya han sufrido grado de alteración y por ende son mas resistente a los procesos de meteorización. Esto explica el porque, este tipo de roca al ser simulado ante este proceso de abrasión, mostró un bajo contenido de desgaste.

Para el segundo grupo está representado por las muestras Cal. – Emp., Cal. – CVG y Cal. – Veg.; todas clasificadas como caliza, nótese que el desgaste causado por la abrasión es mucho mayor comparado con el primer grupo. En este tipo de roca la composición mineralógica es homogénea y el mineral presente es tipo calcita ó cemento calcáreo, el cual es menos resistente a los agentes atmosféricos como el agua.

En el mismo orden de idea, las cinco muestras presentadas, la que obtuvo el mayor desgaste fue la muestra Cal. – CVG. Esta muestra presenta alta concentración de óxidos de hierro. El análisis de cubrimiento permitió observar que la emulsión no recubre bien a este mineral, el cual pudo haber salido del sistema fácilmente al ser aplicada la abrasión, durante la cual se observó una coloración rojiza en el agua.

a. Cubrimiento:

La Tabla 25 pudo observarse, como mejoro el cubrimiento en cada una de las mezclas asfálticas obtenidas de la emulsión asfáltica validada mediante el proceso B. Se debe destacar que los porcentajes obtenidos son el producto de un mallado de 10x10cm. realizado a cada una de las imágenes fotográficas, para contar los espacio donde no cubrió la emulsión (ver Apéndice J).



Tabla 25. Evaluación del cubrimiento en las mezclas asfálticas obtenidas a partir de la emulsión realizada con el molino coloidal.

MEZCLAS ASFÁLTICAS	OBSERVACIÓN
	Cal. – Veg. 100%
	Cal. – Emp. 100%
	Cal. – CVG 80%
	Gns. – Pal. S. 90%
	Gns. – Los Andes 90%



b. Cohesión:

En cuanto a los resultados obtenidos para este ensayo, pudo observarse a través de las siguientes figuras como se incrementa el curado o fraguado en la cohesión, para cada uno de los tipos de rocas en las mezclas asfálticas utilizadas para lechadas asfálticas de tipo II y tipo III. La norma admite un valor mínimo de 12 Kg/cm a los 30 min. y de 20 Kg/cm a los 60 min. para de esta forma dar apertura al tráfico. A continuación se presentan las Figuras desde la 58, hasta la Figura 62, donde se visualiza los resultados obtenidos del ensayo de cohesión, para cada una de las mezclas asfálticas.

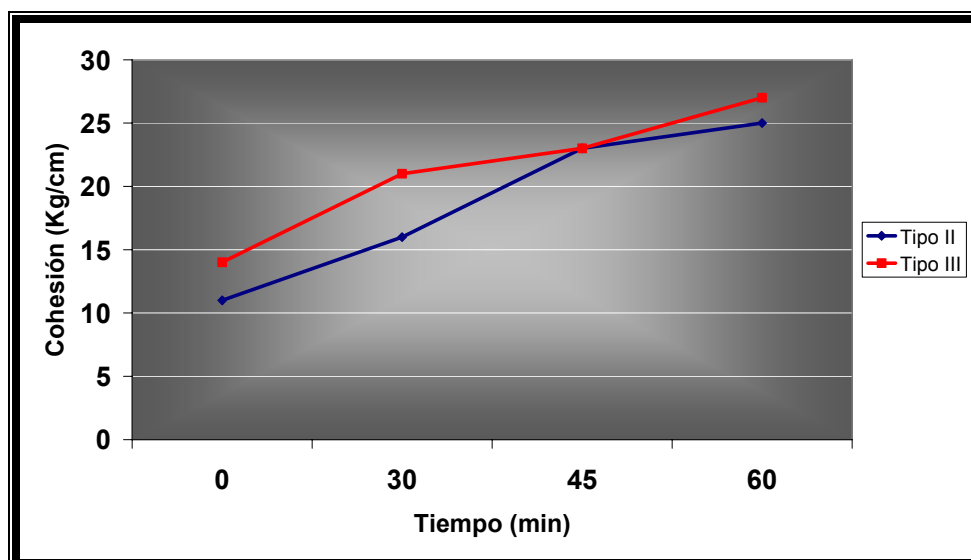


Figura 58. Comportamiento de cohesión en la mezcla asfáltica con la caliza de la cantera El Vegón C.A

La Figura 58, puede observarse que este tipo de roca Cal. – Veg., utilizado en las mezclas asfálticas, presentó una tendencia de incremento muy irregular de cohesión al transcurrir el tiempo, tanto para lechadas tipo II como tipo III. Sin embargo el valor obtenido cumple con lo establecido por la norma. Este tipo de roca por presentar alto contenido de arcillas expansivas permite ese comportamiento irregular en el curado de la mezcla asfáltica.

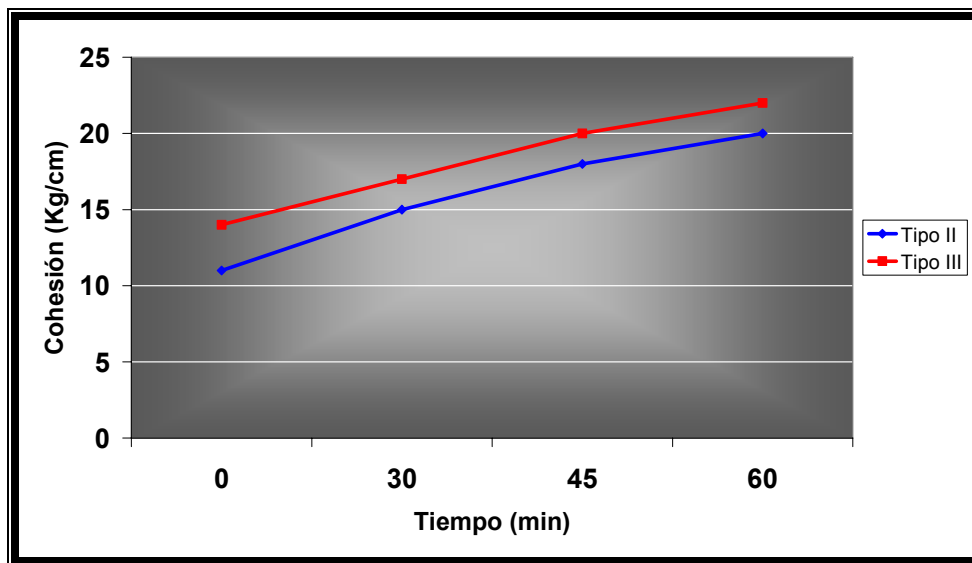


Figura 59. Comportamiento de cohesión en la mezcla asfáltica con la caliza de la cantera Empronacal C.A

La Figura 59 pudo observarse que este tipo de roca Cal. – Emp., presentó una buena cohesión al transcurrir el tiempo de curado en la mezcla asfáltica. También fue observado una tendencia lineal al incremento, tanto para el tipo II como para el tipo III. Esto indica que al pasar una hora se puede apertura la vía al tráfico, ya que la mezcla permitió reportar un incremento en su propiedad cohesiva, la cual esta aceptado por la norma.

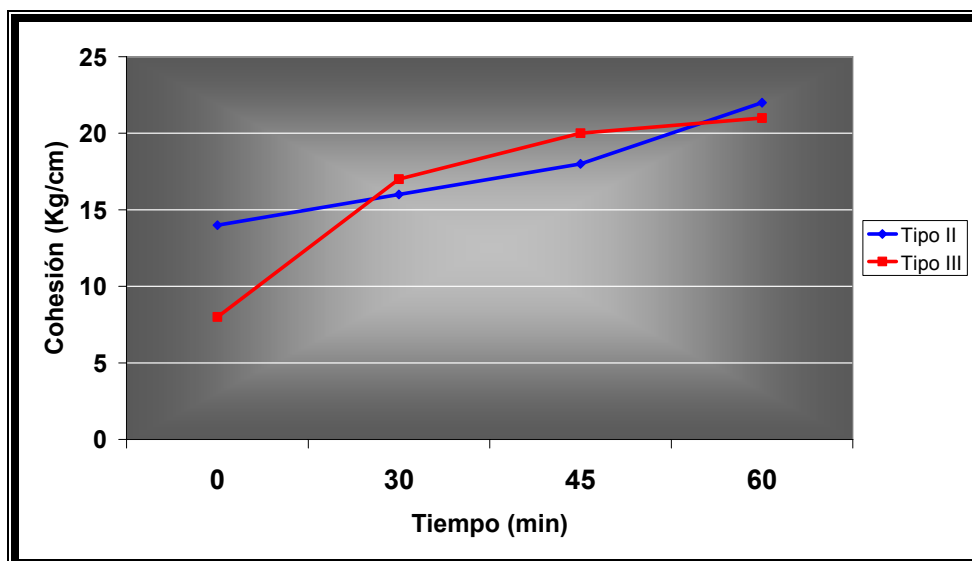


Figura 60. Comportamiento de cohesión en la mezcla asfáltica con la caliza de la cantera Conacal CVG



La Figura 60 pudo observarse, que este tipo de roca Cal. – CVG., utilizado en las mezclas asfálticas presenta una tendencia muy irregular de cohesión al transcurrir el tiempo, tanto para lechadas tipo II como para el tipo III. Este comportamiento irregular puede estar sujeto al alto contenido de minerales de óxido de hierro que presenta la muestra. Sin embargo el valor obtenido cumple con lo establecido por la norma para darle apertura al tráfico.

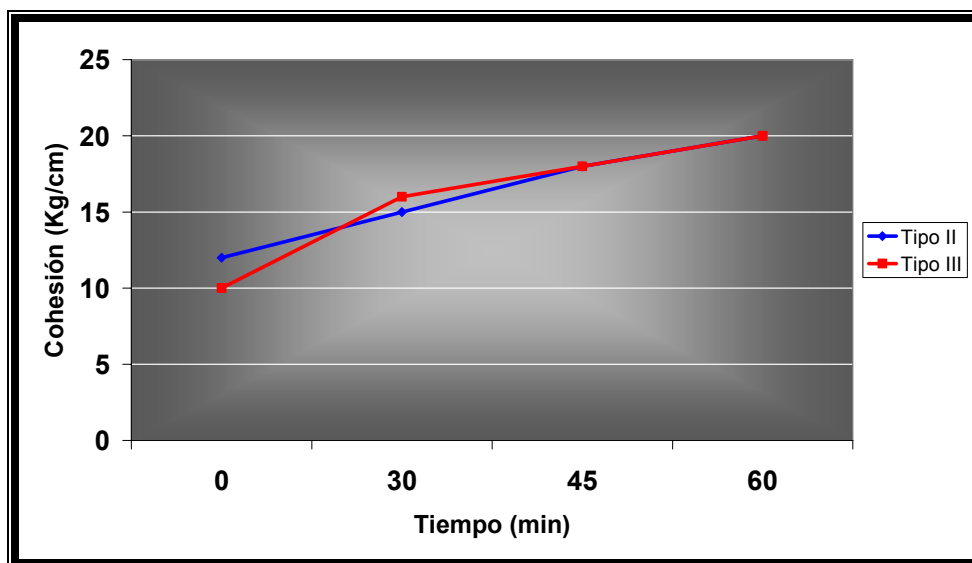


Figura 61. Comportamiento de cohesión en la mezcla asfáltica del gneis y anfibolita de la cantera Palma Sola C.A

La Figura 61 puede observarse, que este tipo de roca Gns. – Pal. S., utilizado en las mezclas asfálticas, presenta una tendencia lineal un poco irregular de cohesión al transcurrir el tiempo para lechadas tipo II y III. Sin embargo, se aprecia que ambos tipos sus valores de cohesión son muy parecidos, lo cual indica que este tipo de roca, se comporta de igual forma en ambas lechadas. Este comportamiento puede ser debido a lo heterogéneo de la muestra y al alto contenido de material de fragmento de roca tamaño fino. De igual manera cumple con lo establecido por la norma para darle apertura al tráfico.

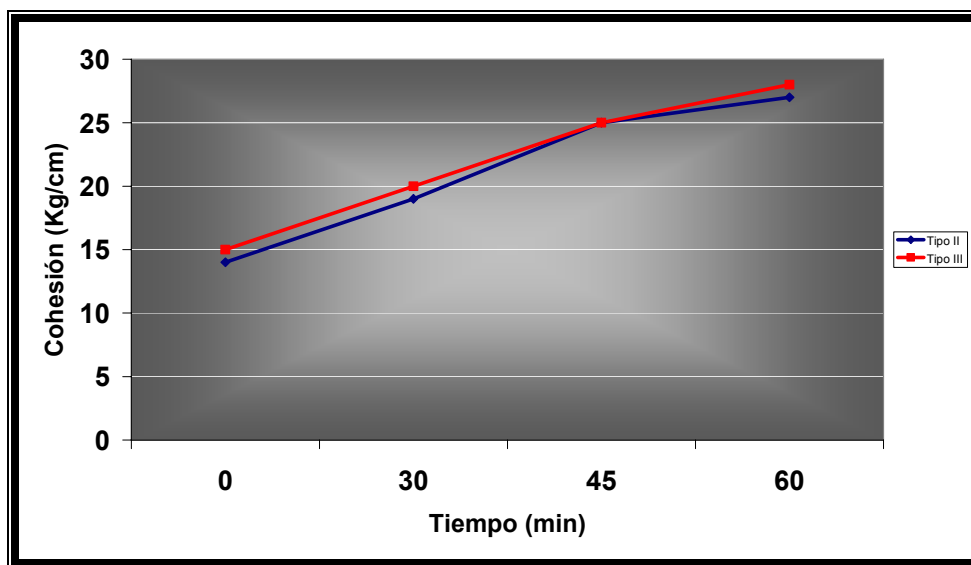


Figura 62. Comportamiento de cohesión en la mezcla asfáltica de la cantera Los Andes.

Por ultimo la Figura 62 puede observarse, que este tipo de roca Gns. – Los Andes, utilizado en las mezclas asfálticas presenta una tendencia bastante lineal. Esta cohesión de las mezclas asfálticas al transcurrir el tiempo es buena tanto para lechadas tipo II y III. El valor obtenido de la cohesión para este tipo de muestra cumple con lo establecido por la norma.

c. Adhesión:

Los resultados obtenidos a partir de este ensayo realizado según norma A.S.T.M D3625, permite determina el % de material desprendido (según la norma <5%), causado por los agentes exógenos como el agua al interaccionar con la superficie de los agregados minerales del pavimento. La Figura 63 presenta los valores obtenidos en las distintas mezclas asfálticas.

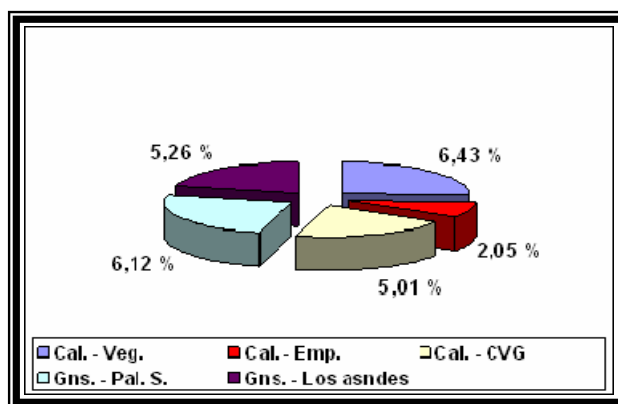


Figura 63. Ensayo de adhesión realizado a las mezclas asfálticas



La figura antes expuesta, puede observarse que de los cinco tipos de rocas utilizados para realizar las mezclas asfálticas, el que presentó un menor % lavado de material y cumple con lo establecido por la norma fue la roca Cal. – Emp. (2,05 %), este presenta bajo contenido de material de fragmento de rocas tamaño fino y arcillas. Mientras que podemos apreciar que las rocas que presentaron mayor % lavado, son aquellas que presentan alto contenido de material de fragmento de rocas tamaño fino, a excepción del agregado Cal. – CVG, pero este presenta alto contenido de óxidos de hierro que fue fácilmente desprendido del sistema ya que se observó coloración rojiza en el agua. La Figura 64 podemos apreciar ambas muestras, es decir, la que presentó menor porcentaje de lavado (a) y la que presentó alto porcentaje de lavado (b).

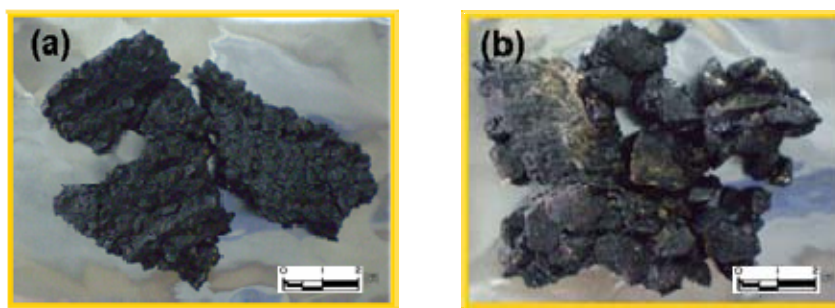


Figura 64. Ensayo de adhesión de las mezclas asfálticas
(a) Cal. – Emp. y (b) Cal. – CVG



CONCLUSIONES

- ✓ De las rocas estudiadas, la que presentó excelente comportamiento en cuanto a cubrimiento, cohesión y adhesión fue la muestra Cal. – Emp., perteneciente a la zona del estado Aragua recolectada en la cantera Empronacal C.A. Mientras que la roca que presentó mal comportamiento en cuanto a cubrimiento, cohesión y adhesión fue la muestra Aren. – Falcón, perteneciente a la zona del estado Falcón recolectada en la cantera Falcón.
- ✓ Es importante conocer la caracterización de las rocas, en cuanto a su composición química, mineralógica y granulométrica. Esto permite obtener mezcla asfáltica que presenten buena interacción con el surfactante presente en la emulsión e incremente el cubrimiento, cohesión y adhesión. Razón por lo cual el resultado es mayor durabilidad y resistencia en el tiempo, a los tratamientos superficiales o Slurry Seal en el área de pavimentación.
- ✓ Las muestras con alto contenido de material de fragmento de rocas tamaño fino, arcillas, como presencia de minerales de óxido de hierro; disminuyen las propiedades de adherencia debido a la competencia entre los sitios activos de los minerales y el surfactante. También este alto contenido de arcillas incrementa el contenido de agua de premezcla en las mezclas asfálticas.
- ✓ Las emulsiones asfálticas obtenidas a partir del proceso A (realizadas con el Mixer), permitió observar el comportamiento de distintos grupos alquílicos presente en el surfactante, de esta forma poder seleccionar y validar mediante el proceso B (realizadas con el Molino Coloidal) el surfactante que obtuvo el excelente comportamiento de cubrimiento, cohesión y adhesión en las evaluaciones realizadas a las mezclas asfálticas.
- ✓ De los catorce surfactantes evaluados, el seleccionado para validar el proceso B fue el Emulsiv® M1785 de carácter catiónico y de rompimiento lento (RL), debido



a su excelente comportamiento en la emulsión asfáltica por su buen desempeño y compatibilidad con los distintos tipos de rocas en las mezclas asfálticas.

- ✓ Debido a la interacción electroquímica que ocurre entre la molécula del surfactante y la superficie mineral presente en la roca, la superficie del sólido cambia de hidrofílica a lipofílica permitiendo que ocurra el rompimiento en la emulsión y por ende la adsorción de los glóbulos de asfalto sobre la superficie mineral.
- ✓ Para mezclas asfálticas donde se presentan tipos de minerales en rocas de composición química ácida y básica, al interaccionar con surfactantes tipos aminas tienden a formar silicatos de aminas. Producto de la disolución parcial de la superficie mineral en donde los iones alcalinos presenten en la estructura o red cristalina pueden ser fácilmente hidrolizados permitiendo compatibilidad entre mineral – surfactante.
- ✓ Para mezclas asfálticas donde se presentan tipos de minerales en rocas de composición química carbonática, al interaccionar con surfactantes tipos aminas tienden a formar carbonatos de aminas. Esto es producto de la disolución parcial de mineral calcita o cemento calcáreo presente en la roca, debido a la acidez presente en la emulsión asfáltica que permite esta disolución.



RECOMENDACIONES

- ✚ Realizar un estudio detallado de la hidrofobicidad de los minerales presente en las rocas, mediante un ensayo de flotación. De esta forma poder determinar el contenido de surfactante adsorbida en la superficie del sólido a distintos pH.
- ✚ Realizar medidas del potencial Z para determinar la carga superficial mineral de las rocas, así como también la conductividad eléctrica presente entre las emulsiones asfálticas y las rocas evaluadas.
- ✚ Variar la relación del contenido de asfalto en la emulsión asfáltica, en aquellas mezclas asfálticas donde se observe bajo cubrimiento.
- ✚ Realizar el mismo estudio con otros tipos o mezclas de rocas, de otras canteras o zonas de Venezuela.
- ✚ Realizar un estudio de flotabilidad de las rocas utilizadas, evaluando la adsorción de cada uno de los surfactantes seleccionado, mediante el análisis de la fase acuosa. Donde se podrán obtener la concentración de los elementos, de la disolución parcial de los minerales presente en la roca a través de la técnica de ICP ó Absorción atómica.
- ✚ Validar mediante la utilización del molino coloidal (proceso B), los surfactantes Emulsiv® M175 (RL) y Emulsiv® M375 (RR), con el tipo de roca Cal. – CVG (Edo. Anzoátegui) y Gns. – Pal. S. (Edo. Bolívar). Debido al buen comportamiento obtenido en las mezclas asfálticas.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alexander, J. (1924) *Colloid chemistry*. New Cork, D. Van Nostrand. p. 102.
2. American society for testing and materials (ASTM). (1992) Norma D-1079. Standard definitions of terms relating to roofing waterproofing and bituminous materials.
3. ASFALCHILE. (2008) *Catalogo de pavimentación* capitulo 5
4. Batista, A. y Maigón, R. (1993) *Caracterización mecánica de la estabilización de un suelo a base de emulsiones asfálticas y consideraciones estadísticas sobre los diseños de mezcla en 22 suelos de Venezuela*. Trabajo de grado no publicado. Universidad Central de Venezuela, Núcleo Aragua.
5. Becher, P. (1972) *Emulsiones teoría y practica*. (1ª ed.) Editorial Blume.
6. BITUMIX CVV, (2005) *catalogo de Lechadas asfálticas*.
7. Clayton, W. (1943) *Theory of emulsions*. 4th Ed. Philadelphia, The Blakiston Co., (quoting F. Selmi's definition of 1845) p. 1.
8. Dana, D. J. (1998) *Manual de mineralogía*. (4a ed.). Barcelona, España: Reverte S.A.
9. Diaz, C. (2001) *Estudio del fenómeno de adsorción de crudo sobre superficie mineral en presencia y ausencia de surfactante*. Trabajo de grado no publicado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
10. Duarte, M.M. (1999) *Estudio de la influencia de surfactantes en la adsorción de asfaltenos sobre sílica. Correlación con la formación de agregados*. Trabajo de grado no publicado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
11. Eckmann, F.; Potti, J.; LE Roux, A. y Sanchez Polo, J. (2001) *Caracterización de los áridos en relación con los fenómenos de ruptura de las emulsiones en las mezclas en frío* RGRA N°798
12. Encyclopedia Britanica. 14th Ed. 8, p. 416.
13. Espinoza, M. D. (2001) *Caracterización química y morfológica de los minerales presente en perfiles lateríticos*. Trabajo de grado no publicado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.



14. Fernandez, H., Gutierrez, H., Madrid, C. y Santander, N. (1977) *Pavimentos*. (1^o ed.). AICUDEM. Medellín – Colombia. p. 117
15. FUNDALANAVIAL, (2007) Fundación Laboratorio Nacional de Vialidad.
16. Herrera, T. (2007) *Efecto de las emulsiones asfálticas sobre la adsorción de fósforo en suelos ácidos*. Trabajo de grado no publicado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
17. INVEAS (2007) Instituto Nacional Venezolano de Asfalto
18. Izatt, J.O. (1982) Asphalt. *Enciclopedia of chemical processing and design*. John Mcketta ed. Vol. 3. New York, 419-461, 493.
19. López, L. (2006) *Guía de geoquímica orgánica*. Caracas.
20. Mantilla, C.; Pedraza, J.; La Verde, D. (2007) *Utilización de estudios de potencial zeta en el desarrollo de un proceso alternativo de flotación de mineral feldespático*.
21. Méndez, B. J. (2004) *Manual de petrología*. (1^a ed.). Caracas.
22. Mercado, R. (2006) *Rompimiento de una emulsión asfáltica sobre un agregado sólido*. Trabajo de grado. Universidad de Los Andes Mérida – Venezuela.
23. Moreno de Matos, V., García, E. y Prado, L. (2006) *Estudio comparativo del comportamiento del Slurry Seal utilizando agregados de tipo calcáreo y síliceo*.
24. Prato, J.G. (1999) *Heterofloculación de una emulsión asfáltica (catiónica) sobre un medio granulado*. Informe técnico FIRP 9911, Universidad de Los Andes Mérida – Venezuela.
25. Ranaudo, M.A. (2002) *Estudios de adsorción de asfaltenos sobre superficies minerales. Relación con sus propiedades coloidales*. Trabajo de ascenso. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
26. Rivera, G. (1977) *Emulsiones asfálticas*. Representaciones y servicios de ingeniería S.A. México.
27. Rodríguez, L. (2001-a) *Reducción de componentes orgánicos emitidos durante el proceso de mezcla y compactación de asfalto para pavimentación*. Trabajo de grado no publicado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
28. Rodríguez, M. (2001) *Inhibición de la precipitación de asfaltenos con resinas*. Cuaderno de Laboratorio FIRP. Mérida – Venezuela.



29. Rodríguez, R.; Castaño, V. y Martínez, M. (2001-b) *Emulsiones asfálticas*. SCT Instituto Mexicano del Transporte. Documento N° 23. Sanfandila, Qro.
30. Romero, A. (2006) *Importancia de los surfactantes catiónicos en el diseño de emulsiones asfáltica*. 3 Simposio Venezolano de asfalto.
31. Salager, J. (1991) *Uso de los surfactantes en la industria petrolera*. Cuaderno de Laboratorio FIRP 350. Universidad de Los Andes Mérida – Venezuela.
32. Salager, J. (1993-b) *Doble capa eléctrica interfacial*. Cuaderno de Laboratorio FIRP 610. Universidad de Los Andes Mérida – Venezuela
33. Salager, J. (1993-a) *Emulsiones: propiedades y formulación*. Cuaderno de Laboratorio FIRP 231. Universidad de Los Andes Mérida – Venezuela
34. Salager, J. (1999) *Introducción y conceptos de formulación fisicoquímica*. Cuaderno de Laboratorio FIRP S747-A. Universidad de Los Andes Mérida – Venezuela.
35. Salager, J. (1999-b) *Propiedades de las emulsiones y su medición*. Cuaderno de Laboratorio FIRP S747-B. Mérida – Venezuela.
36. Salager, J.L. (2002) *fenómenos interfaciales en dispersiones polifásicas y en medios porosos*. Cuaderno de Laboratorio FIRP S122-N. Mérida – Venezuela.
37. Salager, J. y Fernández, A. (2004-a) *Surfactantes generalidades y materias primas*. Cuaderno de Laboratorio FIRP S301-PP. Mérida – Venezuela.
38. Salager, J. y Fernández, A. (2004-b) *Surfactantes catiónicos y otros surfactantes*. Cuaderno de Laboratorio FIRP S304-PP. Mérida – Venezuela.
39. Skoog, D.A. y Leary, J.J. (1996) *Análisis instrumental* (4° Edición) España: Editorial Mc Grawhill. 935p.
40. The Asphalt Institute (TAI), (1979). *A Basic asphalt emulsion Manual: Understanding and using emulsions*. Vol. 1. Maryland.
41. Tissot, B.P. y Welte, D.H. (1984) *Petroleum formation and occurrence* (2° Edición). Germany.
42. Urbina de Navarro, C. (2006) *Preparación de muestras de materiales para su observación por Microscopía Electrónica*. Trabajo de grado no publicado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SEGÚN NORMAS

- Abrasión por Inmersión (A.S.T.M. D 3910 – 80a)
- Adhesión a través de la Prueba de Ebullición en Agua (Boiling Water Test)
A.S.T.M D3625
- Análisis visual (A.S.T.M. D2488)
- Cohesión (Esta investigación aparece publicada de ISSA 1985 de la convención 12 en Nueva Orleans)
- Consistencia (A.S.T.M. C-128)
- Granulometría (A.S.T.M. E11)
- Retenido en malla N° 20 (A.S.T.M. D244, COVENIN 1198-92)
- Residuo por evaporación (A.S.T.M. D244, COVENIN 1057-92)
- Sedimentación a los 5 días (A.S.T.M. D244, COVENIN 934-32)
- Viscosidad Saybolt - Furol (A.S.T.M. D244 - 88)



APÉNDICES



APÉNDICE A

Ecuación para determinar el % pasante mediante el ensayo de granulometría aplicando la normativa A.S.T.M. E11, mediante un tamiz como se muestra a continuación.

$$\% \text{ pasante} = \frac{(P_{o1} - P_{o2})}{P_o} \times 100\%$$

P_{o1} = Peso del tamiz más el contenido de material disgregado antes de la prueba.

P_{o2} = Peso del tamiz más el contenido de material disgregado después de la prueba.

P_o = Peso del material disgregado inicial.

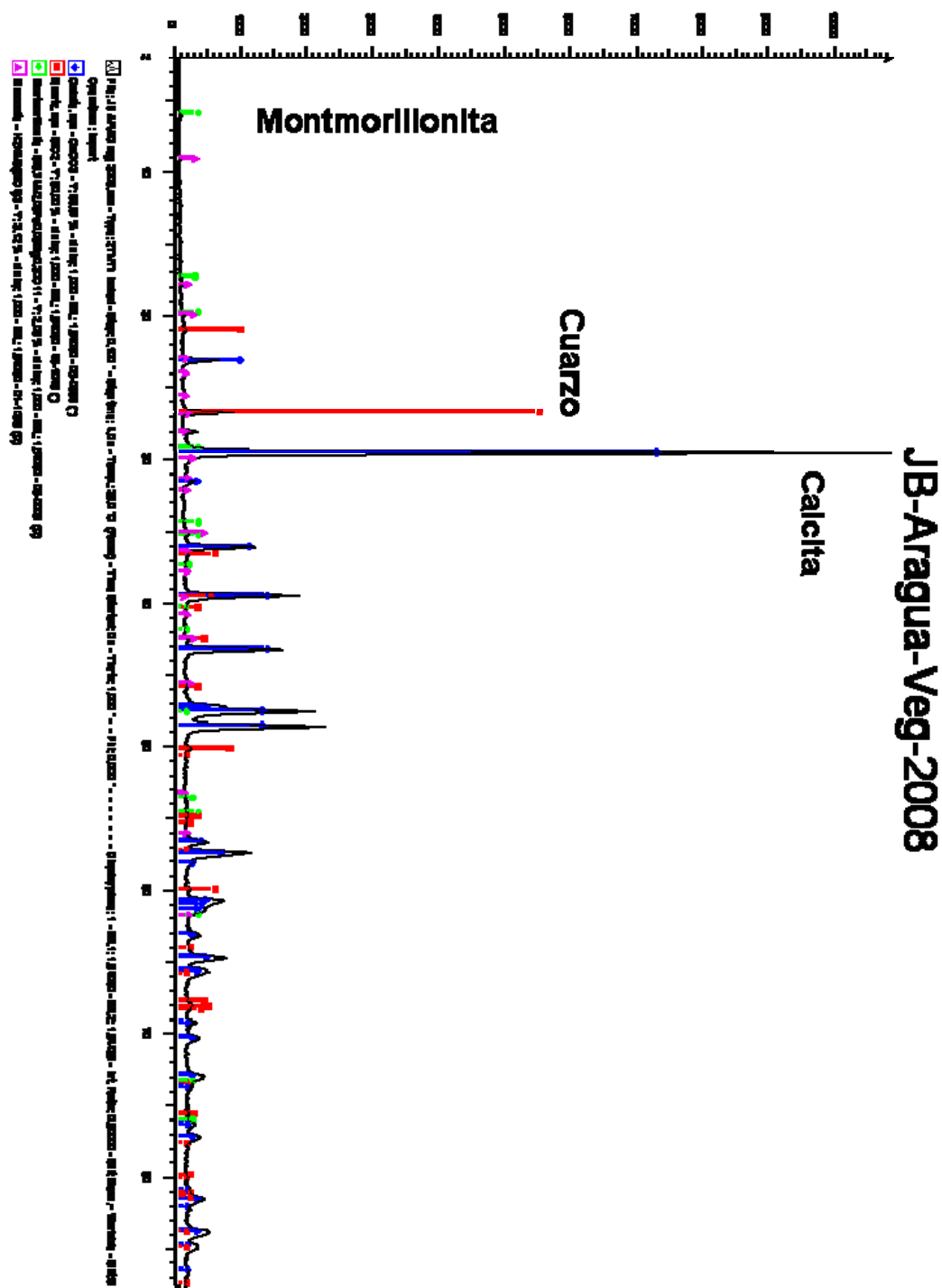
Resultado de los valores obtenidos del ensayo pérdida al rojo realizado a las muestras de caliza.

Muestra	Peso (g) del crisol	Peso (g) Crisol+muestra	Muestra (g)	Peso(g) Crisol final	CaCO ₃ (g)	CaCO ₃ (%)
Cal. - Veg.	19,8817	21,7178	2,0381	20,8017	0,8161	40,08
Cal. - Emp.	21,8496	23,9203	2,0707	23,0364	0,8848	42,73
Cal. - CVG	19,3383	21,3942	2,0579	20,8144	0,7798	37,89



APÉNDICE B

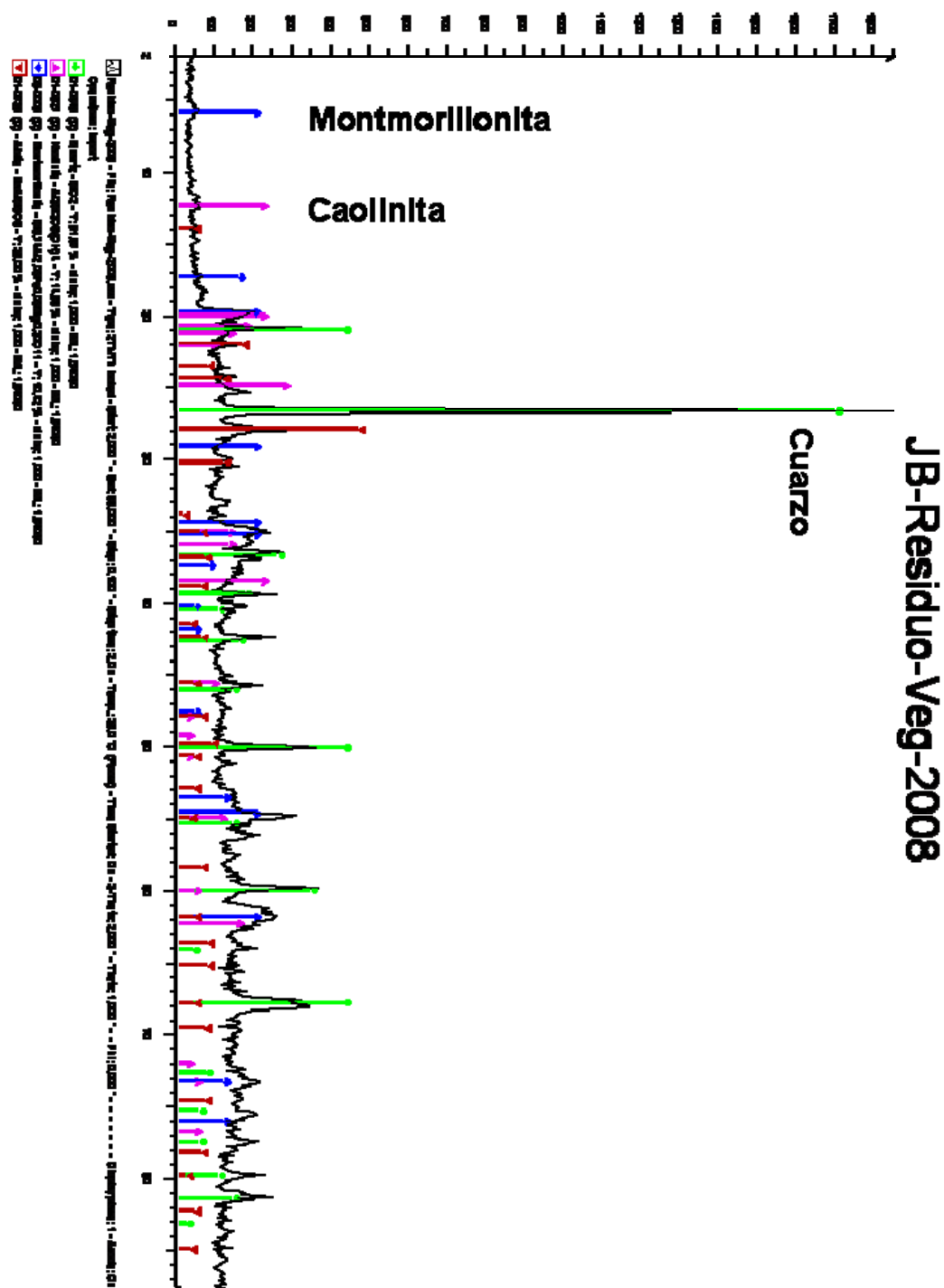
Espectro del análisis de Difracción de Rayos X realizado a la muestra Cal. - Veg (JB-Arag.-Veg.-2008)





APÉNDICE B

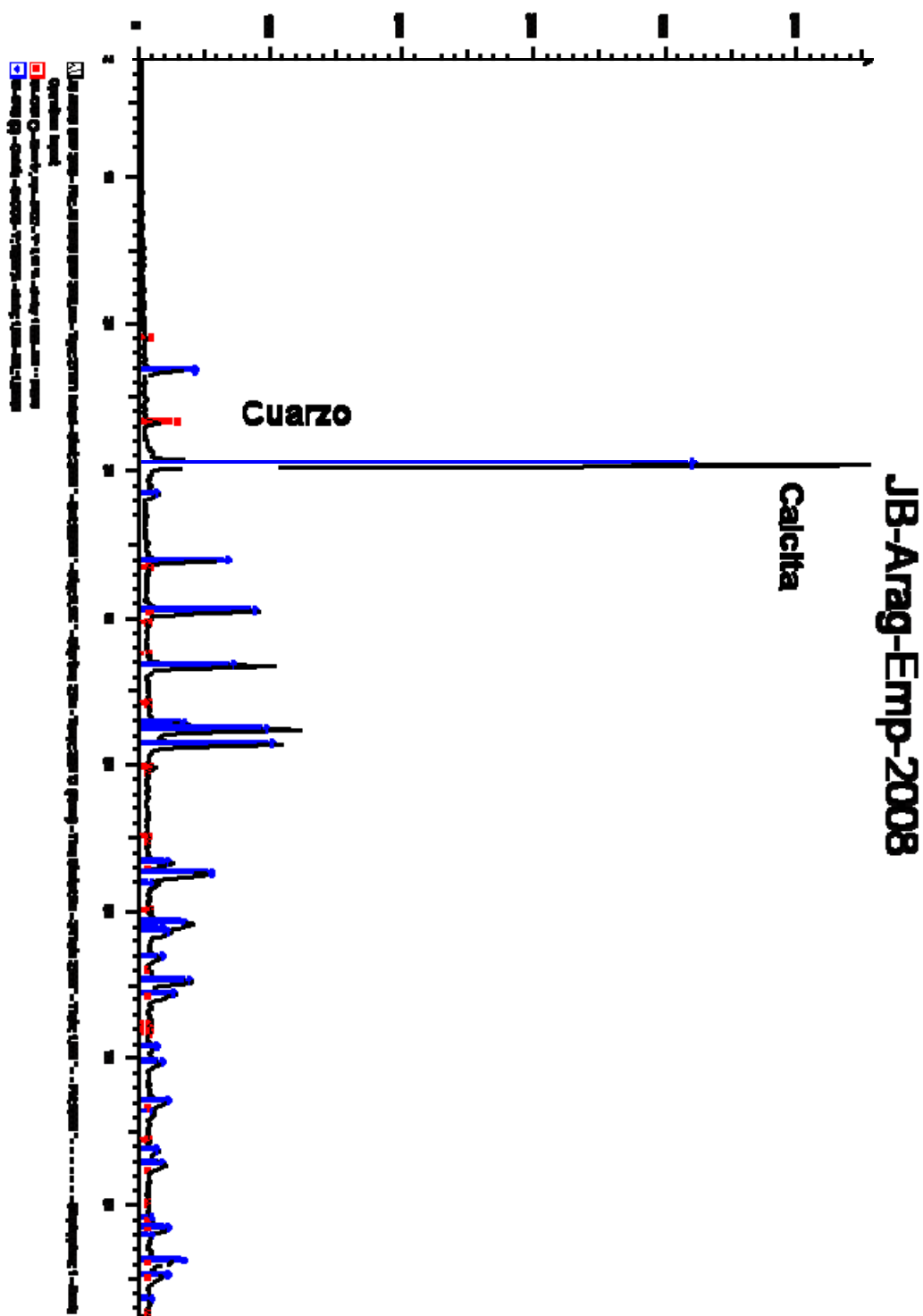
Espectro del análisis de Difracción de Rayos X realizado al residuo para determinar tipos de arcillas presente en la muestra Cal. - Veg (JB-Arag.-Veg.-2008)





APÉNDICE C

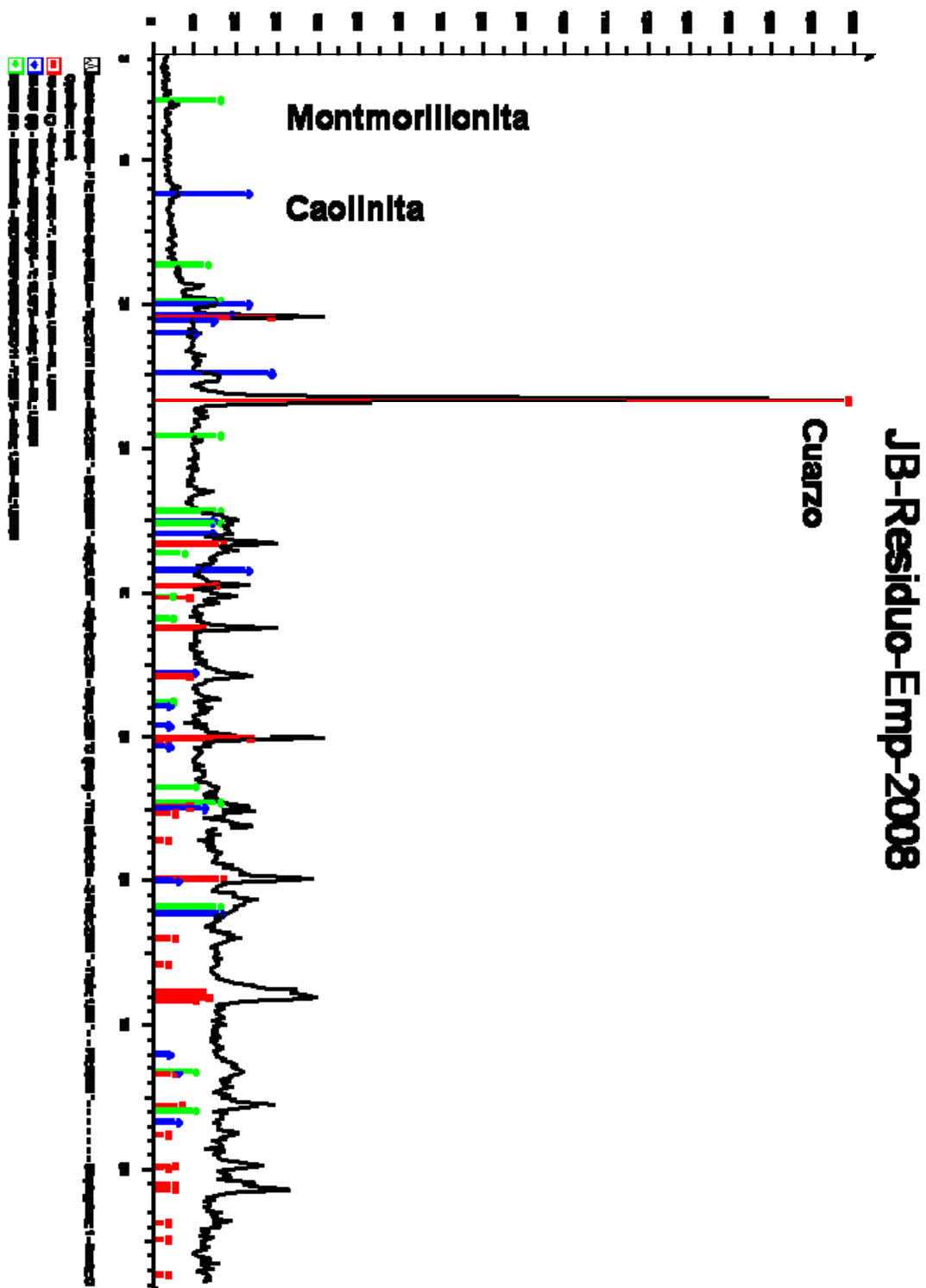
Espectro del análisis de Difracción de Rayos X realizado a la muestra Cal. – Emp. (JB-Arag.-Emp.-2008)





APÉNDICE C

Espectro del análisis de Difracción de Rayos X realizado al residuo para determinar tipos de arcillas presente en la muestra Cal. – Emp. (JB-Arag.-Emp.-2008)



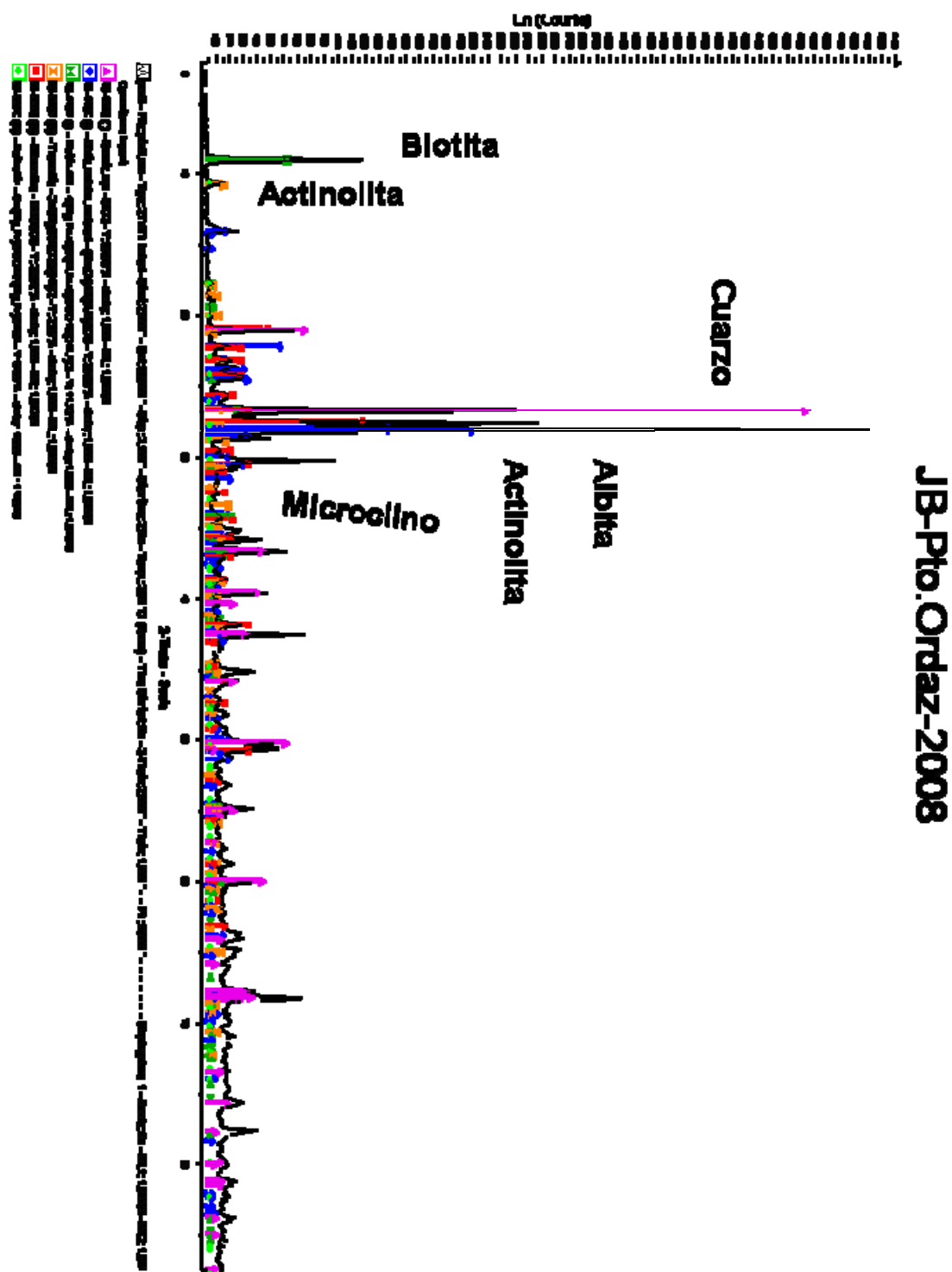
Espectro del análisis de Difracción de Rayos X realizado a la muestra Cal. – CVG. (JB-Anzoátegui-2008)





APÉNDICE E

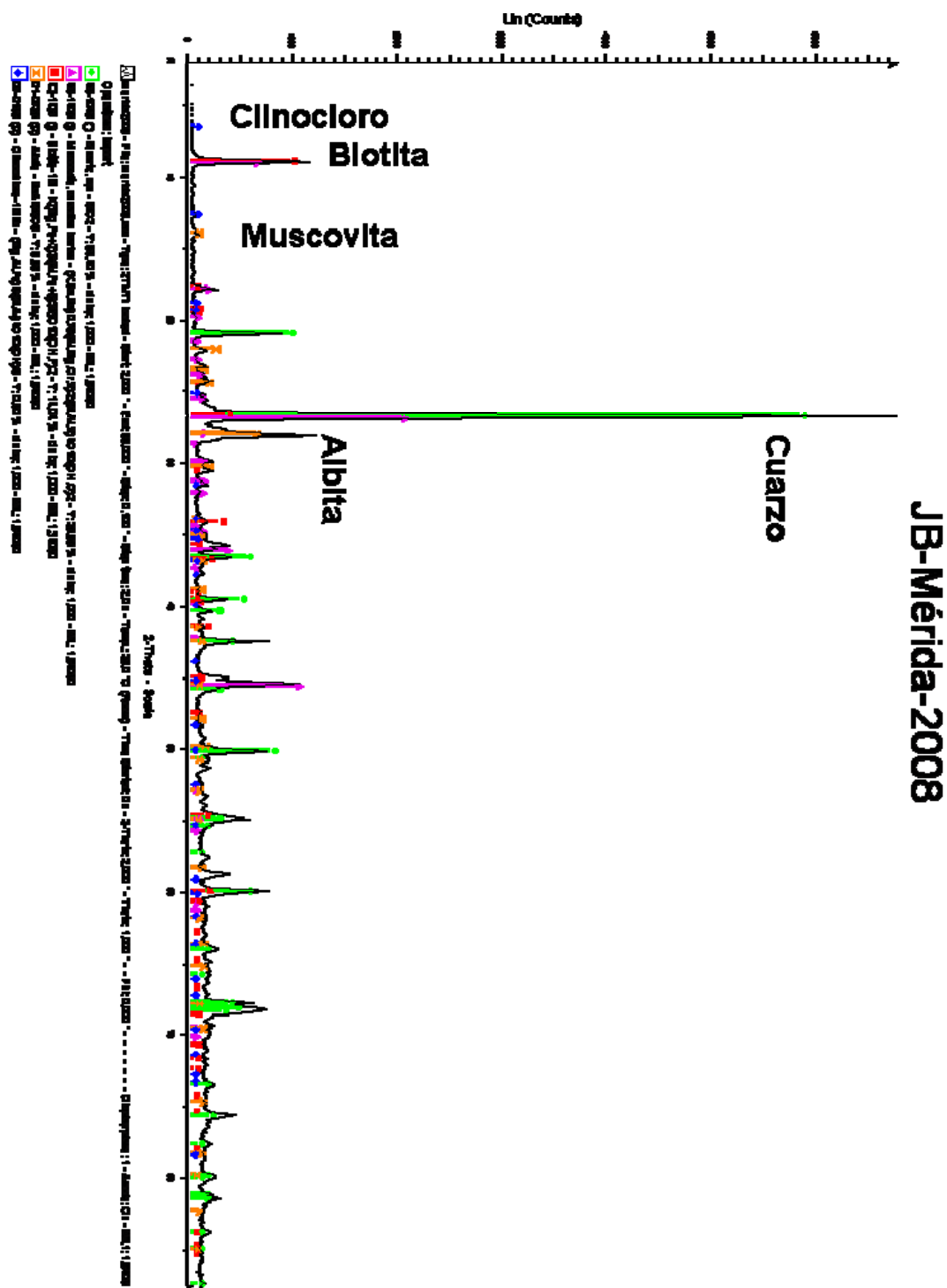
Espectro del análisis de Difracción de Rayos X realizado a la muestra Gns. – Pal. S. (JB-Pto. Ordaz.-2008)





APÉNDICE F

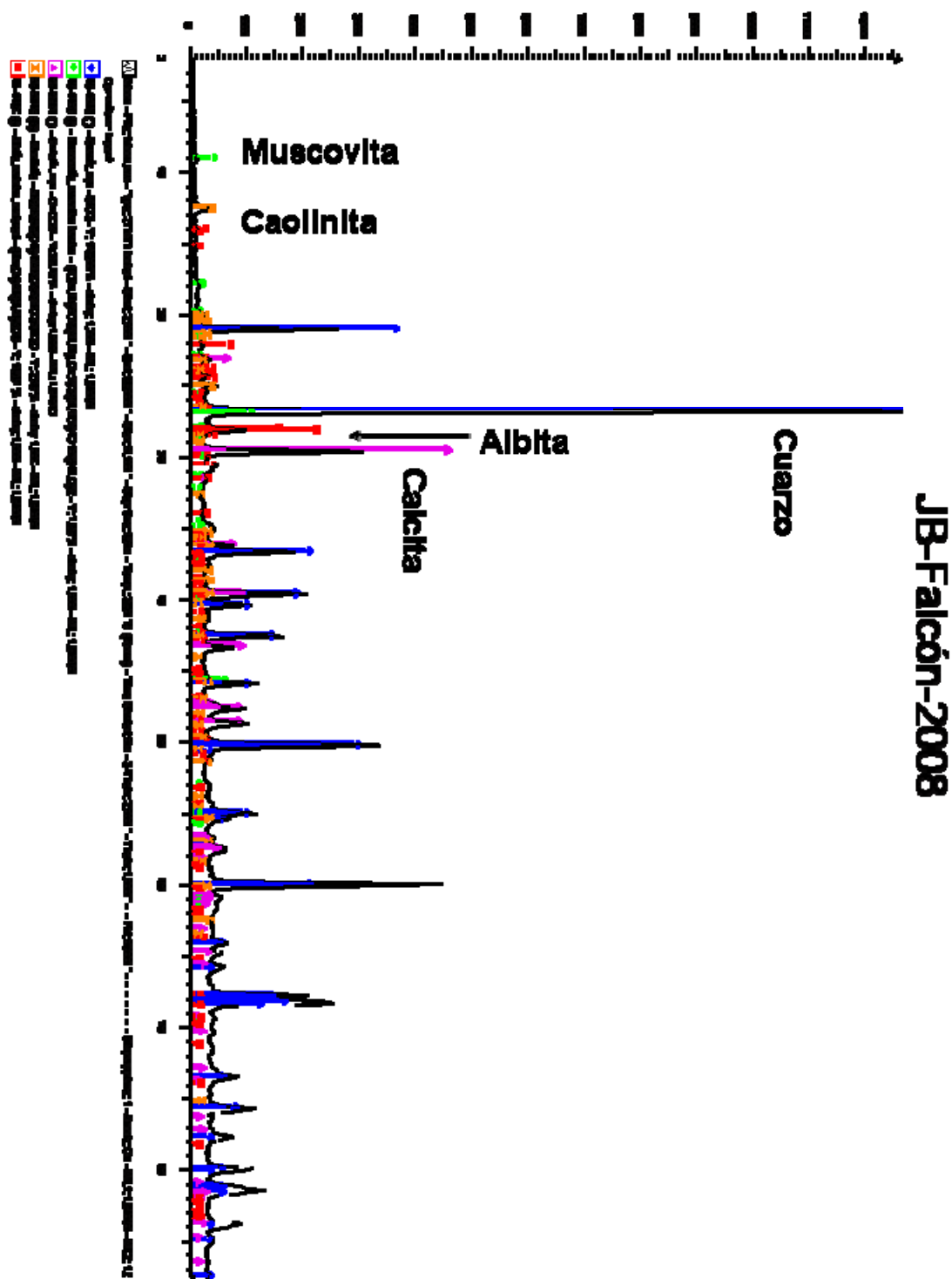
Espectro del análisis de Difracción de Rayos X realizado a la muestra Gns. – Los Andes. (JB-Mérida-2008)





APÉNDICE G

Espectro del análisis de Difracción de Rayos X realizado a la muestra Aren. - Falcón. (JB-Falcón-2008)





APÉNDICE H

Ecuaciones para determinar el % Retenido, % Residuo y % Sedimentación según las normas:

- ✓ Retenido en malla N° 20 (A.S.T.M. D244, COVENIN 1198-92)

$$\% \text{ Retenido} = \frac{(P_r - P_o)}{P_{EA}} \times 100$$

P_r = Peso del tamiz más el retenido en gramos

P_o = Peso del tamiz en gramos

P_{EA} = Peso de la cantidad de emulsión asfáltica en gramos

- ✓ Residuo por evaporación (A.S.T.M. D244, COVENIN 1057-92)

$$\% \text{ Residuo} = \frac{(P_r - P_o)}{P_{EA}} \times 100$$

P_r = Peso del recipiente, agitador y la emulsión asfáltica en gramos

P_o = Peso del recipiente en gramos

P_{EA} = Peso de la cantidad de emulsión asfáltica en gramos

- ✓ Sedimentación a los 5 días (A.S.T.M. D244, COVENIN 934-32)

$$\% \text{ Sedimentación} = \frac{V_r}{V_{EA}} \times 100$$

V_r = Volumen de la fase separada en mL.

V_{EA} = Volumen de la cantidad de emulsión asfáltica en mL.



APÉNDICE I

Ecuación para calcular el % de agua de premezcla para realizar las mezclas asfálticas.

- 1.- Utilizar el % del residuo por evaporación obtenido de la emulsión asfáltica.
- 2.- Fijar el contenido de emulsión asfáltica a ser utilizada en la mezcla asfáltica.
- 3.- Fijar un % de agua de premezcla para observar el comportamiento en la mezcla asfáltica.

A continuación se presenta un ejemplo para calcular el % de agua de premezcla para 100 gramos de roca utilizando 14 gramos de emulsión asfáltica:

% Residuo de asfalto = 60%

Gramo de asfalto en el contenido de emulsión asfáltica = $14\text{g} \times 0.60 = 8,4\text{g}$.

Gramo de agua que aporta la emulsión asfáltica = $14\text{g} - 8,4\text{g} = 5,6\text{g}$.

% Agua de premezcla = 8% (fijado para observar el cubrimiento)

Gramos de agua añadir = $8\text{g} - 5,6\text{g} = 2,4\text{g}$

La cantidad de agua añadir (2,4g) representa el 8% de agua de premezcla en la mezcla asfáltica.



APÉNDICE J

Mallado realizado para cuantificar en % de cubrimiento donde no cubrió la emulsión asfáltica

Foto sin el mallado:



Foto con el mallado de 10x10cm.



% Cubrimiento = 70%

% No Cubrimiento = 30%

Las X representan los espacios en donde no hay cubrimiento de la emulsión asfáltica en la superficie mineral.



APÉNDICE K

Ecuación para calcular el ensayo de adhesión a través de la prueba de ebullición en agua (Boiling Water Test) según la norma A.S.T.M D 3625

$$\% \text{ Lavado} = 100 - \left[\frac{(P_o - P_f)}{P_o} \times 100\% \right]$$

P_o = Peso inicial de la mezcla asfáltica

P_f = Peso final de la mezcla asfáltica

Surfactantes	Dosis %	Carga	Ruptura	Cal. - Veg.	Cal. - Bnp.	Cal. - CVG	Gns. - Pat. S	Gns. - Los Andes
Emulsión 195/95 + TAP 100	1,37 ± 0,2	63	99	22,39 ± 2,08	11,41 ± 0,88	4,38 ± 2,38	11,08 ± 2,78	11,98 ± 0,82
Emulsión 195/07 + TAP 100	1,37 ± 0,2	63	99	X	6,38 ± 0,08	4,77 ± 2,48	X	12,18 ± 0,82
Emulsión M375	1,1	63	99	X	X	4,68 ± 2,48	11,08 ± 2,78	X
Emulsión M1785	1,2	63	99	22,14 ± 2,08	2,77 ± 5,06	3,08 ± 2,38	11,14 ± 2,78	X
Emulsión M475	0,9	63	99	22,38 ± 2,08	11,82 ± 0,88	10,88 ± 2,38	X	22,92 ± 0,82
Emulsión M175	0,9	63	99	22,37 ± 2,08	12,81 ± 0,88	3,88 ± 2,38	22,88 ± 2,78	22,92 ± 0,82
Emulsión M515	0,9	63	99	X	X	X	X	3,88 ± 0,82
Emulsión M325	0,9	63	99	X	X	2,76 ± 2,48	X	X

Leyenda:

.- Los valores son el resultado del promedio ± Desviación estándar

.- Las X representan las muestras que no se realizaron debido al descarte realizado en la evaluación de cubrimiento.



APÉNDICE L

A continuación se presenta la ecuación del ensayo de inmersión por abrasión realizado a las mezclas asfálticas preparadas a partir de la emulsión asfáltica del proceso B (molino coloidal).

$$Fa = \frac{(P_{\bullet 1} - P_{\bullet 2})}{A}$$

Fa = Factor de abrasión en g/m²

P_{•1} = Peso de la base más el espécimen antes de la prueba.

P_{•2} = Peso de la base más el espécimen después de la prueba.

A = área de abrasión 0,0.3054m²

A continuación se presenta los resultados obtenido del ensayo de cohesión realizado a las mezclas asfálticas en los cinco tipos de rocas.

Muestras	Tiempo	Cohesión Kg/cm	
		Tipo II	Tipo III
Cml. - Vag.	0	11	14
	30	18	21
	45	23	23
	60	26	27
Cml. - Emp.	0	11	14
	30	16	17
	45	18	20
	60	20	22
Cml. - CVG	0	14	8
	30	18	17
	45	18	20
	60	22	21
Gm. - Pol. S.	0	12	10
	30	16	18
	45	18	19
	60	20	20
Gm. - Los Andes	0	14	16
	30	19	20
	45	26	26
	60	27	28