

**CONCEPCIÓN DE UN ENSAYO PARA ESTABLECER EL EFECTO DE LA
PRESIÓN DE PORO EN EL DETERIORO POR HUMEDAD DE LAS MEZCLAS
ASFÁLTICAS**

**GUIDO ABDIEL GAMBA GONZÁLEZ
JULIETA ALEXANDRA MERCADO ORTEGA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2004

**CONCEPCIÓN DE UN ENSAYO PARA ESTABLECER EL EFECTO DE LA
PRESIÓN DE PORO EN EL DETERIORO POR HUMEDAD DE LAS MEZCLAS
ASFÁLTICAS**

**GUIDO ABDIEL GAMBA GONZÁLEZ
JULIETA ALEXANDRA MERCADO ORTEGA**

**Proyecto presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Civil**

Director

**EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZON
Ingeniero Civil, Msc. Phd Candidate**

Codirector

**JHON WILSON CORREA AVELLO
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2004

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos:

Ing. Eduardo Castañeda Pinzón

Ing. Hernando Acevedo Ferrín

Escuela de Ingeniería Civil, Ing. Germán García

Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Adolfo Arenas y Henry Cruz.

Miguel Agudelo, Jairo Hernández y Germán Hernández

Paviandi Ltda. y Esgamo Ltda..

Corasfaltos

A nuestros familiares y amigos.

A la sala de tinto por ser la mejor opción para salir de la rutina

CONTENIDO

		Página
	INTRODUCCIÓN	1
1.	GENERALIDADES DEL ASFALTO	3
1.1	DEFINICIÓN	3
1.2	COMPOSICIÓN QUÍMICA	6
1.2.1	Los Asfaltenos	6
1.2.2	Los Maltenos	8
1.2.2.1	Los Saturados	8
1.2.2.2	Los Aromáticos Polares	9
1.2.2.3	Los Nafteno-Aromáticos	11
1.3	NATURALEZA FÍSICO-QUÍMICA DE LOS ASFALTOS	12
1.3.1	Características Reológicas	13
1.4	FUNCIONES DE LOS ASFALTOS	14
1.5	ENVEJECIMIENTO DEL ASFALTO	15
1.5.1	Remoción del Asfalto por Acción del agua	16
2.	AGREGADOS	17
2.1	CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS SEGÚN SU ORIGEN	17
2.1.1	Rocas Ígneas	17
2.1.2	Rocas Sedimentarias	18
2.1.3	Rocas Metamórficas	19
2.2	CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS SEGÚN SU AFINIDAD POR EL AGUA	19
2.2.1	Agregados Hidrofóbicos	19
2.2.2	Agregados Hidrofilicos	20
2.3	CLASIFICACIÓN SEGÚN SU CARÁCTER ÁCIDO-BÁSICO	20
2.3.1	Agregados Básicos	20

2.3.2	Agregados Ácidos	20
2.4	DEGRADACIÓN DE LOS AGREGADOS MINERALES DURANTE LA VIDA ÚTIL DEL PAVIMENTO	21
2.4.1	Incidencia de los Factores Geológicos	22
2.4.1.1	Naturaleza Genéticas de las Rocas	22
2.4.1.2	Factores Estructurales	23
2.4.1.3	Alteración por Intemperismo	23
2.4.2	Incidencia de los Procesos de Producción	24
2.4.2.1	Voladura, Extracción, Trituración	24
2.4.2.2	Lavado, Clasificación, Transporte y Almacenamiento	24
2.4.2.3	Intemperismo Durante los Procesos de Producción	24
2.4.3	Incidencia de los Procesos Constructivos	25
2.4.3.1	Transporte, Distribución, Mezclado y Humedecimiento	25
2.4.3.2	Calentamiento	25
2.4.3.3	Compactación	25
2.4.3.4	Intemperismo Durante el Proceso de Construcción	26
2.5	COMPORTAMIENTO DURANTE LA VIDA DE SERVICIO	26
2.5.1	Reacción con Ligantes y Aditivos	26
2.5.2	Adherencia de los Agregados con Ligantes Bituminosos	26
3.	LA MEZCLA ASFÁLTICA	28
3.1	PROPIEDADES DEL AGUA	28
3.2	BASES DE LA ADHERENCIA	29
3.2.1	Fundamentos del Comportamiento Adhesivo	29
3.3	PROPIEDADES DEL LIGANTE QUE INFLUYEN EN LA ADHERENCIA	30
3.3.1	Tensión Superficial	30
3.3.2	Envoltura y Cubrimiento	30

3.3.3	Viscosidad	32
3.3.4	Composición y Procedencia del Asfalto	33
3.3.5	Resistencia al Envejecimiento	33
3.4	PROPIEDADES DEL AGREGADO MINERAL QUE INFLUYEN EN LA ADHERENCIA	33
3.4.1	Mineralogía	33
3.4.2	Rugosidad Superficial	34
3.4.3	Porosidad	35
3.4.4	Recubrimiento de la Superficie	35
3.5	CONSIDERACIONES TEÓRICAS DE LA ADHERENCIA	36
3.5.1	Envoltura	36
3.5.2	El Mecanismo de la Adherencia	36
3.5.3	Teoría de la Adhesión Mecánica	37
3.5.4	Teoría de la Adhesión Específica	37
3.5.4.1	Teoría de la Polarización	37
3.5.4.2	Teoría de la Difusión	38
3.5.4.3	Teoría de la Adsorción	38
3.5.4.4	Teoría de la Dispersión	38
3.5.4.5	Quimiosorción	39
3.6	FACTORES EXTERNOS QUE INCIDEN EN LA ADHERENCIA	39
3.6.1	El Agua	39
3.6.2	El Clima	41
3.6.3	El Oxígeno	42
3.6.4	Las Cargas Debidas al Tránsito	42
3.7	CAUSA Y PREVENCIÓN DEL DESVESTIMIENTO DE AGREGADOS EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	43
3.7.1	Agua En o Sobre el Agregado	45

3.7.2	Tipo de Agregado	45
3.7.3	Emulsificación Espontánea	46
3.7.4	Edad de Apilamiento	46
3.7.5	Agregado Cubierto de Finos	47
3.7.6	Agua Libre	47
3.7.7	Altos Vacíos de Aire	47
3.7.8	Exceso de Aditivo Anti-Desvestimiento	48
3.8	TIPOS DE DESVESTIMIENTO	48
3.8.1	Teoría de la Separación o Desprendimiento Termodinámico de la Película Asfáltica	48
3.8.2	Teoría del Desplazamiento por Retracción de la Envuelta	49
3.8.3	Teoría de la Rotura de la Película	50
3.8.4	Teoría de la Presión de Poros	50
3.8.5	Teoría de la Abrasión Hidráulica	51
4.	ANÁLISIS	52
4.1	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	52
4.2	EVALUACIÓN	53
4.2.1	Normatividad Norteamericana	53
4.2.1.1	Método de Lottman o Tensión Indirecta	53
4.2.1.1.2	AASHTO T 283	54
4.2.1.2	Root Test (ASTM D 4867)	54
4.2.1.3	Boiling Test (ASTM D 3625)	55
4.2.1.4	Ensayo de Inmersión – Compresión (ASTM D 1075 – AASHTO T 165)	55
4.2.1.5	Freeze – Thaw Pedestal Test	55
4.2.1.6	Net Adsorption Test	57
4.2.2	Normatividad Colombiana	57

4.2.2.1	Ensayo de Inmerso – Compresión (Efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas asfálticas compactadas) (I.N.V.E. – 738)	57
4.2.2.2	Método de Riedel – Weber. (Adhesividad de los Ligantes Bituminosos a los Agregados Finos) (I.N.V.E. – 744)	58
4.2.2.3	Tensión Indirecta (AASHTO T – 283 - INVIAS E – 749)	59
4.2.2.4	Efecto del agua sobre las Mezclas asfálticas sueltas (I.N.V.E. – 757)	59
4.2.2.5	Características de las mezclas bituminosas abiertas por medio del Ensayo de Cántabro de pérdida por desgaste (I.N.V.E. – 760)	60
4.2.2.6	Ensayo de Resistencia a la Deformación Plástica de las Mezclas Asfálticas mediante la pinta del ensayo de laboratorio (I.N.V.E. – 756)	60
4.3	ESTUDIOS ANTECEDENTES	61
4.3.1	Estudios realizados sobre adherencia	61
4.3.1.1	Estudios efectuados a nivel internacional	61
4.3.1.2	Estudios efectuados a nivel regional	63
4.3.1.2.1	Estudio de la Adherencia y las Interacciones agregado-asfalto	63
4.3.1.2.2	Estudio de los Fenómenos de Adherencia (Stripping) y los ensayos de evaluación de comportamiento de la interfase árido-ligante en mezclas asfálticas	63
4.3.1.2.3	Estudio de Adherencia agregado-asfalto empleando estabilidad sumergida	64
4.3.1.2.4	Estudio comparativo de ensayos para determinar la adherencia agregado-asfalto	64
4.3.1.2.5	Estudio para la elaboración de ensayos con carga dinámica que permitan determinar el efecto del agua sobre las mezclas de concreto asfáltico	65
4.3.1.2.6	Estudio de la adherencia agregado-asfalto en presencia de Presión de Poro	65
4.3.2	Estudios propuestos para medir la Adherencia	66

4.3.2.1	Cualitativos	66
4.3.2.1.1	Ebullición en agua durante 10 minutos	66
4.3.2.1.2	Procedimiento WST	66
4.3.2.1.3	Pedestal de Texas	67
4.3.2.1.4	Gagle	67
4.3.2.1.5	Hamburg Wheel Tracking Test	67
4.3.2.2	Cuantitativos	68
4.3.2.2.1	Desvestimiento (Dinámico)	68
4.3.2.2.2	Abrasión en Agua Fría (Minnesota)	68
4.3.2.2.3	Abrasión Superficial (California)	68
4.3.2.2.4	Test de Susceptibilidad al Vapor de Humedad (California)	68
4.3.3	Estudios realizado sobre Presión de Poro	68
4.4	PROPUESTA DEL ESTUDIO	69
5.	METODOLOGÍA	70
5.1	MATERIALES UTILIZADOS	70
5.1.1	Agregados	70
5.1.1.1	Caracterización de los Agregados	72
5.1.2	Asfalto	75
5.1.2.1	Características Reológicas del Asfalto	76
5.2	DISEÑO DE LA MEZCLA	76
5.2.1	Granulometría Utilizada	77
5.2.2	Porcentaje de Asfalto utilizado	79
5.3	ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS	80
5.3.1	Resumen Gráfico	83
5.3.2	Resumen Esquemático	88
5.4	CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS	89
5.4.1	Nomenclatura	89

5.4.2	Ensayos de Caracterización	90
5.5	ACONDICIONAMIENTO	92
5.5.1	Determinación del Acondicionamiento	92
5.5.2	Acondicionamiento Aplicado	94
5.5.3	Equipos Utilizados	95
5.5.4	Procedimiento	98
5.6	EVALUACIÓN DE LAS RESISTENCIAS DE LAS PROBETAS	99
6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	101
6.1	PROBETAS CON CONTENIDO APROPIADO DE ASFALTO	101
6.1.1	Evaluación del efecto de la Presión de Acondicionamiento	101
6.1.2	Análisis del efecto del Preacondicionamiento	103
6.1.3	Índices de Resistencia Conservada	104
6.2	BAJO CONTENIDO DE ASFALTO	106
6.2.1	Evaluación el efecto de la Presión de Acondicionamiento con bajo contenido de Asfalto	106
6.2.2	Análisis del efecto de un Preacondicionamiento en probetas con bajo contenido de Asfalto	108
6.2.3	Índices de Resistencia Conservada	110
6.3	DESEMPEÑO DE LAS FUENTES DE AGREGADO	111
6.4	RELACIÓN CON ESTUDIOS ANTERIORES	112
7.	OBSERVACIONES	115
8.	RECOMENDACIONES	116
9.	CONCLUSIONES	117
	ANEXO A. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS	119
	ANEXO B. CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE ASFALTO	125

	ANEXO C. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS	126
	ANEXO D. CALIBRACIÓN DE LA MÁQUINA UNIVERSAL	129
	ANEXO E. RESISTENCIA DE LAS PROBETAS A COMPRESIÓN SIMPLE	131
	BIBLIOGRAFÍA	133
	REFERENCIAS	135

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1	Estructura molecular de los hidrocarburos parafínicos	4
Figura 2	Estructura molecular de los aromáticos	4
Figura 3	Estructura del asfaltos	6
Figura 4	Estructuras hipotéticas de los compuestos del asfalto	7
Figura 5	Estructuras hipotéticas de los asfaltenos	10
Figura 6	Estructuras hipotéticas de los saturados	10
Figura 7	Estructuras hipotéticas de las resinas	11
Figura 8	Estructuras hipotéticas de los nafteno-aromáticos	12
Figura 9	Proceso de cubrimiento de la superficie del agregado por el asfalto	14
Figura 10	Tipos de grupos funcionales de oxidación formados en el asfalto durante el envejecimiento	15
Figura 11	Esquema del Cubrimiento del Agregado Mineral por el asfalto	31
Figura 12	Representación Esquemática de la Influencia de la Tensión Superficial sobre el Cubrimiento Producido por un Líquido	31
Figura 13	Influencia de la Viscosidad del Asfalto sobre el Cubrimiento de un Líquido sobre un Sólido	32
Figura 14	Características del Enlace Árido-Ligante	37
Figura 15	Polaridad de las Moléculas de Agua	41
Figura 16	Desplazamiento del Asfalto por el Agua en la Superficie del Agregado	49
Figura 17	Generación del Mecanismo de Presión de Poro	51
Figura 18	Cantera sobre el Río Chicamocha	70
Figura 19	Cantera sobre el Río Sogamoso	71

Figura 20	Tamizadora	72
Figura 21	Máquina de Los Ángeles	73
Figura 22	Elementos usados en el ensayo de Sulfatos	73
Figura 23	Bomba de extracción de vacíos	74
Figura 24	Calibrador metálico	74
Figura 25	Criterios para evaluar la Presión de Poro	77
Figura 26	Curva Granulométrica escogida	78
Figura 27	Comparación entre los tamaños de las probetas	81
Figura 28	Agregados precalentados a 160°C	83
Figura 29	Calentamiento del Asfalto a 150°C	83
Figura 30	Incorporación del Porcentaje de Asfalto necesario en peso a los Agregados	84
Figura 31	Proceso de mezclado de los Agregados y el Asfalto, a una temperatura de 150°C	84
Figura 32	Para una composición más homogénea se utilizó la mezcladora del Laboratorio de Hormigón	84
Figura 33	Detalle de la Mezcla ya lista	85
Figura 34	Vertimiento de la Mezcla en un molde	85
Figura 35	Se mantiene la Mezcla en su molde en el horno para que no se enfríe y se encuentre en el momento de la compactación a 140°C	85
Figura 36	Pre calentamiento de los moldes de compactación, a la temperatura adecuada	85
Figura 37	Engrasado de los moldes de compactación	86
Figura 38	Vertimiento y acomodamiento de la mezcla en el molde de compactación	86
Figura 39	Proceso de compactación de probetas en la Máquina Universal	87
Figura 40	Detalle de la carga última aplicada de 13 toneladas	87
Figura 41	Desmolde de la probeta ya compactada	87

Figura 42	Probetas compactadas	87
Figura 43	Resumen Esquemático	88
Figura 44	Ejemplo de Nomenclatura utilizada	89
Figura 45	Densidad Máxima Medida	91
Figura 46	Porcentaje de Vacíos	91
Figura 47	Variación de la Resistencia con el tiempo	93
Figura 48	Desvestimiento a las 24 horas	93
Figura 49	Desvestimiento a las 48 horas	93
Figura 50	Desvestimiento a las 72 horas	94
Figura 51	Plano del molde para acondicionamiento	95
Figura 52	Detalle de la base metálica del molde	96
Figura 53	Detalle de la tapa y el empaque del molde	96
Figura 54	Detalle de accesorios del molde	97
Figura 55	Molde para acondicionamiento	97
Figura 56	Horno Despatch del Laboratorio de Hormigón	98
Figura 57	Detalle de la falla de probetas a compresión simple	99
Figura 58	Anillo de Carga Marshall	100
Figura 59	Resistencia para las probetas de contenido apropiado de asfalto, grupos 1 y 2	101
Figura 60	Resistencia para las probetas de contenido apropiado de asfalto, grupos 3 y 4	102
Figura 61	Resistencia para las probetas de contenido apropiado de asfalto, grupos 1 y 3	103
Figura 62	Resistencia para las probetas de contenido apropiado de asfalto, grupos 2 y 4	103
Figura 63	Índice de resistencia conservada para probetas con apropiado contenido de asfalto	105

Figura 64	Resistencia para las probetas de bajo contenido de asfalto, grupos 1 y 2	106
Figura 65	Resistencia para las probetas de bajo contenido de asfalto, grupos 3 y 4	107
Figura 66	Resistencia para las probetas de bajo contenido de asfalto, grupos 1 y 3	108
Figura 67	Resistencia para las probetas de bajo contenido de asfalto, grupos 2 y 4	109
Figura 68	Índice de Resistencia Conservada para probetas con bajo contenido de Asfalto	110
Figura 69	Desempeño de las probetas de acuerdo a la fuente de los Agregados	111
Figura 70	Comparación con los resultados del estudio de Garcés B. y García I.	114

LISTA DE TABLAS

Página

Tabla 1	Contenido de Sílice para cada tipo de agregado	21
Tabla 2	Definiciones de Desvestimiento	44
Tabla 3	Composición Mineralógica de los Materiales Utilizados	71
Tabla 4	Características de los agregados pétreos	75
Tabla 5	Propiedades Reológicas del Asfalto	76
Tabla 6	Gradaciones abiertas más usadas	78
Tabla 7	Porcentaje de Asfalto para cada planta	80
Tabla 8	Gradación y Pesos utilizados en la elaboración de cada probeta ..	81
Tabla 9	Acondicionamiento de los grupos de probetas	94
Tabla 10	Características Principales de los estudios de Garcés B. y García I. y el actual	113

RESUMEN

TITULO:

CONCEPCIÓN DE UN ENSAYO PARA ESTABLECER EL EFECTO DE LA PRESIÓN DE PORO EN EL DETERIORO POR HUMEDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS*

AUTORES:

GAMBA GONZÁLEZ, Guido Abdiel
MERCADO ORTEGA, Julieta Alexandra **

PALABRAS CLAVES:

PRESIÓN DE POROS
DESVESTIMIENTO
RESISTENCIA
MEZCLA ASFÁLTICA

DESCRIPCIÓN

Este proyecto continua el estudio del fenómeno de la adherencia agregado – asfalto.

Su propósito principal es contribuir a evaluar el efecto de la presión de poro en la resistencia final de probetas realizadas con mezcla asfáltica abierta y sometidas a procesos de acondicionamiento variando la temperatura y la presión aplicadas, e induciendo la acción del agua en la interfase agregado – asfalto para favorecer el desprendimiento, utilizando materiales propios de la región como son los explotados en las canteras de los ríos Sogamoso y Chicamocha y el asfalto procedente de la Refinería de Barrancabermeja.

Analizando los ensayos establecidos en la normatividad colombiana, se plantea un proceso mecánico de laboratorio de fácil ejecución en el que se permita la manipulación de las variables estudiadas de forma sencilla.

Las cámaras de presión elaboradas en este proyecto permiten someter probetas de mezclas asfálticas a procesos de envejecimiento en laboratorio, variando la temperatura y la presión de aire.

Como principal conclusión se tiene que en el estudio de acción del agua y específicamente de la presión de poros, el acondicionamiento de las probetas en las cámaras, genera envejecimiento y aumenta la cohesión del ligante, distorsionando las medidas de deterioro del material, ocasionado por desprendimiento de ligante en la interfase asfalto-agregado.

Aunque la inmersión previa de las probetas por si sola, contribuye al descenso en el valor de la resistencia, es más agresivo el efecto del aumento de la presión aplicada.

*TRABAJO DE GRADO

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR: ING. EDUARDO CASTAÑEDA PINZÓN

ABSTRACT

TITLE: CONCEPT OF A TEST TO EVALUATE THE PRESSURE PORE EFFECT IN THE ASPHALTIC MIXTURES DETERIORATION PRODUCED BY HUMIDITY*

AUTHOR: GAMBÁ GONZÁLEZ, Guido Abdiel
MERCADO ORTEGA, Julieta Alexandra**

KEY WORDS: PRESSURE PORE
STRIPPING
RESISTANCE
ASPHALTIC MIXTURE

DESCRIPTION:

This project is aimed to continue the study of the adherence aggregate-asphalt phenomenon. The principal purpose is to help to evaluate the effect of pressure pore in the final resistance of the test samples which are made with open asphalted mixture that are treated by varying the temperature and the pressure. It allows the water to act on the interface aggregate-asphalt to favor the asphalt slide. The materials used to make this project are taken from the quarries of the Sogamoso and Chicamocha rivers. The asphalt is taken from the refinery of Barrancabermeja.

The analysis of the tests rule by Colombian law permits to establish a mechanic process easily used in lab, which permit the manipulation of the studied variables.

The pressure cameras used in this project permit to make the test samples get older and older in lab by varying the temperature and the air pressure.

The principal conclusion in the water action's study, specifically the pressure pore, is that the process applied to the test samples in the pressure cameras makes it get old and increases the cohesion of the asphalt which distorts measures in the aggregate-asphalt interface.

Even though the immersion of the test samples makes the resistance decrease, it is more effective to increase the applied pressure.

*FINAL JOB

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
DIRECTOR: ING. EDUARDO CASTAÑEDA PINZÓN

INTRODUCCIÓN

Las redes viales colombianas se ven gravemente afectadas por diversos factores no sólo causados por el tránsito sino también por no adecuados métodos constructivos, ciclos de humedecimiento y secado, variaciones de temperatura y cantidades de agua presentes en la estructura debidas a la alta pluviosidad. La dificultad para obtener recursos y la necesidad de mejorar la movilización de personas y mercancías obligan a la construcción de carreteras con mejores resistencias y mayor durabilidad a costos razonables que hagan más eficaz la inversión del Estado en este campo.

Se pretende manejar información sobre el comportamiento de las mezclas en presencia de agua y de esta manera aportar conocimientos que contribuyan al estudio de los factores incidentes en el diseño de carpetas asfálticas acordes a las condiciones regionales, y favoreciendo así su mejor desempeño, la disminución en los costos de operación de vehículos y de mantenimiento de las vías.

El fenómeno de presión de poros es uno de los factores presentes sobre los cuales no se han desarrollado estudios suficientes que permitan evaluar su incidencia en las vías construidas con pavimentos flexibles. Las principales variables que intervienen en este proceso de deterioro son la temperatura y la presión las cuales en presencia de agua ocasionan la pérdida de adherencia entre el agregado y el asfalto que lo recubre y la cohesión entre agregados, disminuyendo la eficiencia de la mezcla asfáltica.

Este estudio establece un ensayo mecánico que permite acondicionar probetas en cámaras con presiones y temperaturas determinadas, induciendo de esta manera el desprendimiento del asfalto y evaluando su efecto sobre la resistencia.

El modelo simula la acción del agua proveniente de la lluvia que una vez infiltrada se aloja en los vacíos presentes en la estructura y es sometida a la acción de las cargas de tránsito. Para esto se diseñó una cámara hermética, en la cual la probeta alojada es sometida a presión hidrostática inyectada a través de aire. La temperatura se determina de acuerdo a los intereses del estudio debido a que la cámara puede ser introducida en un horno de laboratorio. Se evalúa la resistencia final de cada probeta a compresión simple y se analiza su comportamiento teniendo en cuenta el acondicionamiento al que fué sometido.

La validez del resultado final dependerá del análisis del proceso y los mecanismos propuestos para simular el fenómeno estudiado. Por lo tanto no pretende ser una única solución en el estudio de la presión de poro y su efecto en las mezclas asfálticas sino un aporte a la investigación del mismo.

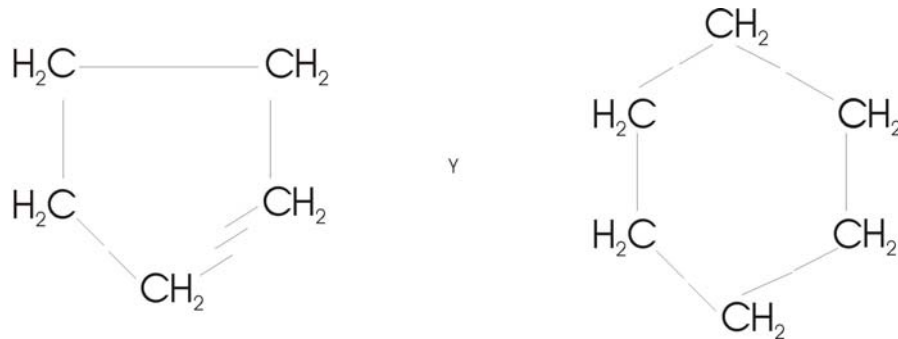
1. GENERALIDADES DEL ASFALTO

1.2 DEFINICIÓN

Puede definirse como un material cementoso negro o marrón oscuro, sólido de consistencia semisólida en donde los constituyentes predominantes son bitúmenes que se encuentran en la naturaleza o se obtienen en procesos de alta temperatura y presión en la refinación del petróleo como condensación, polimeración y oxidación (16). El programa SHRP (Strategic Highway Reserch Program) lo define como un sistema coloidal compuesto de grupos polares que se unen entre sí, para formar una red dispersa en un medio viscoso, que se es muy débil es propenso a la deformación y si es muy rígido es demasiado frágil (22).

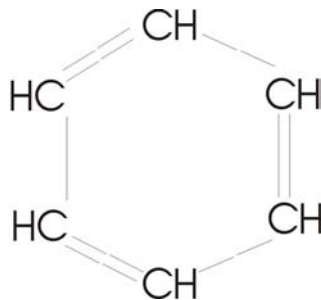
Los productos asfálticos tienen dos orígenes diferentes: Proceden del petróleo o de la destilación destructiva de diversas materias carbonosas. Los primeros se denominan productos bituminosos y los segundos, alquitranes. Está formado por una mezcla muy compleja de hidrocarburos y sus combinaciones, y constituye un producto de gran empleo en la construcción y conservación de carreteras y aeropuertos. Los productos bituminosos como el asfalto, se forman por la eliminación, en un proceso de concentración, de los componentes más ligeros de los petróleos naturales. Los asfaltos están formados principalmente por hidrocarburos de la serie parafínica C_nH_{2n+2} y C_nH_{2n-4} , o ciclo de parafinas que tienen como núcleo de su molécula los anillos de cinco o seis átomos de carbono y ciclopentano, ciclohexano (14).

FIGURA 1. ESTRUCTURA MOLECULAR DE LOS HIDROCARBUROS PARAFÍNICOS



Junto con ellos o combinados, se encuentran hidrocarburos de la serie aromática y parafínica. Los hidrocarburos de la serie aromática poseen en su molécula el agrupamiento del anillo bencénico C₆H₆ cuya fórmula es

FIGURA 2. ESTRUCTURA MOLECULAR DE LOS AROMÁTICOS



De esta fórmula se derivan, por unión de cadenas laterales, condensación de anillos o unión a través de cadenas; todos los demás compuestos. Normalmente los asfaltos tienen un elevado peso específico y producen como residuo de la destilación gran cantidad de productos semisólidos muy semejantes a los asfaltos naturales desde el punto de vista

físico y químico. Estos residuos tienen gran poder aglomerante y aunque no son tan estables como los obtenidos de los petróleos parafínicos, son los más apropiados para su empleo en la construcción de firmes. Los asfaltos de origen parafínico son excelentes como impermeabilizantes y sin tratamiento especial pueden emplearse en pavimentos como fundentes y en tratamientos superficiales ligeros (28).

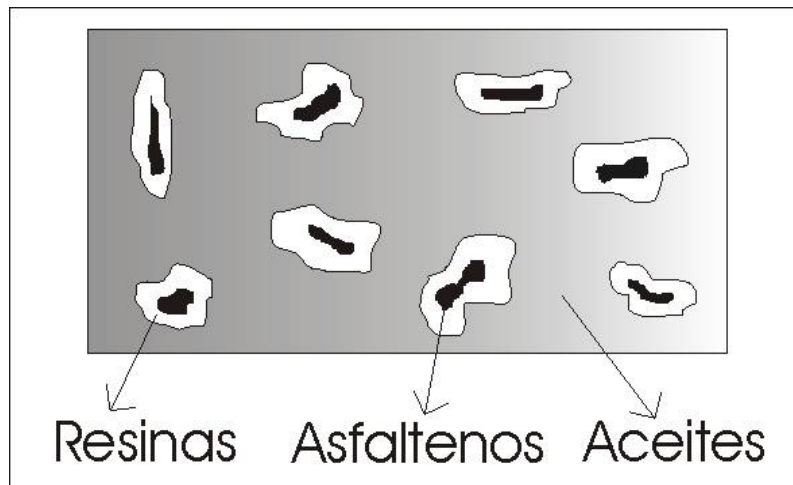
Los asfaltos naturales se encuentran en yacimientos de la naturaleza. Aparecen mezclados con elevada proporción de impurezas, parte de las cuales se eliminan en un tratamiento previo a su empleo. Algunos de los compuestos que en él quedan incorporados, son de evidente utilidad, favoreciendo las condiciones reológicas del producto industrial. Los asfaltites tienen una elevada proporción de betún y una ligera cantidad de cuerpos oxigenados. Tienen un punto de fusión más alto (125°C), por lo que han de emplearse siempre diluidos. Su costo es bastante elevado y no se emplean en pavimentación, sino en otras aplicaciones como impermeabilizaciones.

Las rocas asfálticas, se encuentran impregnadas de betún. Para ser industrialmente utilizadas en pavimentos la proporción de betún debe ser superior al 7%. Los asfaltos oxidados, se forman si durante el proceso de destilación se añade azufre o se inyecta una corriente de aire a través del residuo (asfalto soplado). Las propiedades de este producto son el aumento del peso específico y la consistencia, la disminución de la ductilidad y la disminución de la susceptibilidad a los cambios de temperatura. También son usados como impermeabilizantes. Los asfaltos diluidos son mezclas de un betún con otro de menor viscosidad para obtener la viscosidad deseada.

Los betunes asfálticos especialmente tratados para mejorar su aplicación en determinados usos, es decir, que tengan una viscosidad baja que permita su fácil manejo y su distribución alrededor del agregado en película delgada, se logra con el calentamiento. La temperatura adecuada para la aplicación del asfalto para que tenga la viscosidad adecuada, oscila entre

los 100 y los 160°C. Como esto en obra es una tarea muy complicada, se fabrican tipos especiales de betunes asfálticos como los fluidificados y las emulsiones.

FIGURA 3. ESTRUCTURA DEL ASFALTO



1.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA

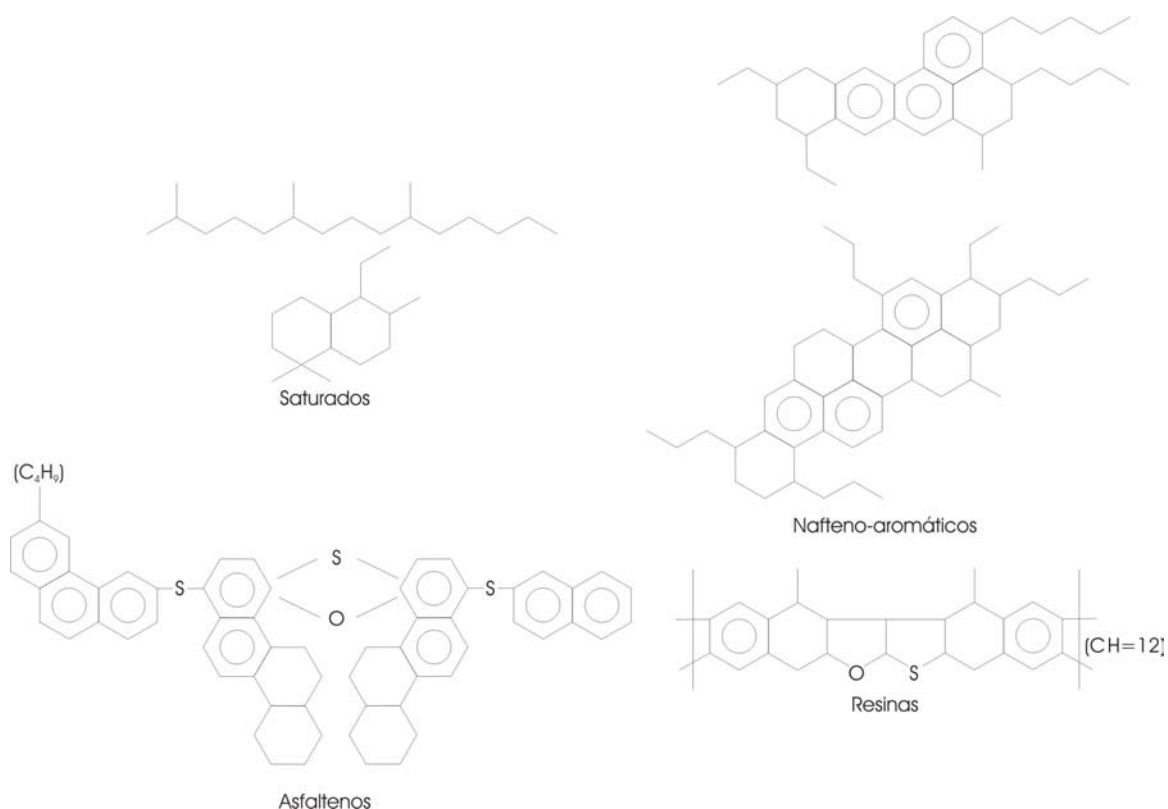
En cuanto a su composición química Marcusson propuso los siguientes grupos de compuestos (23):

1.2.1 Los Asfaltenos

Químicamente son macromoléculas complejas tipo multipolímeros. Su fórmula molecular es $C_{79}H_{92}N_2S_2O_3$. No hay asfalto que no los contenga. Se pueden considerar como constituidos por un núcleo formado por los compuestos más complicados y de mayor peso molecular, al cual se han incorporado, por adsorción, otros compuestos. Moléculas

altamente polares, insolubles en n-alcano de bajo peso molecular. Con ello se produce una distribución espacial alrededor del núcleo que va disminuyendo en densidad hasta llegar casi insensiblemente a la fase continua (28).

FIGURA 4. ESTRUCTURAS HIPOTÉTICAS DE LOS COMPUESTOS DEL ASFALTO



Están formados por carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno con presencia de algunos metales pesados como el vanadio y níquel. Son los encargados de infundir en el asfalto la rigidez, son de color negro o marrón, su peso molecular oscila entre los 1000 y 10000. Estructuralmente son láminas planas de sistemas aromáticos condensados que pueden estar enlazadas por enlaces de tipo sulfuro, éter, cadenas alifáticas o anillos nafténicos. Pueden contener entre 12 y 14 anillos condensados con cadenas laterales alternas y anillos nafténicos y su estructura y peso molecular varían con el origen y proceso del crudo (24).

Los asfaltenos se asocian con los aromáticos polares por medio de puentes de hidrógeno, lo cual forma una capa protectora que previene la formación de grumos insolubles(8). La polarización de los asfaltenos debida a su naturaleza aromática sirve para crear fuertes atracciones con partículas similares, especialmente con resinas de alto peso molecular. La tendencia adsorbente de los asfaltenos aumenta o disminuye dependiendo de la temperatura.

1.2.2 Los Maltenos

Están compuestos por mezcla de hidrocarburos cíclicos, saturados o no, que contienen la totalidad de la parafina del betún. No tienen por si poder aglomerante, pero desempeñan una función fundamental en el conjunto como elemento peptizante de la solución coloidal, es decir, que son el sólido que mantiene en disolución parcial el sólido. En esta función influye la cantidad de productos aromáticos que contienen; su proporción tiene que ser suficiente para que la solución coloidal sea estable y no haya tendencia a la gelificación, que hace descender rápidamente el poder aglomerante del betún.

Los maltenos son los encargados de proporcionar al asfalto las propiedades de ductilidad, flexibilidad, adhesividad y viscosidad. Están constituidos por tres grupos de compuestos: Saturados, resinas o aromáticos polares y nafteno-aromáticos (28).

1.2.2.1 Los Saturados

Forman la parte aceitosa de los asfaltos, son incoloros y actúan como medio dispersante o intermicelar, en el cual son transportados los asfaltenos. Son compuestos de cadenas

lineales, ramificadas y multianillos de cicloparafinas, poseen inclusiones anillos nafténicos. Su peso molecular es similar al de los naftenos aromáticos (28).

1.2.2.2 Los Aromáticos Polares

Son líquidos pesados de color marrón que proveen las cualidades adhesivas al asfalto. Las resinas se consideran como el agente estabilizante o peptizante protector de los asfaltos, son frágiles a bajas temperaturas y muy sensibles a cambios de temperatura. Presentan estructuras aromáticas o nafténicas con grupos polares así como hidrocarburos insaturados y cíclicos. Las estructuras aromáticas contienen de 4 a 7 anillos los cuales contienen cadenas alquílicas más largas que los asfaltos y contienen porcentajes de oxígeno, nitrógeno y azufre, menores. Las láminas aromáticas contienen entre cuatro a siete anillos aromáticos con peso molecular entre 900 y 1300. Las resinas por adición de hidrógeno con un catalizador específico pueden pasar a aceites y sufren nitración más suave que los asfaltos, formando productos nitroterciarios (28).

FIGURA 5. ESTRUCTURAS HIPOTÉTICAS DE LOS ASFALTENOS

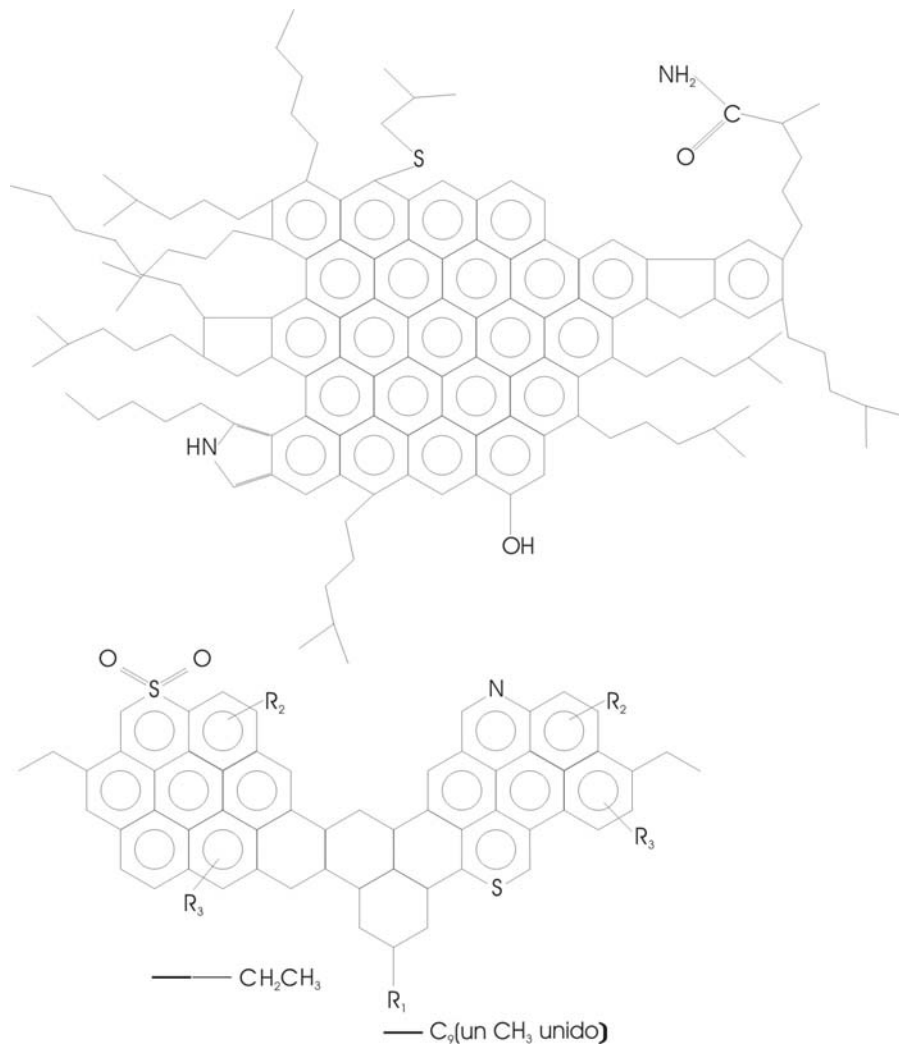


FIGURA 6. ESTRUCTURAS HIPOTÉTICAS DE LOS SATURADOS

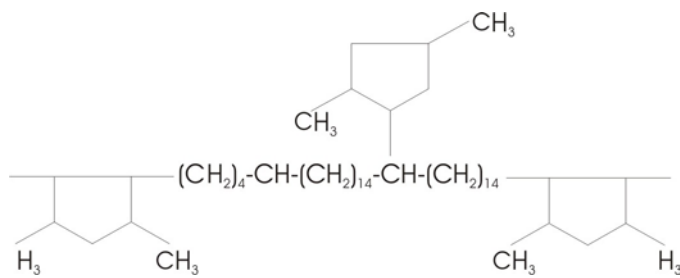
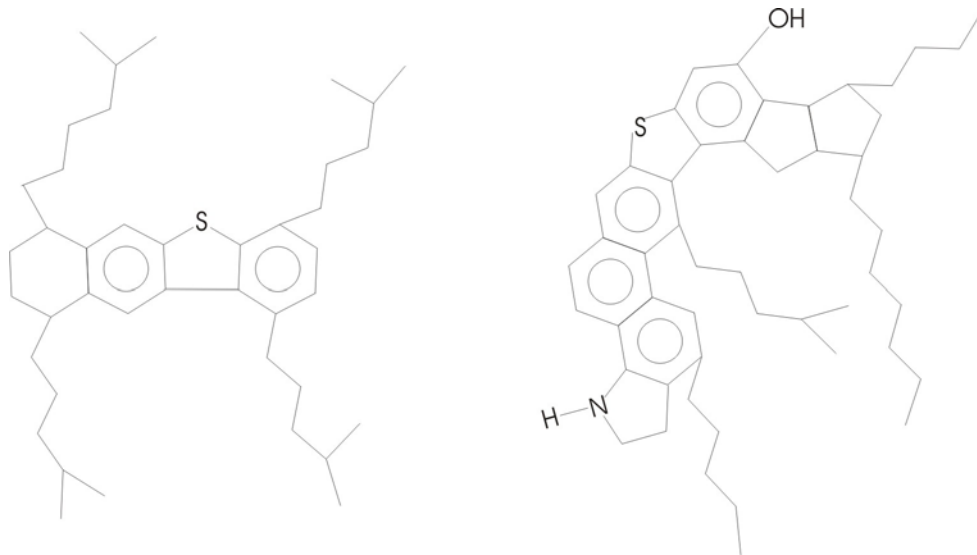


FIGURA 7. ESTRUCTURAS HIPOTÉTICAS DE LAS RESINAS



1.2.2.3 Los Nafteno-Aromáticos

Líquidos amarillos o rojos con estructuras que contienen núcleos aromáticos con conjuntos condensados de anillos nafténicos, los cuales a su vez poseen cadenas laterales de diferentes longitudes y se alteran con la temperatura de solidificación. Pueden contener azufre, lo cual permite la realización de puentes entre los anillos aromáticos y nafténicos. Poseen peso molecular entre 600 y 1000 (25)(26).

asfálticos libres y las resinas asfálticas son compuestos del medio aceitoso que actúan como coloides protectores y mantienen la estabilidad del sistema.

La consistencia del asfalto puede hacerlo variar de rígido a frágil. Sus condiciones de resistencia, sus características de deformación y sus límites admisibles pueden alterarse añadiéndole productos determinados. Es posible duplicar su resistencia con adición de fillers y producir efectos al añadir determinados polímeros, como cauchos naturales o sintéticos. Por estas razones es de gran importancia el estudio reológico de los asfaltos. El comportamiento resistente del asfalto en láminas delgadas, como ocurre en los ensayos, es diferente del obtenido con espesores relativamente grandes como ocurre en la realidad. La disminución de la sección transversal produce un incremento importante de la resistencia, circunstancia que se debe tener presente en los ensayos a realizar (28).

1.3.1 Características Reológicas

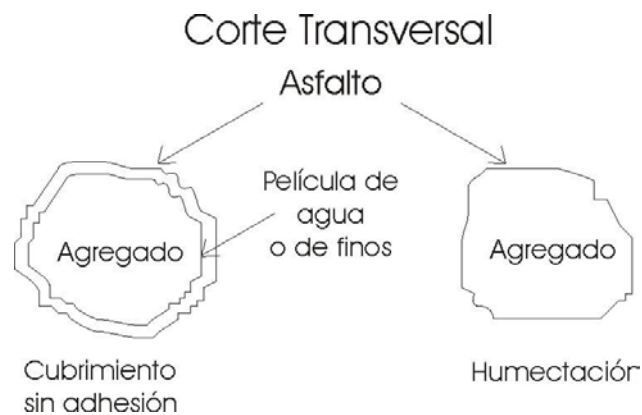
La reología refleja el grado de dispersión o solvatación existente dentro del sistema complejo que conforma el asfalto. Estas características son independientes de las interacciones intra e intermoleculares de los compuestos presentes en los asfaltos. Hace referencia a la variación de las propiedades de flujo a través del tiempo de aplicación de una carga.

Una de las características más importantes de los asfaltos es la medida de flujo del asfalto a una temperatura en particular que establece su consistencia y las deformaciones elásticas para determinar su aplicabilidad y su uso específico. Para evaluar estas características se han usado pruebas de penetración, punto de ablandamiento, ductilidad, viscosidad y susceptibilidad a la temperatura.

1.4 FUNCIONES DE LOS ASFALTOS

El asfalto debe proporcionar un sello impermeable al pavimento. Debe adherirse al agregado, en una capa adhesiva como en los tratamientos superficiales o por medio de un cemento adhesivo como se usa en el concreto asfáltico. El asfalto debe ser lo suficientemente viscoso para resistir la acción del tránsito y que no fluya en las secciones no planas de las carreteras. No debe ser muy viscoso que resulte frágil y propenso a la rotura. Debe ser lo suficientemente fluido al momento de ser aplicado para cubrir el agregado y la estructura del pavimento y ser capaz de dejarse aplicar a una velocidad uniforme por medio de instrumentos mecánicos.

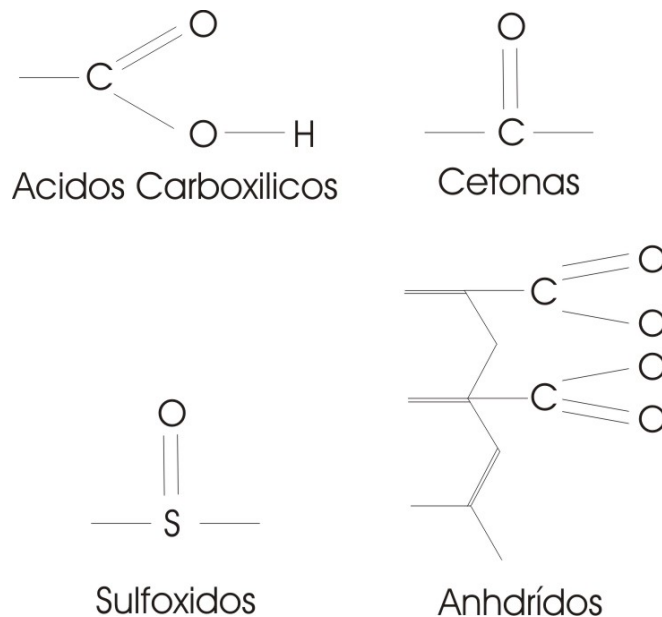
FIGURA 9. PROCESO DE CUBRIMIENTO DE LA SUPERFICIE DEL AGREGADO POR EL ASFALTO



1.5 ENVEJECIMIENTO DEL ASFALTO

Este envejecimiento causa en el asfalto un desequilibrio en las fracciones constituyentes del asfalto. Se obtiene un incremento de los asfaltenos a partir de los maltenos, que se convierten lentamente en asfaltenos. La pérdida de compuestos de bajo peso molecular o volátiles en el asfalto y la formación de enlaces de hidrógeno cuando el asfalto ha sido sometido a procesos termo-oxidantes conlleva a la formación de compuestos polares, los cuales interactúan fuertemente entre ellos ocasionando incremento en la viscosidad y altera las propiedades del flujo. Esto produce en los pavimentos efectos sobre endurecimiento, pérdida de cohesión, agrietamiento y desprendimiento (27).

FIGURA 10. TIPOS DE GRUPOS FUNCIONALES DE OXIDACIÓN FORMADOS EN EL ASFALTO DURANTE EL ENVEJECIMIENTO



1.5.1 Remoción del Asfalto por la Acción del Agua

La presencia de agua deteriora el enlace en la interfase sólido – líquido, por lo cual la composición mineralógica de los agregados tiene una gran importancia en la adhesión agregado – asfalto.

2. AGREGADOS

Los agregados se definen como un material inerte tal como arena, escoria, fragmentos rocosos o combinaciones de estos elementos. Generalmente corresponden al 80-85% en volumen o al 90-95% en peso del concreto asfáltico. Estos materiales son componentes fundamentales de los pavimentos.

Los agregados se consideran como:

Grava	Mayor de 20 mm
Gravilla	Entre 2 y 20 mm
Arena	Entre 0.05 y 2 mm

Los materiales con dimensiones menores a los 0.05 mm son: limo y arcilla.

2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS SEGÚN SU ORIGEN

2.1.1 Rocas Ígneas

Estas rocas se formaron por solidificación de material fundido, y se considera que dieron origen a las demás rocas. Presentan características que las diferencian de las demás como son su presentación en hojas de diques, hojas ígneas, su composición mineralógica, por su textura y arreglo de granos. No contienen fósiles. De acuerdo a la profundidad en que ocurrió la solidificación se clasifican en Intrusivas o Plutónicas y Extrusivas o Volcánicas.

Desde el punto de vista químico están compuestas principalmente por: Sílice (SiO_2), Alúmina (Al_2O_3), Magnesio (MgO), Cal (CaO), Óxido Ferroso y Férrico (FeO y Fe_2O_3), Soda (Na_2O) y Potasa (K_2O) y agua en pequeñas cantidades. Mineralógicamente su composición se debe a minerales como: cuarzo, feldespato, potásico, sódico – cálcico y silicatos ferromagnesianos. Son vidrios o mezcla de vidrios y minerales. Las rocas ígneas se pueden dividir en minerales esenciales que entran en la formación de la roca y minerales accesorios que entran en pequeñas cantidades y su presencia no afecta la naturaleza de la roca.

A este tipo de rocas pertenecen el granito y el feldespato. Como materiales secundarios se pueden contar el caolín y la sericita.

2.1.2 Rocas Sedimentarias

Estas rocas se formaron por descomposición de sedimentos orgánicos, precipitados químicos o mezcla de los dos o a partir de rocas preexistentes como ígneas y metamórficas bajo el efecto de fenómenos ambientales como corrientes de agua, viento y agentes transportadores de materiales. Son también llamadas estratificadas, por que presentan capas separadas por los planos de estratificación.

En su composición se encuentran minerales como: cuarzo, feldespato, mica y óxidos de hierro, caolinita y algunos carbonatos como calcita, dolomita, sidetita y sulfatos como la anhidrita y el yeso. Su clasificación se basa en su modo de formación, en su composición y en sus características físicas.

A este grupo pertenecen la arenisca y la caliza.

2.1.3 Rocas Metamórficas

Son rocas ígneas o sedimentarias que han sufrido cambios físicos y químicos, en su textura y composición mineralógica. Los principales agentes de este cambio son: calor, acciones de gases y líquidos, movimientos de la corteza terrestre y presión especialmente del agua. Su composición química es muy variada debido a la heterogeneidad de la roca madre.

Su mineralogía varía así: algunos silicatos provienen de rocas ígneas, los carbonatos de rocas sedimentarias, el cuarzo, los feldespatos y las micas de rocas ígneas y metamórficas, y el talco, granito clorita propios de rocas metamórficas. Se clasifican de acuerdo a su textura, estructura y composición mineralógica. En su textura se asemejan a las rocas ígneas, es cristalina y muchas tienen textura porfídica. Pueden presentar estructura paralela secundaria o foliación, que se asemejan a las rocas sedimentarias.

A estas rocas pertenecen el neis, la cuarcita y el mármol.

2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS SEGÚN SU AFINIDAD POR EL AGUA

2.2.1 Agregados Hidrofóbicos

Muestran gran afinidad por las sustancias apolares. Estas sustancias son las más adecuadas para preparar mezclas con asfaltos para construir pavimentos asfálticos (6).

2.2.2 Agregados Hidrofilicos

Presentan gran afinidad por el agua, sustancia polar, asimétrica y presenta desequilibrio de cargas, y sustancias polares. Poseen cargas positivas y negativas inestables, en donde se forman puntos positivos y negativos (6).

2.3 CLASIFICACIÓN SEGÚN SU CARÁCTER ÁCIDO-BÁSICO

2.3.1 Agregados Básicos

Poseen gran cantidad de Alúmina (Al_2O_3), Magnesio (MgO), Cal (CaO), Óxido Ferroso (FeO), Soda (Na_2O) y Potasa (K_2O). Si el porcentaje de soda y potasa, excede el 0.6%, se mezclan fácilmente con el agua para formar los hidróxidos respectivos, que atacan a los agregados silíceos formando geles de sílice alcalina que absorben el agua por ósmosis, ejerciendo presiones destructivas (34).

2.3.2 Agregados Ácidos

Contienen en su composición un porcentaje de sílice mayor al 60%. Los agregados ácidos con mayor contenido de sílice son más estables químicamente, y menos estables que los que contienen alto contenido de Hierro y Magnesio.

Teniendo en cuenta el contenido de sílice, se puede hacer una clasificación más exacta de los agregados:

TABLA 1. CONTENIDO DE SÍLICE PARA CADA TIPO DE AGREGADO

AGREGADO	CONTENIDO DE SÍLICE
Acido	100-60%
Intermedio	60-52%
Básico	52-45%
Ultrabásico	45-0%

2.4 DEGRADACIÓN DE LOS AGREGADOS MINERALES DURANTE LA VIDA ÚTIL DEL PAVIMENTO

La degradación de los agregados contempla los procesos mecánicos, que dan lugar a la desintegración y los procesos químicos, que descomponen algunos de los constituyentes minerales primarios para producir una reducción del intervalo y condición de los agregados. Este es un proceso dinámico de intensidad variable y creciente, que se modifica por las condiciones o los tratamientos aplicados y afecta sensiblemente las condiciones de servicio, obteniéndose una reducción de la vida útil de la obra y cambios en sus propiedades fundamentales como son: resistencia, deformabilidad, flexibilidad, permeabilidad, etc.

Estos factores se asocian con la degradación de los agregados:

2.4.1 Incidencia de los Factores Geológicos

2.4.1.1 Naturaleza Genética de las Rocas

Reflejo de todos los procesos formativos que condicionan al comportamiento actual y futuro de los agregados. Para las rocas ígneas, la profundidad a la que ocurre la cristalización, determina su textura (piroclástica constituida por fragmentos de rocas volcánicas, vítrea formada esencialmente de vidrio volcánico, afanítica constituida por diminutos cristales menores de 0.5 mm en promedio y porfirítica compuesta por dos tamaños diferentes de los minerales, dándole a la roca apariencia de moteada), tamaño, forma y disposición de los elementos y la composición mineralógica. En este tipo de rocas la degradación se ve fortalecida con una menor temperatura de cristalización y el menor contenido de sílice. Para rocas sedimentarias la degradación está en función de la naturaleza de los componentes (calcáreas, silicosas, salinas), del mecanismo de formación (agua, viento, gravedad) y de la cantidad y calidad del cementante para rocas clásticas y la predominancia de carbonatos de calcio o magnesio, el grado de pureza y el nivel de consolidación para las rocas no clásticas. Para las rocas metamórficas la degradación se asocia a la presencia de esquistocidades y elementos como sulfuros y micas, la naturaleza de los componentes primarios (arenisca, caliza, lutita y granito) y la intensidad de los fenómenos formativos actuantes.

2.4.1.2 Factores Estructurales

Pueden llevar a propiciar o neutralizar la alteración de las propiedades iniciales de la roca. Dentro de estos factores tenemos la continuidad de la masa rocosa, las disconformidades, pliegues y diaclasas. Existen otros factores que están ligados con la expeditividad para su empleo como fuente de agregados, como son la homogeneidad, las características de afloramiento, el espesor de la cobertura y la presencia de agua.

2.4.1.3 Alteración por Intemperismo

Se manifiesta en términos de oxidación, hidratación y remoción de componentes. Es un proceso dinámico que está ligado a las condiciones ambientales y en él ocurre la transformación de algunos minerales existentes y de otros productos, en función de las características iniciales y de las circunstancias en que se producen las alteraciones en la roca. Esta alteración química afecta principalmente a las rocas ígneas, que no logran aclimatarse a su nuevo medio, las sedimentarias nacieron en condiciones similares por lo que su degradación es eventual y las metamórficas presentan facetas intermedias. Se hace necesario identificar el grado de alteración química inicial y su posible desarrollo durante la vida útil de las estructuras, por lo cual se ejecuta un examen petrográfico detallado, pruebas de laboratorio y la calificación inicial de la resistencia a la degradación. La alteración mecánica producida por descompresión o cambios volumétricos, por acciones naturales o antrópicas, está actuando en conjunción con la alteración química, que en ocasiones hace que se deriva una de otra, siendo más fácil de caracterizar.

2.4.2 Incidencia de los Procesos de Producción

2.4.2.1 Voladura, Extracción, Trituración

Después de la utilización de estos procesos, el material se debilita por los esfuerzos aplicados, de menor tamaño, de formas variables, con mayor superficie de exposición, heterogéneo y contaminado, por lo que termina siendo un producto en condición precaria para seguir afrontando los procesos de degradación y los causados por los agentes que empiezan a aparecer.

2.4.2.2 Lavado, Clasificación, Transporte y Almacenamiento

Su incidencia no es tan alta, pero implica pérdida de finos, humedecimiento – secado, desgaste por atricción, agregación y exposición directa.

2.4.2.3 Intemperismo Durante los Procesos de Producción

Al aumentar la superficie específica y debilitarse la resistencia del material por esfuerzos inducidos, se propician condiciones desfavorables frente a los agentes del intemperismo actuante y a los que entran en acción. La afectación será en primera instancia gradual e irá profundizándose cada vez más, reduciendo notablemente la fricción intra particular y aumentando el contenido de finos.

2.4.3 Incidencia de los Procesos Constructivos

2.4.3.1 Transporte, Distribución, Mezclado y Humedecimiento

La degradación mecánica de los agregados. El incremento de la segregación y la consecuente heterogeneidad, propician aún más la degradación y su complejidad.

2.4.3.2 Calentamiento

Afecta principalmente los agregados gruesos y no produce modificaciones significativas.

2.4.3.3 Compactación

Para mejorar los niveles de servicio, se ha recurrido al empleo de grandes compactadores que aplican altos niveles de esfuerzos, produciendo rotura de los agregados, atenuación de aristas y asperezas y producción de finos.

2.4.3.4 Intemperismo Durante el Proceso de Construcción

Los procesos constructivos afectan y propician la degradación mecánica de los agregados, dejando paso al terreno para la degradación química. Esto puede atenuarse empleando técnicas de trabajo depuradas, equipos apropiados y tratamientos previos a los agregados.

2.5 COMPORTAMIENTO DURANTE LA VIDA DE SERVICIO

2.5.1 Reacción con Ligantes y Aditivos

Establecer la afinidad que se puede dar entre los agregados y el asfalto en la fabricación de las capas del pavimento y en la degradación de los agregados.

2.5.2 Adherencia de los Agregados con Ligantes Bituminosos

Esta adherencia es función de la naturaleza de los dos componentes, de la mineralogía del agregado, del estado en su superficie (rugosidad y grado de limpieza), de la interacción que estos desarrollen, su temperatura de mezclado, los tratamientos previos y las solicitudes aplicadas. La adherencia se define como la manifestación de fuerzas moleculares afines, sometidas a acciones disociadoras permanentes, de su permanencia dependerá la protección del agregado y de las capas estructurales frente a los procesos de degradación. El agua es el principal conspirador contra la convivencia armónica del agregado con el ligante.

La mineralogía del agregado es de gran importancia, ya que las cargas superficiales que se encuentran descompensadas, dan lugar a la orientación de partículas de polaridad contraria, principalmente de vapor de agua; para mover la película de agua es necesario lograr el mojado del agregado por el ligante, lo cual se logra mediante procesos enérgicos de mezclado en caliente. Luego de establecerse el contacto, las moléculas más polares del ligante tenderán a orientarse en la interfase árido-ligante para satisfacer las fuerzas electrostáticas de la superficie mineral (33).

3. LA MEZCLA ASFÁLTICA

3.1 PROPIEDADES DEL AGUA

La principal causa de fallas en la construcción de pavimentos flexibles es la presencia de agua líquida o como vapor. Al presentarse en forma líquida esta penetra a través de los huecos de la mezcla hasta el interior de la capa. Los agregados minerales y la película de asfalto poseen poros pequeños por donde puede penetrar el agua. Las capas colocadas con mezclas en caliente, poseen menor cantidad de huecos y por lo tanto impermeables, el agua produce desplazamiento del ligante, con poca importancia. Lo contrario sucede con las capas colocadas con mezclas abiertas o con tratamientos superficiales, donde siempre está presente el agua, ya que son muy permeables y el desplazamiento del ligante es verdaderamente importante (5) (32).

El agua es un líquido bipolar y sus moléculas son atraídas en el campo eléctrico por la superficie de los agregados minerales ácidos, saturando sus cargas eléctricas. Los átomos en las moléculas de agua no son idénticos; el oxígeno es más electronegativo que el hidrógeno, por esta razón ejerce mayor atracción sobre los electrones del par compartido, originando un desplazamiento de los electrones de hidrógeno hacia el núcleo del oxígeno, por lo cual esta porta una ligera carga negativa parcial, por lo tanto se convierte en el centro de las cargas positivas, mientras que en el hidrógeno se genera una carga parcial positiva, convirtiéndolo en centro de las cargas negativas.

El Ph del agua debe tener una cierta importancia en los fenómenos de adherencia, aunque actualmente esto no se ha podido comprobar.

La resistencia mecánica de las capas asfálticas depende en gran parte de la adherencia. El verdadero problema de la adherencia es la presencia de agua y los efectos que esta puede traer en el proceso de mezcla. Es fundamental para el proceso de mezcla asfáltica en caliente, la temperatura de los agregados y el asfalto para lograr una buena interacción entre los componentes.

3.2 BASES DE LA ADHERENCIA

El fenómeno de adherencia se denomina como la unión entre asfalto y agregado mineral, y se produce en la superficie límite entre dos fases, por lo que el problema en la adherencia es de interfases. El nitrógeno presente en el asfalto favorece la adhesión con los agregados y los grupos funcionales controlan sus propiedades ya que determinan la estabilidad de permanecer unidas las superficies para formar una red, con capacidad de resistir tensiones y esfuerzos.

3.2.1 Fundamentos del Comportamiento Adhesivo

Para explicar este fenómeno, existen diversas teorías, ya que no existe solo una con información exacta y completa. . La adherencia se produce por medio de las fuerzas adhesivas, entre un líquido y la superficie de un cuerpo sólido. Estas solo ejercen su función cuando el líquido envuelve el sólido, por lo que supone la envoltura del material pétreo por el asfalto. En este trabajo la energía superficial libre correspondiente depende fuertemente del tamaño de la superficie efectivamente envuelta. La adhesión es una propiedad del aglomerado y no solamente del ligante, que sólo contribuye parcialmente al efecto de adherencia.

3.3 PROPIEDADES DEL LIGANTE QUE INFLUYEN EN LA ADHERENCIA

3.3.1 Tensión Superficial

Está basada en el desequilibrio de las fuerzas de atracción entre las moléculas de la superficie. Las moléculas del interior son atraídas uniformemente en todas las direcciones, mientras que las moléculas de la superficie sólo son atraídas hacia adentro, lo cual hace que se produzca una tensión en la superficie. Este concepto expresa el trabajo por unidad de superficie necesario para extender la interfase entre los dos materiales.

3.3.2 Envoltura y Cubrimiento

La tensión superficial condiciona la capacidad de envoltura y cubrimiento de los ligantes asfálticos. El cubrimiento depende de la atracción entre las moléculas del ligante y del agregado, en comparación con la atracción entre las moléculas del interior del ligante. La capacidad de envoltura del ligante aumenta a medida que se disminuye la tensión superficial. Con la envoltura también está relacionada la extensión espontánea de un líquido sobre una superficie líquida o sólida. Para que se produzca esta extensión, la adhesión del líquido aplicado sea mayor que la cohesión y además la tensión superficial de la superficie de soporte debe ser mayor que la del líquido derramado.

La tendencia a una mayor extensión está unida a una mejora de las propiedades de adherencia. El ángulo de contacto entre el árido y el ligante afecta el cubrimiento del agregado por el asfalto. Entre mayor sea este, habrá un mejor cubrimiento del árido por el

ligante, por la baja atracción entre las moléculas del asfalto, facilitando así una mejor adherencia.

FIGURA 11. ESQUEMA DEL CUBRIMIENTO DEL AGREGADO MINERAL POR EL ASFALTO

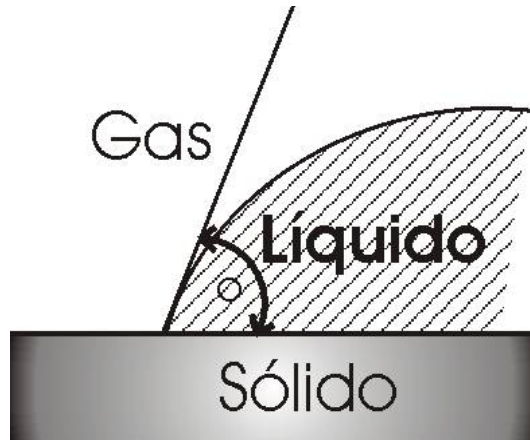
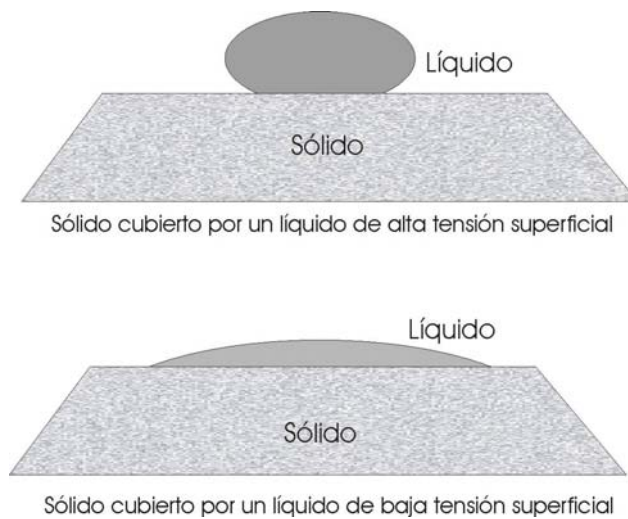


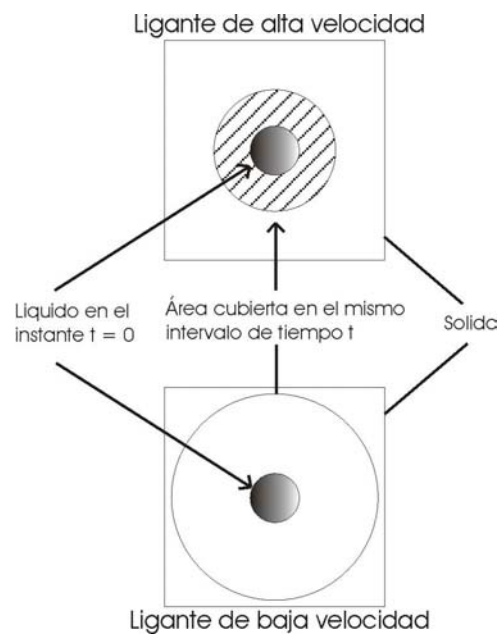
FIGURA 12. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA INFLUENCIA DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL SOBRE EL CUBRIMIENTO PRODUCIDO POR UN LIQUIDO



3.3.3 Viscosidad

Depende de la temperatura e indica el grado de movilidad molecular y la magnitud de las fuerzas de atracción en los líquidos. Si se aumenta la temperatura disminuyen las fuerzas intermoleculares y la tensión superficial del líquido, en donde se da una mayor capacidad de envoltura. Teniendo en cuenta el desplazamiento del ligante del agregado, a mayor viscosidad su resistencia al agua es mayor.

FIGURA 13. INFLUENCIA DE LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO SOBRE EL CUBRIMIENTO DE UN LÍQUIDO SOBRE UN SÓLIDO



3.3.4 Composición y Procedencia del Asfalto

Los asfaltos de diferentes procedencias pueden mostrar una inclinación muy diversa a ser desplazados por el agregado mineral. No hay ninguna relación definida entre los diferentes compuestos químicos del asfalto y la adherencia del agregado. La influencia que tiene la composición de los asfaltos sobre la tensión superficial es insignificante (30).

3.3.5 Resistencia al Envejecimiento

Bajo la influencia de las condiciones atmosféricas, las películas del ligante pueden sufrir una alteración de la viscosidad, la tensión superficial y de la composición del asfalto, que influye sobre el comportamiento de la adherencia.

3.4 PROPIEDADES DEL AGREGADO MINERAL QUE INFLUYEN EN LA ADHERENCIA

3.4.1 Mineralogía

Su composición mineralógica tiene una gran importancia en lo que se refiere a los fenómenos de adherencia. Los agregados minerales, poseen unas cargas superficiales descompensadas, que producen una tensión superficial. Cuando estos agregados son cubiertos por líquidos de polaridad contraria, satisfacen su necesidad de energía y forman un enlace adhesivo. El líquido que sea capaz de compensar la máxima necesidad de energía es el que posee la mayor capacidad adhesiva y está en capacidad de desplazar a otro

líquido. Este fenómeno se conoce como stripping o desvestimiento que en los ligantes asfálticos consiste en que el agua es capaz de desplazar la película de asfalto de la superficie de los agregados minerales.

La clasificación de las rocas en ácidas y básicas es de tipo geológico y no tiene porqué indicar nada sobre el efecto bilateral entre el ligante y el agregado. Se ha podido comprobar que en algunos minerales básicos (gabro), los asfaltos se adhieren mejor que en los ácidos. De otra manera, Karius y Dalton (4,5), han obtenido mejores resultados con cuarcitas ácidas que con dolomitas y doleritas básicas. De estos estudios se analiza que es inexacta la expresión de que los agregados ácidos están expuestos al desplazamiento del asfalto, pero no es así en los básicos.

3.4.2 Rugosidad Superficial

Esta propiedad tiene influencia tanto en la envoltura como en la resistencia adhesiva. La envoltura puede ser obstaculizada por el aire y la humedad acumulada en las grietas de la superficie del agregado. La rugosidad superficial es considerada como un factor positivo para la adherencia, siempre y cuando haya una verdadera unión entre los componentes del pavimento y además de esto trae un aumento de la superficie de contacto y por lo tanto produce una menor sollicitación de tracción en la superficie. La rugosidad superficial es conocida como una magnitud muy importante para valorar la calidad de la adherencia con respecto a la superficie (31).

Determina las características de textura del agregado. Un agregado rugoso aumenta la resistencia al desprendimiento del asfalto al presentar mayor superficie específica o área de contacto, por lo cual soporta mayor tensión superficial. Como desventaja se anota que

retiene mayor humedad, por lo que se sugiere precalentar el agregado. Desarrolla más fricción entre las partículas y es más estable.

Un agregado de superficie lisa y poca angularidad, reduce la fricción entre las partículas y hace que entre ellas se desarrolle cohesión o fuerza tensorial con mezclas arenosas.

3.4.3 Porosidad

Hace referencia a la mayor o menor cantidad de capilares o poros que permiten la penetración de los asfaltos para crear una mejor adhesión. Si las mezclas son hechas en caliente, el aire contenido en los poros es expulsado con el calor y al enfriarse los vacíos absorben el asfalto. Esta propiedad hace parte del área interna del agregado.

Puede influir sobre la adherencia y facilitar el anclaje del asfalto con el agregado mineral. Si en la superficie de los agregados existen poros, grietas o capilares de cierta importancia, el ligante puede penetrar en ellos, consiguiéndose así una unión física con ellos.

3.4.4 Recubrimiento de la Superficie

La capa de polvo o de humedad que a menudo se encuentra en los agregados minerales usados en la construcción de carreteras dificulta el recubrimiento y penetración del ligante, pudiéndose ocasionar una mala o deficiente adherencia. También es un problema si la superficie de rotura de los agregados se encuentra en estado de sequedad, ya que adsorben una película de agua de muy poco espesor, y para la evaporación de esta, es necesario obtener temperaturas extremadamente altas (5).

3.5 CONSIDERACIONES TEÓRICAS DE LA ADHERENCIA

3.5.1 Envoltura

Constituye una condición previa y primordial para obtener una buena adherencia. La determinación del proceso de cubrimiento y la medición de la energía de la superficie de contacto, es posiblemente, el sistema de medida más antiguo y conocido en las investigaciones sobre adherencia.

El punto de partida de todas las investigaciones energéticas de la superficie límite es la conocida gota de un líquido de tensión superficial conocida sobre un cuerpo sólido con un determinado ángulo de borde.

3.5.2 El Mecanismo de la Adherencia

La mayoría de las teorías que se han expuesto sobre la adherencia de los agregados minerales al asfalto, no ofrecen una explicación satisfactoria sobre este fenómeno. Rice, ha reunido estas teorías en su revisión sistemática, y se resume de la siguiente manera. La textura superficial y el anclaje mecánico del ligante ocupan el primer lugar de las consideraciones, según la teoría mecánica (6).

La adherencia no es una propiedad específica del material, solo es apreciable cuando entre en contacto con otro. Las causas que motivan el fenómeno de la adherencia, se describen de diferentes maneras y sobre esto se han desarrollado varias teorías que entre sí se complementan pero también se contradicen.

3.5.3 Teoría de la Adhesión Mecánica

Parte del supuesto de que el asfalto adherido está anclado de una forma puramente mecánica a la superficie de los materiales sólidos.

FIGURA 14. CARACTERÍSTICAS DEL ENLACE ÁRIDO-LIGANTE



3.5.4 Teoría de la Adhesión Específica

Bajo este concepto se reúnen varios fenómenos de atracción de fuerzas intermoleculares.

3.5.4.1 Teoría de la Polarización

Esta teoría se basa en la idea de que las moléculas con distribución de carga asimétrica o dipolos, se influyen entre sí. Parece que la polaridad ocupa un papel importante en los procesos que se desarrollan en superficies de contacto, aunque esta teoría no se encuentra

en condiciones de explicar a cabalidad la adherencia en los materiales apolares. Es posible mejorar las condiciones de adherencia a superficies sólidas, de sustancias polares a medios poco polares.

3.5.4.2 Teoría de la Difusión

En esta teoría se explica la adherencia por medio del movimiento de las moléculas, del asfalto a un material sólido y viceversa. Hay una dependencia entre la estructura molecular y el peso molecular (6).

3.5.4.3 Teoría de la Adsorción

En esta, se parte de que la base de que la adhesión y el cubrimiento tienen la misma importancia, contradiciendo la teoría de la polarización. La energía superficial de la fase líquida o su ángulo de cubrimiento, determina la adhesión del asfalto a la superficie de un sólido. La energía superficial de un sólido debe ser mayor a la del asfalto (6).

3.5.4.4 Teoría de la Dispersión

Las fuerzas de London o de dispersión, actúan por influencia recíproca de las fuerzas del núcleo y los electrones dentro del campo molecular y representan la mayor parte de las fuerzas de cohesión en los compuestos orgánicos. También emplea estas fuerzas para

explicar la adhesión, partiendo de la suposición de que las capas de electrones de las moléculas se interpenetran, con lo que se establecen fuerzas de enlaces (6).

3.5.4.5 Quimiosorción

Es la misma Adsorción química, en donde durante una reacción, se produce un anclaje a la superficie del sólido. El proceso se interrumpe cuando la superficie del sólido está ya cubierta con una fuerte capa molecular de la sustancia adsorbida. En las aristas, bordes o esquinas del sólido, se forman los llamados centros activos, en donde se concentra una densidad de energía especialmente alta, y es en estos puntos donde se reúne la adsorción química.

En el proceso de adhesión, se puede presentar la aparición de procesos conjunta y simultáneamente. Se hace muy difícil, precisar estudios técnicos y modelos, por la complejidad de la naturaleza de los procesos físicos y químicos que tienen lugar en la superficie de contacto o interfase (6).

3.6 FACTORES EXTERNOS QUE INCIDEN EN LA ADHERENCIA

3.6.1 El Agua

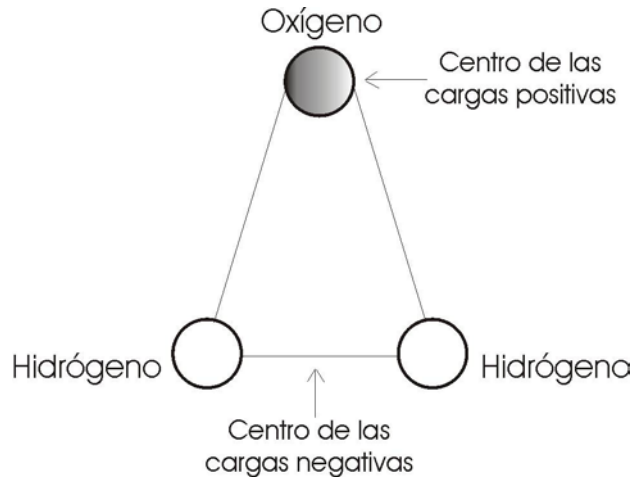
Durante la construcción del concreto asfáltico, las condiciones ambientales tiene una marcada influencia en la susceptibilidad al daño por humedad, y si durante el proceso de construcción, el tiempo es lluvioso y frío, esta condición es mas recurrente. Se presentará mayor facilidad de pérdida de la adhesión entre el agregado y el asfalto, en capas asfálticas

con altos contenidos de vacíos y bajos niveles de drenajes. Cuando el agua se encuentra en forma líquida, penetra a través de los huecos de la mezcla hacia el interior. La película de asfalto y el agregado mineral, se cree que poseen unos poros muy pequeños a través de los cuales penetra el agua.

En las mezcla densas en caliente, los poros son escasos por tanto la mezcla es impermeable y el desplazamiento debido a la acción del agua es de menor importancia. En las mezclas tipo macadam y en tratamientos superficiales, siempre está presente el agua y el desplazamiento del asfalto es un problema muy importante, ya que puede ser generado incluso por el vapor de agua.

El agua es un líquido bipolar y sus moléculas son atraídas por el campo eléctrico que se genera en la superficie de los agregados ácidos, saturando las cargas eléctricas. En la composición molecular del agua el oxígeno es más electronegativo que el hidrógeno, por éste motivo la atracción sobre los electrones del par compartido son mayores originando un desplazamiento de los electrones del hidrógeno hacia el núcleo del oxígeno, como consecuencia el oxígeno posee una carga negativa parcial, con lo cal se convierte en el centro de las cargas positivas y el hidrógeno se convierte en el centro de las cargas negativas.

FIGURA 15. POLARIDAD DE LAS MOLÉCULAS DE AGUA



Existen dos mecanismos asociados al daño por humedad que son: El aumento de la Presión de Poro y La Abrasión Hidráulica. El daño en el pavimento se ve incrementado por las cargas cíclicas del tráfico, que al hacer fallar al enlace adhesivo, hace que el asfalto sea transportado hacia la superficie del agregado y se mantenga en forma de manchas. Al quedar el agregado sin la capa de asfalto que lo cubría, se presentarán en la carpeta asfáltica problemas de fatiga, pérdida de cohesión y adherencia, teniendo como consecuencia pérdida de la resistencia y grandes deformaciones hasta llegar a la total desintegración.

3.6.2 El Clima

El clima es un factor desencadenante en la pérdida del enlace adhesivo, al igual que las cargas debido al tránsito, las fluctuaciones de la temperatura, los ciclos de hielo y deshielo en los países con estaciones y los ciclos de humedecimiento y secado de los países tropicales. Todos estos factores inciden en la resistencia del enlace adhesivo, unos en más

alta proporción que otros, siendo el agua el más influyente en los problemas de daño por humedad en las mezclas de concreto asfáltico.

3.6.3 El Oxígeno

Influye en la adhesión por cuanto modifica las condiciones viscoelásticas de la película de asfalto al producir su oxidación.

3.6.4 Las Cargas Debidas al Tránsito

La combinación del tiempo, magnitud de las cargas y los factores climáticos reducen la vida útil de los pavimentos, ya que producen cambios importantes en la constitución de los materiales. El tránsito a altas velocidades ocasiona sobre la carpeta asfáltica tensiones rápidas y transitorias que generan fuerzas tangenciales que afectan la película asfáltica y poseen mayor incidencia cuando el asfalto posee cambios en sus características viscoelásticas, haciéndolo más rígido y frágil debido a su envejecimiento. Esto da origen a la aparición de fracturas frágiles, produciéndose la ruptura del enlace agregado – asfalto y afectando la adhesión y cohesión de la mezcla asfáltica.

3.7 CAUSA Y PREVENCIÓN DEL DESVESTIMIENTO DE AGREGADOS EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

EL principio de desvestimiento es la ruptura del enlace adhesivo entre la superficie del agregado y el cemento asfáltico. Por lo general, comienza en la capa extrema y continúa hasta que debilita la estructura del pavimento. En esta situación se pueden detallar dos tipos de fallas: La primera es cuando la falla está en el asfalto que separa las partículas del agregado mineral entre sí. En el caso de falta de adhesión, la separación la conversan entre todos. Generalmente las fallas se producen por solo la falta de cohesión

La adhesión está definida como la fuerza de atracción de las moléculas que hacen que los cuerpos se unan conjuntamente. La adhesión es un fenómeno de superficie que depende del contacto íntimo de los dos materiales y de la atracción mutua de sus superficies, además es causada por la energía libre sobre la superficie del líquido que también es llamada “tensión superficial”. Para un mejor contacto entre el asfalto y la superficie del agregado mineral, este debe estar completamente líquido, ya sea por calentamiento, emulsificación o por mezcla con solventes del petróleo.

La viscosidad controla el poder humectante del asfalto, a mayor viscosidad, mayor poder humectante. La humectabilidad es la habilidad que tiene un agregado para hacer contacto con un líquido. La mayoría de los agregados tienen atracción por el agua así como por el asfalto. Si un agregado tiene su superficie con una película de agua, el asfalto no se pegará a la superficie a menos de que remplace la película de agua; lo mismo puede suceder si la superficie del agregado está cubierta por una capa de finos. La textura de la superficie, la porosidad y la absorción, afectan la adhesión de un asfalto al agregado. Los agregados de superficie lisa, no mantendrán una película firme de asfalto, situación contraria sucede con los agregados de superficie rugosa. De igual manera sucederá con los agregados de

superficie lisa o porosa. Los agregados porosos necesitarán más asfalto que los agregados no porosos.

TABLA 2. DEFINICIONES DE DESVESTIMIENTO

FUENTE	REFERENCIA	DEFINICIÓN
Instituto del Asfalto	ES - 10	La ruptura del enlace adhesivo entre la agregación de superficie y el cemento asfáltico
D.E. Tunnicliff	AAPT. Vol. 51 1982	Desplazamiento de películas de cemento asfáltico por el agua causada bajo condiciones en las cuales la agregación de superficies es más fácilmente mojada por agua que por asfalto
T. W. Kennedy	AAPT. Vol. 51 1982	La separación física del cemento asfáltico de la agregación producida por la pérdida de adherencia primaria debido a la acción del agua o del vapor de agua.
J. C. Petersen	Seminario Universidad Auburn Primavera, 1987	Deterioro o pérdida del enlace adhesivo entre el asfalto y el agregado por acción del agua.
Kiggurdu	NCAT 1987 Universidad Auburn	El deterioro funcional progresivo de la mezcla de pavimento por pérdida del enlace adherente entre el cemento asfáltico y la agregación de superficie y/o las pérdidas de resistencia cohesiva en el cemento asfáltico principalmente por la acción del agua.
Khosla & Gharaybeh	TRR 911 (1983) Disertación 1987 Universidad Auburn	La pérdida del enlace entre la atadura de asfalto y el agregado mineral debido a la separación de las capas de cemento asfáltico en presencia de agua.

ES: Serie Educativa

AAPT: Asociación Tecnológica de Pavimentos de Asfalto

NCAT: Centro Nacional de Tecnologías del Asfalto

TRR: Instituto de Investigación de Transportes

La única causa existente de desvestimiento es la acción del agua entre la película de asfalto y la superficie del agregado y el reemplazo del asfalto como capa protectora del agregado.

Son muchas las formas como el agua puede alcanzar la estructura del pavimento:

3.7.1 Agua En o Sobre el Agregado

El agregado puede absorber o adsorber el agua que fácilmente separará los agregados sino están debidamente secos. A temperaturas de secado por encima de los 100°C una gran cantidad de moléculas de agua es retirada de las superficies, esto mejora la humectabilidad, así como también el poder humectante del asfalto por la reducción de la viscosidad.

3.7.2 Tipo de Agregado

Hay pocos agregados que resisten completamente la acción del agua bajo todas las condiciones de uso. Se tiene la creencia que los agregados con altos contenidos de sílice (hidrofilicos), son aptos para separarse y que los agregados con su bajo o nulo contenido (hidrofóbicos), no lo son. Esta afirmación en la práctica no se ha demostrado. Los agregados silíceos son usados con mucho éxito, en áreas donde se concentra la atención a los diseños y propiedades de la mezcla y a su práctica de construcción. Se ha pensado que es seguro utilizar roca de carbonato hidrofóbico (cal hidratada), si está disponible, pero no debe ser usada en capas de superficie.

3.7.3 Emulsificación Espontánea

Bajo las cargas de tránsito, el asfalto en la mezcla puede reaccionar con el agua libre para formar una emulsión inversa, que consiste en tener gotas de agua en el asfalto en lugar de tener gotas de asfalto en el agua como se encuentra en las emulsiones asfálticas corrientes. Cuando esto sucede, el asfalto se separa del agregado.

Algunos aditivos resultan inicialmente con un mejor cubrimiento, pero aceleran el desvestimiento al desarrollarse la emulsión. Se debe tener en cuenta que en muestras de pavimento con problemas de desvestimiento, almacenadas en un ambiente seco, las partículas de agregado, pueden llegar a ser recubiertas cuando el agua se evapora. Las arcillas minerales como la bentonita, montmorillonita, caolinita y atapulgita, pueden ser emulsificadas. La arcilla en combinación con el agua, el calor y la acción del tráfico puede emulsificar el asfalto en una mezcla (6).

3.7.4 Edad de Apilamiento

Un agregado grueso recién triturado tiene pobre resistencia al desvestimiento del asfalto, si es utilizado tan pronto es triturado. Pero si el agregado es apilado por un determinado tiempo, esta resistencia al desvestimiento generalmente disminuye a un nivel aceptable debido a la reorientación de las moléculas de la superficie (18).

3.7.5 Agregado Cubierto de Finos

Si un agregado se encuentra cubierto de finos, el asfalto no se adhiere a él. Si hay presencia de agua, las partículas se desvisten rápidamente, ya que los finos crean cavidades en la capa de asfalto, que permiten el paso de agua a la superficie del agregado.

3.7.6 Agua Libre

La mayoría de los desvestimientos comienzan donde la capa inferior del pavimento asfáltico se encuentra con la base granular húmeda, ya que el agua trabaja a través de las capas tratadas, desvistiendo gradualmente los agregados gruesos.

Los pavimentos asfálticos sobre bases granulares no tratadas, con un buen diseño y un drenaje adecuado y trabajando en perfectas condiciones, no sufre de desvestimiento, aunque hayan sido fabricados con agregados con tendencia al desvestimiento. El desvestimiento también sucede sobre capas de cemento portland viejo y en pavimentos asfálticos donde se impide un libre drenaje.

3.7.7 Altos Vacíos de Aire

Pavimentos con contenidos de vacíos muy altos (mayores o iguales al 8%), son más propensos al desvestimiento después de la compactación, si no se provee de un sistema de drenaje libre. Se debe hacer énfasis en la necesidad de proporcionar una adecuada compactación de la mezcla asfáltica durante la construcción (6). Además la permeabilidad de la mezcla hace que la oxidación del ligante asfáltico aumente dando origen a un prematuro fisuramiento (29).

3.7.8 Exceso de Aditivo Anti-Desvestimiento

Estos agentes pueden llegar a ser agentes de desvestimiento bajo ciertas condiciones: usados particularmente en mayores cantidades a las recomendadas.

3.8 TIPOS DE DESVESTIMIENTO

Sucede cuando el enlace entre el agregado y el asfalto se rompe por acción del agua. El agua puede estar sobre el agregado o en él, por secamiento incompleto o venir de alguna otra fuente. Las teorías por las cuales se puede romper el enlace asfalto – agregado son las siguientes:

3.8.1 Teoría de la Separación o Desprendimiento Termodinámico de la Película Asfáltica

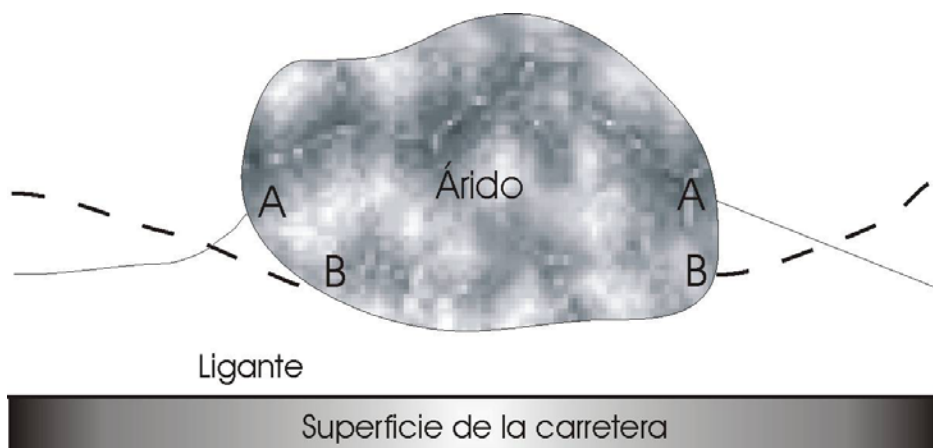
En este caso se tiene en cuenta que a pesar de conservarse la película bituminosa del agregado mineral, ya no existe una verdadera unión entre el asfalto y el agregado, y se atribuye a una sustitución del asfalto por una fina película de agua por motivos termodinámicos, que puede provenir de afuera o del mismo agregado. (4)

3.8.2 Teoría del Desplazamiento por Retracción de la Envuelta

Para examinar esta teoría, Blott (4,5), estudió el estado de equilibrio de una partícula de agregado inserto en una película de asfalto. Un punto de contacto que se alcanza en estado seco deja de estar en equilibrio al penetrar agua, retirándose sobre la superficie del agregado hasta otro punto.

El ángulo de borde que se logra en esta posición, alcanza su valor de equilibrio para el agregado y el ligante empleado. De esta manera se proporciona una primera explicación de las fallas por falta de adhesión como las que se observan en los tratamientos superficiales y en las mezclas con agregados minerales parcialmente envueltos. Pero no es suficiente, a no ser que se haya destruido la uniformidad de la envuelta, quedando expuesta la superficie de contacto a los efectos del agua. (5)

FIGURA 16. DESPLAZAMIENTO DEL ASFALTO POR EL AGUA EN LA SUPERFICIE DEL AGREGADO



3.8.3 Teoría de la Rotura de la Película

En las mezclas asfálticas con envuelta del agregado no se puede explicar el desprendimiento de la película del ligante a través de las teorías descritas anteriormente, a no ser que se suponga que esta se ha agrietado. Este tipo de agrietamiento se puede producir con mayor facilidad en los cantos vivos, donde la película es más delgada.

Esta rotura puede ser motivada por las tensiones producidas por el efecto dinámico y de amasado del tráfico, ya que al romperse la película de ligante el agua puede desplazar al asfalto de la superficie del agregado. (5)

3.8.4 Teoría de la Presión de Poros

Lee y Nicholas (4,5), suponen que el origen de esta falla puede ser el desarrollo de una presión en los poros de la carga superior, en mezclas asfálticas con alta cantidad de vacíos, donde el agua puede circular libremente a través de los espacios interconectados. A menudo, como consecuencia de la compactación posterior bajo los efectos del tránsito, puede que atrapada cierta cantidad de agua dentro de una capa impidiendo su desagüe.

El constante movimiento del agua, puede ocasionar presión en los poros. Estas fuerzas de compresión pueden llegar a ser considerablemente mayores que las termodinámicas, y originan el desprendimiento de la capa del ligante, desplazado por el agua.

En la siguiente figura se describe el ataque del agua a la envuelta del asfalto. En la primera fase A, el agua busca el camino para establecer contacto con la superficie del agregado mineral. En la fase B, el agua pasa por la envuelta del ligante, hasta rodear todo el grano. En la fase C, se separa totalmente el ligante del agregado.

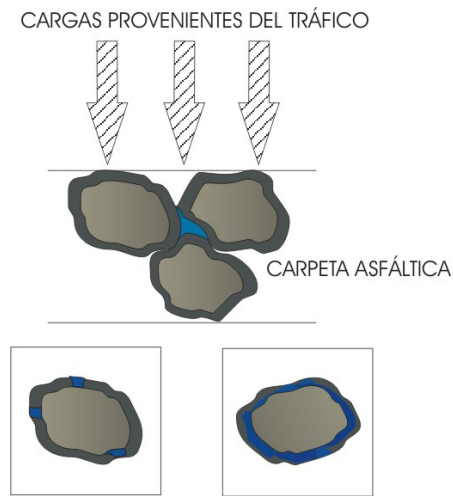


FIGURA 17. GENERACIÓN DEL MECANISMO DE PRESIÓN DE PORO

INICIO Y GENERALIZACIÓN DE LA RUPTURA DEL ENLACE ASFALTO-AGREGADO DEBIDO AL MECANISMO DE PRESIÓN DE PORO

3.8.5 Teoría de la Abrasión Hidráulica

Esta teoría aplica más a la superficie de los agregados gruesos. Cuando se encuentra el pavimento en estado de saturación, las llantas de los vehículos transitantes ejercen una presión al agua dentro de la estructura del pavimento en la parte frontal de los neumáticos que es absorbida por la parte trasera. Los finos tienden a mezclarse con el agua lluvia y se acelera el proceso de abrasión de la película de asfalto. Este movimiento del agua tiende a desprender el agregado (4,5).

4. ANÁLISIS

4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Teniendo en cuenta que la crisis económica y social que afecta nuestro país, ha disminuido en gran medida las obras de infraestructura, el diseño de éstas debe obedecer cada vez más a criterios técnicos que permitan una mayor durabilidad y un mejor desempeño al ser realizadas. Un ejemplo crítico de esta situación se refleja en el mantenimiento de la malla vial, y en los altos costos que implica la adecuación y reparación de estructuras de pavimento.

La durabilidad de un pavimento de concreto asfáltico depende básicamente de la estabilidad de la mezcla entre agregados y asfalto, la cual se ve afectada por diversos factores tales como los procesos constructivos, el tránsito, los fuertes cambios de temperatura, los ciclos de humedecimiento y secado, la calidad de los materiales y el agua presente en la estructura de pavimento, siendo este último un elemento crítico debido a la posición geográfica del país dentro de la zona tropical, con una alta pluviosidad y factores climáticos cambiantes que sumados a la no impermeabilidad del pavimento, favorecen la infiltración de agua en la estructura disminuyendo su resistencia. Además, basándonos en estadísticas, el 90% de la carga transportada en nuestro país, se desplaza por la red vial nacional en vehículos que sobrepasan los límites de capacidad permitidos, y que son un factor muy importante que se debe considerar unido a los factores climáticos y geológicos ya enumerados.

Generalmente los sistemas diseñados hasta ahora en nuestra malla vial, no permite la evacuación del agua rápidamente, originando un mecanismo interno de autodestrucción,

que ocasiona daños severos en las estructuras de los pavimentos ya sean flexibles o rígidos. Esta acción del agua, que generalmente proviene de la infiltración que se aloja en bases y subbases, no se ha tenido en cuenta en el diseño de los pavimentos ya que se ha hecho un mayor énfasis en criterios como Resistencia del suelo - CBR y Pesos Volumétricos altos.

4.2 EVALUACIÓN

Para medir el desvestimiento existen diversos ensayos tradicionales que evalúan la sensibilidad de la mezcla expuesta a la acción del agua, pero hasta el momento no se ha realizado ninguno teniendo en cuenta el efecto producido por la Presión de Poro.

Para esta evaluación se proponen los siguientes ensayos:

4.2.1 Normatividad Norteamericana

4.2.1.1 Método de Lottman o Tensión Indirecta

Se utilizan probetas de 4 pulgadas de diámetro por 2.5 pulgadas de altura, que son compactadas hasta alcanzar un porcentaje de vacíos del 4 al 8%. Las briquetas son divididas en dos grupos, en el que el primero es sometido a esfuerzos de tensión indirecta en condición seca y el segundo se somete a saturación mediante inducción de vacío seguido de ciclos de congelamiento y descongelamiento en agua tibia, para luego ser sometido al ensayo de tracción indirecta. Mediante la comparación de los resultados de los grupos se obtienen los índices numéricos de las propiedades de la tensión indirecta. Este ensayo es

usado para predecir a largo plazo la susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas y en la evaluación de la efectividad de aditivos antistripping.

4.2.1.1.2 AASHTO T 283

Es una variación del Método de Lottman, con la diferencia del acondicionamiento de las probetas. Estas se compactan hasta alcanzar un porcentaje de vacíos de $7 \pm 1 \%$, se someten a una saturación de entre el 55 y 80% y se evalúan por tensión indirecta. Los resultados obtenidos son comparados entre las probetas con acondicionamiento y las que no lo tienen, hallándose su relación. Se recomienda que la relación sea mayor al 70%.

4.2.1.2 Root Test (ASTM D 4867)

En este ensayo el nivel de saturación es importante para asegurar que la humedad penetre y se presente el desvestimiento. El porcentaje de saturación que debe alcanzarse está en el rango de entre 55 y 80% y el porcentaje de vacíos cercano al 7%. Las probetas utilizadas son iguales a las del Método Lottman. Los resultados se evalúan mediante la comparación de los valores de tensile strength de las briquetas a las que se les a inducido saturación y las que no se le realizó ningún acondicionamiento.

4.2.1.3 Boiling Test (ASTM D 3625)

Es un chequeo preliminar ya que provee resultados para la diferenciación entre el desvestimiento o no de una mezcla. Mide la pérdida de película de la mezcla al someterla a ebullición durante un minuto. El desvestimiento se estima mediante examen visual del porcentaje de área total del agregado que retiene el cubrimiento original del ligante y se clasifica como superior al 95% o inferior a este valor.

4.2.1.4 Ensayo de Inmersión – Compresión (ASTM D 1075 – AASHTO T 165)

Para este ensayo se utilizan briquetas de 4 pulgadas de diámetro, por 4” de altura, compactadas utilizando el Método de doble pistón a una presión de 3000 psi. Las probetas se dividen en dos grupos, al primero se le adiciona agua tibia a aproximadamente 60°C durante 24 horas y al segundo no se le realiza ninguna caracterización. Se evalúa la resistencia mediante compresión simple y se relacionan los resultados para hallar un índice. Si este es mayor al 70%, se considera como aceptable.

4.2.1.5 Freeze – Thaw Pedestal Test

Este Ensayo determina la sensibilidad de la mezcla asfáltica de los daños inducidos por la humedad. Se utilizan especímenes de espesor 1.905 cm de espesor y 4.133 cm de diámetro, con un peso aproximado de 50 gramos. Para la elaboración de las probetas es necesario preparar una gradación abierta con un porcentaje de asfalto del 5%, características que combinadas hacen que se reduzcan las interacciones de las partículas de

agregado y asfalto en la composición, produciendo una mezcla muy permeable en la cual el agua entra con facilidad. En este ensayo se consideran 11 tipos diferentes de agregados que son previamente escogidos de acuerdo a sus características fisicoquímicas y mineralógicas. Estos agregados son previamente lavados y secados a temperatura de 150°C durante 24 horas (29).

En la realización de la mezcla, los componentes son anteriormente calentados a unas temperaturas determinadas. La mezcla se prepara con un contenido de asfalto del 5% para 100 gramos y se deja curar de 4 a 5 horas a una temperatura de 150°C. Cuando se culmina esta fase, la mezcla es separada en dos porciones iguales, dejándola reposar durante 6 horas para su enfriamiento.

Lo más delicado del procedimiento es la compactación de las probetas. Se calienta 50 gramos del material a 150°C, durante 20 minutos. Se remueve con una cuchara y se deposita en el molde a temperatura ambiente. Este paso debe hacerse en máximo 1.5 minutos, tiempo después del cual los datos no son confiables. La compactación se realiza con una presión de 4,27 MPa o 6200 psi durante 20 minutos. La probeta se retira con una leve presión aplicada, haciendo girar suavemente la base y una vez retirada se deja curar durante tres días a temperatura ambiente.

Se sumerge 0.5 pulgadas de la probeta en un recipiente con agua destilada previamente congelada a -10°C y se deja en el congelador por un lapso de 24 horas. Después de terminado el juicio de congelamiento se procede al paso de descongelamiento en un baño caliente. Al fundirse el hielo, la probeta se pasa a un baño termostatazo a 60°C por 24 horas, y así terminar el ciclo de congelamiento y deshiele (Freeze – Thaw). Se hace un análisis visual para apreciar el apareamiento de grietas. Si estas no se observan, se repite el ciclo hasta su aparición y si se presentan, constituyen la falla y por tanto el fin del ensayo.

4.2.1.6 Net Adsorption Test

El objetivo de este ensayo es evaluar la habilidad de un asfalto a adherirse a la superficie de una porción de agregado fino y la sensibilidad a la humedad (29).

Se introduce una solución de ligante asfáltico y tolueno en una columna de reacción y se hace circular en ella. Al establecerse la temperatura, 4 mililitros de solución son removidos y se determina su absorbancia por un espectrómetro. Se adicionan a la columna 50 gramos de material que pase el tamiz N°4 y se circula la solución por 6.5 horas. Al terminar este tiempo se remueven otra vez 4 mililitros de solución y se determina su absorbancia.

Con la diferencia entre las dos lecturas de la absorbancia se determina la cantidad de asfalto que ha sido removida de la solución por atracción química entre los componentes moleculares del agregado y el ligante asfáltico. Después de que la segunda solución es retirada se adiciona a la columna de agua 1150 µl y se circula a través del sistema por dos horas. Se toma una solución final de 4 mililitros al cabo de dos horas. Se mide el incremento en la adsorción por la cantidad de ligante asfáltico desplazado por las moléculas de agua.

4.2.2 Normatividad Colombiana

4.2.2.1 Ensayo de Inmerso – Compresión (Efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas asfálticas compactadas) (INV E – 738)

El objetivo de este ensayo es conocer la pérdida de la cohesión que se produce debido a la acción del agua sobre las mezclas asfálticas compactadas, obteniendo un índice numérico al comparar las resistencias a la compresión simple obtenidas en probetas construidas y curadas al aire y otras similares pero bajo la acción del agua.

4.2.2.2 Método de Riedel-Weber. (Adhesividad de los Ligantes Bituminosos a los Agregados Finos) (INV E – 744)

Determinar la adhesividad de los ligantes asfálticos respecto de una arena natural o triturada, cuando la mezcla se somete a la acción de soluciones de carbonato sódico de concentraciones crecientes, es el objetivo de este Método que es aplicable a la mayoría de los tipos de ligantes, ya sean asfaltos líquidos, alquitranes, emulsiones asfálticas o asfaltos de penetración.

Se toma una muestra de 200 gramos de material que pase por el tamiz N°30 y se retenga en el N°70. Se lava y se seca durante una hora y acto seguido se realiza la mezcla con una proporción de 71 volúmenes de agregado por 29 volúmenes de ligante. Se toman 11 muestras de 0.5 gramos cada una y se les adiciona una cantidad creciente de carbonato sódico y se marca el nivel del líquido. Se someten a calor los tubos de ensayo hasta que hierva la solución y se le mantienen esas condiciones por un minuto.

Para finalizar se realiza una observación teniendo en cuenta que el desprendimiento entre el ligante y el agregado se considera total cuando todos los granos de arena aparezcan limpios y desprendimiento parcial cuando no todos los granos tengan esta misma apariencia, manteniendo entre ellos una cierta cohesión.

4.2.2.3 Tensión Indirecta (AASHTO T – 283 - INVIAS E – 749)

Este ensayo ayuda a identificar si una combinación entre agregado-asfalto es susceptible bajo la acción del agua y mide la calidad de los aditivos mejoradores de adherencia que se adicionan a la mezcla. Los límites de vacíos en las mezclas asfálticas aseguran que posean un suficiente espacio para el ligante, los agregados y los vacíos con aire, para un adecuado desempeño de la mezcla.

De este ensayo se obtiene la relación de la resistencia a la tracción TSR (Tensile Strength Ratio) de un grupo de probetas con un acondicionamiento específico en comparación con otro grupo sin este acondicionamiento. Este TSR encontrado debe ser de por lo menos 80%.

4.2.2.4 Efecto del agua sobre las mezclas asfálticas sueltas (INV E – 757)

Por medio de este ensayo se determina visualmente la pérdida de la adherencia en las mezclas sueltas de agregados cubiertos con asfaltos, bajo la acción acelerada del agua hirviente. Este método no puede ser usado como indicador del comportamiento en campo, ya que no hay una correlación para este fin.

Se toma un litro de agua en un recipiente y se calienta hasta su ebullición. Se introducen 225 gramos de mezcla y se continúa calentando hasta que vuelva a hervir y se mantiene por 10 minutos. Al terminado este lapso, se retira el recipiente y se decanta la mitad de su contenido de agua y se reemplaza con agua fría. Se realiza la estimación visual del porcentaje de área del agregado cubierto y se clasifica como superior o inferior al 95%.

4.2.2.5 Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del Ensayo de Cántabro de pérdida por desgaste (INV E – 760)

El objetivo de este ensayo es valorar directamente la cohesión y la resistencia a la disgregación de la mezcla, ante los efectos abrasivos y de succión, originados por el tráfico.

Se realizan cuatro probetas por cada porcentaje de asfalto, se determina su contenido de vacíos, densidad y desgaste en la Máquina de los Ángeles sin la carga abrasiva de las bolas. Al finalizar el ensayo, se saca la probeta, se pesa de nuevo y se calcula el resultado, siguiendo la siguiente expresión:

$$P = (\text{Peso inicial} - \text{Peso final}) / \text{Peso inicial} * 100$$

P: Valor de la pérdida por desgaste en porcentaje.

4.2.2.6 Ensayo de Resistencia a la Deformación Plástica de las Mezclas Asfálticas mediante la pinta de ensayo de laboratorio (INV E – 756).

Uno de los factores que más influye en el desvestimiento de las carpetas asfálticas es el tránsito que debe soportar. En este ensayo, las probetas sumergidas en agua son sometidas a una simulación del tránsito mediante ruedas en movimiento de vaivén. Está basado en el Wheel Tracking Test presentado por el Road Research Laboratory de Inglaterra y el criterio que lo identifica es el tiempo requerido para llegar a la rotura o el punto de inflexión de la pendiente del stripping.

4.3 ESTUDIOS ANTECEDENTES

4.3.1 Estudios realizados sobre Adherencia

En el ámbito internacional se encuentra gran cantidad de estudios en lo que se refiere a adherencia y a desvestimiento, a nivel regional se han hecho algunos estudios particulares.

4.3.1.1 Estudios efectuados a nivel internacional

El primer estudio en analizar el daño que causa la humedad a la estructura del pavimento, fué realizado por McAdam, en 1916 y llegó a la siguiente conclusión: “Si el agua atraviesa una carretera y logra llenar su suelo nativo, el camino, cualquiera que sea su espesor, pierde su soporte y se rompe en pedazos. Durante la primera mitad del siglo XX, este análisis no fué tenido en cuenta al desarrollar nuevas tecnologías en Ingeniería de Pavimentos y solo se acentuaron en parámetros como la resistencia y los pesos volumétricos.

A comienzos de los años 70, es retomada la problemática de los efectos negativos del agua en los pavimentos y Harry Cedergren estudia la necesidad de tener un drenaje adecuado para mantener la carpeta asfáltica libre de humedad porque esta puede causar desvestimiento, algunas de sus causas y la importancia de la Presión de Poro.

En los numerosos artículos escritos por Lottman, R. P., se ha alcanzó un gran avance en el campo del Desvestimiento de Pavimentos Asfálticos, como resultado del método Lottman Modificado TSR – 283 que mide la susceptibilidad de la mezcla asfáltica y contribuyó a mencionar los mecanismos mediante los cuales surge el desvestimiento.

El Grupo NCAT (National Center for Asphalt Technology) de Auburn University of Alabama, dirigido por Prithvi S. Kandhal, ha desarrollado una serie de estudios que han contribuido con la publicación de varios artículos pretendiendo explicar las teorías del fenómeno del desvestimiento en mezclas asfálticas, como causa del agua en los pavimentos (21)(35)(36)(37).

Además del Grupo NCAT, se encuentra también el AAPA (Assosiation Australian of Paviment Asphalt) y el Nacional Institute of Standard and Technology.

En estudios realizados por Petersen (2), dirigidos a entender el fenómeno de desvestimiento y determinar las propiedades fisicoquímicas que ocurren en la interfase agregado – asfalto, se identificaron por medios cualitativos y cuantitativos los grupos funcionales presentes y la relativa adsorción de estos grupos y además se observó que los ácidos carboxílicos son fácilmente absorbidos por la superficie de los agregados y estos a su vez son fácilmente despojados de la superficie del agregado pétreo debido a la acción del agua.

Otros autores como Scott (19), que estudió la ruptura del enlace adhesivo, Ensley (20), tuvo en cuenta la energía del enlace agregado – asfalto mediante el empleo de microcalorimetría concluyendo que el potencial de desvestimiento tiene relación con altas energías en el enlace adhesivo. Plancher (21), quien sugiere en su estudio que los agregados que interactúan fuertemente con los compuestos nitrogenados pueden ser sensibles al desvestimiento.

Toda esta serie de estudios, han contribuido en el desarrollo de ensayos que pretenden analizar el fenómeno de desvestimiento o stripping desde dos puntos de vista diferentes: el cualitativo y el cuantitativo.

4.3.1.2 Estudios efectuados a nivel regional

En la Universidad Industrial de Santander, se han ejecutado diversos estudios para evaluar la adherencia entre los agregados y el asfalto, entre los cuales encontramos los siguientes:

4.3.1.2.1 Estudio de la Adherencia y las Interacciones agregado-asfalto.

Esta monografía fue presentada como requisito para obtener el título de Especialista en Pavimentos y fue realizada por Claver y Salah. En esta se encuentra una recopilación de la teoría de la adhesión y los mecanismos de desvestimiento.

4.3.1.2.2 Estudio de los Fenómenos de Adherencia (Stripping) y los ensayos de evaluación de comportamiento de la interfase árido – ligante en mezclas asfálticas.

Esta monografía fue realizada por Leonel Hernández como requisito para obtener el título de Especialista en Pavimentos y pretende recomendar una metodología que pueda permitir la evaluación del fenómeno del desvestimiento, identificando sus causas. Aquí se propone evaluar la adherencia mediante el uso de pruebas dinámicas.

4.3.1.2.3 Estudio de Adherencia agregado-asfalto empleando estabilidad sumergida.

Esta tesis de grado realizada por Cordero Ochoa Lucy Amparo y García Caballero Sergio, utilizó asfaltos de Apiay y Barrancabermeja, mezclados con seis tipos de agregados pétreos como son granito, arenisca, caliza, mármol, gneis y cuarcita, se determinó la estabilidad remanente de las mezclas asfálticas como relación de los ensayos de estabilidad marshall entre dos especímenes con igual energía de compactación, en donde solo uno de ellos es sometido a curado (30 minutos), en un tiempo de inmersión a una determinada temperatura que garantice una saturación de poros completa.

4.3.1.2.4 Estudio comparativo de ensayos para determinar la adherencia agregado-asfalto.

En este proyecto se realizaron siete tipos de ensayos para evaluar las propiedades de las muestras en resistencia, afinidad de cargas de las partículas y su comportamiento bajo la acción del agua en ebullición, con tres tipos de agregados: caliza, gneis y cuarcita y asfalto de Apiay y Barrancabermeja. Después de analizar los datos se concluyó que el ensayo de Tensión Indirecta permitía obtener resultados más precisos en el laboratorio e igualmente la relativa confiabilidad en cuanto a la normas Gost. Esta tesis de grado fué realizada por Beatriz Liliana Montes Gordillo y Oscar Julián Páez Pico como requisito para obtener el título de Ingeniero Civil.

4.3.1.2.5 Estudio para la elaboración de ensayos con carga dinámica que permitan determinar el efecto del agua sobre las mezclas de concreto asfáltico.

El principal objetivo de esta tesis elaborada por Jorge Enrique Amaya Suárez y Marco Antonio Rey Manosalva, era estudiar el efecto agresivo del agua sobre las mezclas de concreto asfáltico empleando el ensayo de cántabro modificado y TSR, con pruebas de carga dinámica y mecánica bajo condiciones seca y saturada. Se permitió comparar mezclas asfálticas mediante la simulación del paso de un vehículo sobre la carpeta asfáltica en presencia de humedad y obteniendo una aproximación del fenómeno del movimiento del agua a través de la mezcla.

4.3.1.2.6 Estudio de la adherencia Agregado – Asfalto en presencia de Presión de Poro.

Este proyecto de grado como requisito parcial para optar el título de Ingeniería Civil, fue realizado por Berenice Garcés G. e Ibet Z. García A., y estudia el comportamiento de la mezcla asfáltica ante los efectos de la presión de poro que se desarrolla en ésta cuando existe presencia de agua y cargas de tránsito conjuntamente, así como que ocurre con el enlace adhesivo y con las características cohesivas de la mezcla cuando se hace presente este mecanismo.

4.3.2 Ensayos propuestos para medir la Adherencia

Por medio de los estudios referentes al tema se han propuesto ensayos como indicadores de stripping o adherencia, diferenciándolos entre cualitativos y cuantitativos.

4.3.2.1 Cualitativos

4.3.2.1.1 Ebullición en agua durante 10 minutos

La mezcla asfáltica es sometida a ebullición durante diez minutos, para luego ser analizado visualmente su desvestimiento. Si este nivel de desvestimiento es inferior al 95%, se considera que es aceptable. Esta prueba es considerada desfavorable teniendo en cuenta el alto grado de subjetividad que se presenta.

4.3.2.1.2 Procedimiento WST

Mide el número de ciclos de congelamiento y descongelamiento en una probeta de mezcla asfáltica hasta que comienza a desarrollar grietas. Algunos investigadores consideran que este procedimiento no es representativo de las condiciones imperantes. La probeta utilizada en este ensayo, se realiza con dimensiones específicas.

4.3.2.1.3 Pedestal de Texas

Este Método es una variación del WST, a fin de ajuste a las aplicaciones de Ingeniería, pero no es aplicable a todo tipo de materiales.

4.3.2.1.4 Gagle

Este procedimiento mide la calidad del cubrimiento de la mezcla agregado – asfalto, después de 24 horas de inmersión en agua destilada, y fué desarrollado para probar la calidad del enlace adhesivo con el asfalto.

4.3.2.1.5 Hamburg Wheel Tracking Test

Este ensayo se utiliza para evaluar las características del rutting y el stripping de vías con altas condiciones de tráfico. La prueba consiste en dos ruedas de acero separadas que se mueven hacia adelante y hacia atrás en especímenes, que pueden ser núcleos extraídos de la vía de 10” o losas de concreto asfáltico preparadas en el laboratorio, tomándose datos de ahuellamiento y temperatura por 20.000 ciclos o 20 milímetros de deformación. Se pretende hallar la gráfica de deformación permanente en milímetros contra Paso de la rueda en ciclos, de esta gráfica se determina el punto de inflexión del stripping (Punto de intersección entre la pendiente de ahuellamiento y la de desvestimiento), cuyo valor es inversamente proporcional a la susceptibilidad de falla por desvestimiento.

4.3.2.2 Cuantitativos

4.3.2.2.1 Desvestimiento (Dinámico)

4.3.2.2.2 Abrasión en Agua Fría (Minnesota)

4.3.2.2.3 Abrasión Superficial (California)

4.3.2.2.4 Test de Susceptibilidad al Vapor de Humedad (California)

4.3.3 Estudios realizados sobre Presión de Poro

La información acerca de este tema es muy escasa, la única referencia encontrada es referida a la teoría, sin hallar artículos específicos al tema. Pocos autores han realizados estudios en los que el mecanismo de la Presión de Poro se mira superficialmente como:

- Lottman. Con los títulos: “The Moisture Mechanism that cause asphalt stripping in asphalt pavement mixtures”, “Debonding whitening water-saturated asphalt concrete due to cyclic effects”. Donde describe el Mecanismo de Presión de Poro con importantes aportes sobre el mismo.
- Majidzadeh k. Con el título: “Effect of water on Bitumen – Aggregate Mixtures”.

- Kandhal. Describe el Mecanismo de Presión de Poro pero no realiza ningún ensayo en el que tenga en cuenta este parámetro.

4.4 PROPUESTA DEL ESTUDIO

El desarrollo de este proyecto pretende continuar el estudio del fenómeno de la adherencia agregado – asfalto, tema que ha sido objeto de algunas investigaciones en la Universidad Industrial de Santander en los últimos años, debido a su influencia en la durabilidad de los pavimentos y las repercusiones económicas que estas conllevan.

Su propósito principal es contribuir a evaluar el efecto de la presión de poro en la resistencia final de probetas realizadas con mezcla asfáltica abierta y sometidas a procesos de acondicionamiento variando la temperatura y la presión aplicadas, e induciendo la acción del agua en la interfase agregado – asfalto para favorecer el desprendimiento, utilizando materiales propios de la región como son los explotados en los ríos Sogamoso y Chicamocha.

Analizando los ensayos establecidos en normatividad colombiana vigente y algunas investigaciones, se plantea concebir un proceso mecánico de laboratorio de fácil ejecución en el que se permita la manipulación de las variables estudiadas de forma sencilla y que una vez validado sea viable su aplicación.

5. METODOLOGÍA

5.1 MATERIALES UTILIZADOS

5.1.1 Agregados

Los Agregados Pétreos usados en este estudio provienen de dos fuentes diferentes ubicadas en el Departamento de Santander, Región nororiental del País. Estas son:

- **RÍO CHICAMOCHA:** Cantera ubicada cerca al Puente Pescadero en el fondo del Cañón del Chicamocha, en la vía Bucaramanga – Bogotá.

FIGURA 18. CANTERA SOBRE EL RÍO CHICAMOCHA



- **RÍO SOGAMOSO:** Cantera ubicada sobre la vía Bucaramanga – Barrancabermeja, en la rivera de este río.

FIGURA 19. CANTERA SOBRE EL RÍO SOGAMOSO



TABLA 3. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LOS MATERIALES UTILIZADOS

FUENTE	COMPOSICIÓN MINERALÓGICA GLOBAL		TIPOS DE ROCAS ENCONTRADAS	
	MINERAL	(%)	ORIGEN	NOMBRE
RIO CHICAMOCHA	Cuarzo	35	Metamórficas (10%)	Granulitas
	Micas	20		
	Feldespatos	10	Sedimentarias (20%)	Calizas
	Anfiboles	20		
	Piroxenos	5	Ígneas (70%)	Granito rosado, Granodiorita, Monzonita
	Accesorios (Calcita, cireon, epidota)	10		
RIO SOGAMOSO	Cuarzo	30	Metamórficas (10%)	Cuarцитas
	Micas	10		
	Terrígenos	40	Sedimentarias (75)	Calizas, Areniscas, Limolitas
	Feldespatos	10		
	Accesorios (Calcita, Apatito)	10	Ígneas (15%)	Detritos de cuarzo

5.1.1.1 Caracterización de los Agregados

Para la realización de este proyecto es indispensable conocer el comportamiento, afinidad y susceptibilidad de cada tipo de material utilizado para poder establecer la influencia de estas variables en el estudio. Las condiciones propias de los materiales y su interacción con los factores externos, determinan el fenómeno de adherencia. Para establecer estas características físicas y de resistencia de cada material, se cumplieron los ensayos que se mencionan a continuación, a fin de conocer el grado de susceptibilidad a condiciones de humedad, carga, rugosidad, angulosidad, tamaño y alargamiento.

Ensayos realizados:

- ❑ Análisis Granulométrico de Agregados Gruesos y Finos. (I.N.V. E – 213)

FIGURA 20. TAMIZADORA



- ❑ Resistencia al Desgaste de los Agregados de tamaños menores a 37.5 mm (1 ½”) por medio de la Máquina de Los Ángeles. (I.N.V. E – 218)

FIGURA 21. MÁQUINA DE LOS ÁNGELES



Sanidad de los Agregados frente a la acción de las Soluciones de Sulfato de Sodio.
(I.N.V. E – 220)

FIGURA 22. ELEMENTOS USADOS EN EL ENSAYO DE SULFATOS



- ❑ Peso Específico y Absorción de Agregados Finos. (I.N.V. E – 222)

- ❑ Peso Específico y Absorción de Agregados Gruesos. (I.N.V. E – 223)

FIGURA 23. BOMBA DE EXTRACCIÓN DE VACÍOS



- ❑ Índice de Aplanamiento y Alargamiento de los Agregados para Carreteras. (I.N.V. E – 230)

FIGURA 24. CALIBRADOR METÁLICO



TABLA 4. CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS PÉTREOS

RESUMEN				
ENSAYO	NORMA INVÍAS	FUENTE		ESPECIFICACIÓN (Norma INVÍAS - Art. 400)
		Río Sogamoso	Río Chicamocha	
Granulometría	E - 213	PA – 12	PA -12	
Índice de Alargamiento	E - 230	28,11%	34,59%	< 35 %
Índice de Aplanamiento	E - 230	21,60%	24,16%	< 35 %
Desgaste en la máquina de los ángeles	E - 218	18,88%	24,28%	< 30 %
Solidez	E - 220	1,89%	1,08%	< 12 %
Peso específico agregados finos	E - 222	2,75	2,72	
Peso específico agregados gruesos	E - 223	2,77	2,74	

Las fichas de los ensayos se encuentran disponibles en la sección de anexos del presente proyecto.

5.1.2 Asfalto

El asfalto utilizado en este proyecto es procedente de la Refinería de Barrancabermeja. Proviene de la mezcla de fondo vacío de base nafténica y fondo vacío de base intermedia, ajustando la penetración, punto de ablandamiento y punto de llama mediante la adición de

distintas cantidades de gasóleo de los mismos crudos (28). Solo se usó asfalto de esta procedencia para tener un parámetro constante en el comportamiento de la mezcla y que las variaciones se deban únicamente a la correlación entre el agregado y el ligante.

5.1.2.1 Características Reológicas del Asfalto

Al asfalto usado se le realizaron los ensayos respectivos para su caracterización de acuerdo a las normas ASTM / NLT. De acuerdo a esto los resultados fueron los siguientes:

TABLA 5. PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL ASFALTO

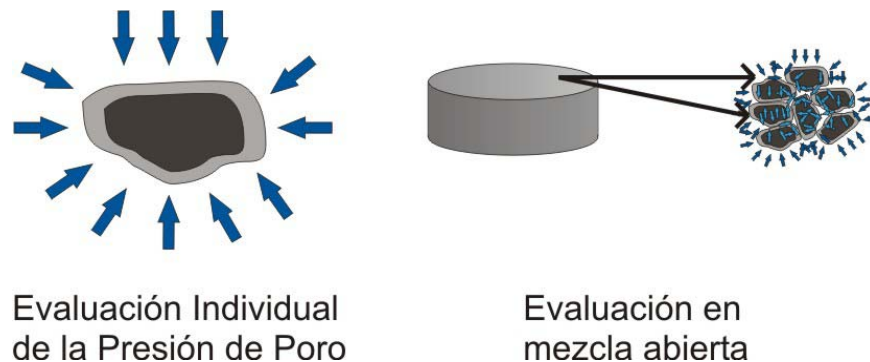
ENSAYO	MÉTODOS (ASTM/NLT)	VALORES
Peso Específico a 25°C	D70/NLT 122	0,998
Penetración 100g, 5s, 25°C, 0,01mm	D5/NLT 124	75
Punto de Chispa, C	D92/NLT 136	315°C
Ductilidad a 25°C	D113/NLT 126	± 100 cm.
Punto de Ablandamiento (anillo y bola)	D36/NLT 125	48,5
Viscosidad Saybolt Furol a 135C, CST	D88/NLT 133	342

5.2 DISEÑO DE MEZCLA

Este proyecto continua la investigación propuesta por Garcés y García (18), aplicando una diferenciación en el acondicionamiento de las probetas a partir de la variable temperatura. Debido a lo cual se emplea el mismo diseño del tipo de mezcla y compactación de las probetas a estudiar.

Las mezclas densas tienen un alto porcentaje de poros que no se encuentran conectados y la aplicación de presiones de poro podrían tener un gran efecto sobre la densificación del material, produciendo un efecto diferente al que se quiere evaluar en este proyecto. Por esta razón se optó por elaborar una serie de probetas que contengan un contenido sobradamente alto de vacíos similar a las mezclas drenantes que permitan que a través de ellas se filtre el agua con facilidad, afirmando la presencia de agua en la mayor parte de sus poros.

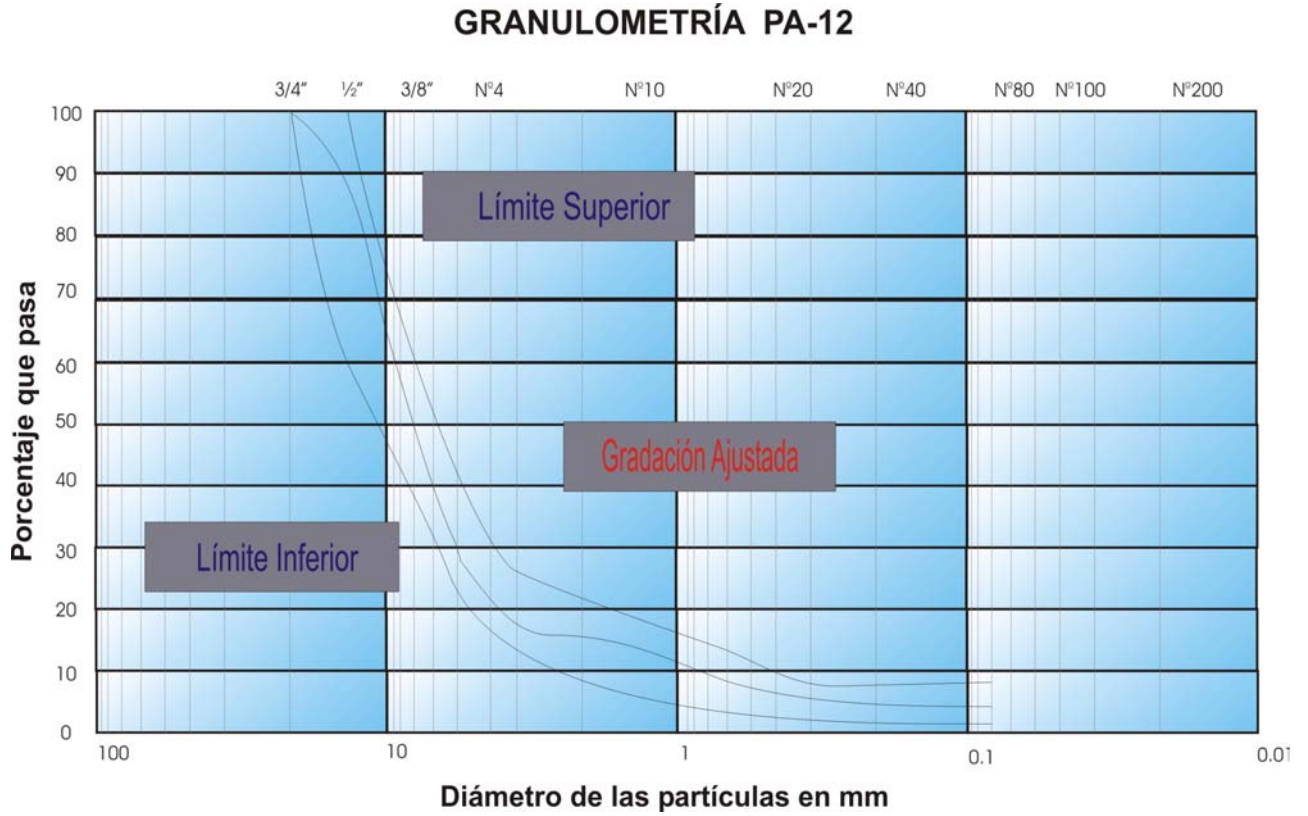
FIGURA 25. CRITERIOS PARA EVALUAR LA PRESIÓN DE PORO



5.2.1 Granulometría utilizada

Para que exista un espacio intersticial adecuado que garantice la permeabilidad de las probetas, se eligió usar una granulometría abierta, en la que sus husos se caracterizan por ser continuos y poseer un alto contenido de agregado grueso. La granulometría PA-12 seleccionada, responde a un porcentaje de vacíos entre el 10 y 21%, y para lograr que la mezcla tenga adecuadas condiciones de cohesividad el porcentaje de finos empleado está entre el 3 y 5%.

FIGURA 26. CURVA GRANULOMÉTRICA ESCOGIDA



Con la gradación abierta se logra un esqueleto mineral adecuado para que los espacios no puedan ser modificados por cargas de presión, ya que al trabajar con mezclas densas los agregados finos tienden a acomodarse entre los gruesos al presentarse cargas.

TABLA 6. GRADACIONES ABIERTAS MÁS UTILIZADAS

TIPO	PORCENTAJE QUE PASA EN CADA TAMIZ						
	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 30	No. 200
P -12	100	75 - 100	60 - 90	32 - 50	10,0-18,0	6,0-12-0	3,0-6,0
PA -12	100	70-100	50-80	15-30	10,0-22,0	6,0-13,0	3,0-6,0

5.2.2 Porcentaje de Asfalto utilizado

Al usar este tipo de granulometría abierta, el papel que desempeña el ligante es fundamental para garantizar la cohesión entre el agregado y lograr las fuerzas adhesivas que se deben realizar en la mezcla. Se hace necesario trabajar una película suficiente de ligante que asegure el total cubrimiento de los agregados pétreos frente al agua y a otras propiedades.

Para determinar el porcentaje de asfalto óptimo para estas condiciones se utilizó la fórmula de Duriez, que halla este valor en función de la superficie específica del agregado. Esta fórmula tiene en cuenta los pesos específicos de los agregados pétreos que constituyen la mezcla, por lo cual se adecua a este tipo de gradación.

Fórmula de Duriez:

$$L = K * (S * A)^{1/5}$$

K: Módulo de Riqueza. Para este caso el valor es de 3.7 (Mezcla Asfáltica abierta)

A: Factor de corrección por densidad

$$A = 1.98857 - 0.37143 * P$$

S: Superficie específica del conjunto de agregados.

Para hallar este factor se multiplica el porcentaje de agregado retenido entre tamices por el factor de superficie específica.

S será igual a la sumatoria de todos los F.S.E. por los porcentajes retenidos parciales dividida entre 100.

$$F.S.E. = \frac{2.5}{(d * D)^{1/5}}$$

Para este proyecto se utilizaron dos porcentajes de asfalto, el obtenido por la fórmula de Duriez (Contenido alto de asfalto) y el segundo porcentaje restándole 0.5 al primero encontrado (Contenido bajo de asfalto).

TABLA 7. PORCENTAJES DE ASFALTO PARA CADA PLANTA

FUENTE	Río	Río
	Chicamocha	Sogamoso
% Asfalto Obtenido	5,65	5,66
% ASF-0,5	5,15	5,16

5.3 ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS

Se tomaron los porcentajes del centro de la granulometría (Figura 22) y se halló una mezcla patrón, partiendo del volumen de cada probeta a partir de los requerimientos del Ensayo de inmerso-compresión (I.N.V. E – 738), que describe el uso de briquetas de 4”x 4”. Conociendo que para una probeta Marshall de 2.5” se necesitan aproximadamente 1200 gramos de agregado si se realiza para un porcentaje de riqueza del 5%, se realizó un ajuste a las cantidades de los materiales.

Siguiendo la siguiente ecuación se establecieron las cantidades de agregado necesarias para cada una de las probetas.

$$Wa_{i-c} = \frac{[(h) * (Wa)]_{Mshll}}{h_{i-c}}$$

W: Peso de agregado para probetas de Inmerso-compresión

h_{i-c} : Altura de la probeta de Inmerso-compresión = 4"

W_{Mshll} : Peso de agregado para probetas Marshall = 1200 gr

h_{i-c} : Altura de la probeta de Marshall = 2.5"

TABLA 8. GRADACIÓN Y PESOS UTILIZADOS EN LA ELABORACIÓN DE CADA PROBETA

TAMIZ	PORCENTAJE QUE PASA	PORCENTAJE RETENIDO PARCIAL	PESO POR TAMIZ (GRAMOS)
1/2"	75	25	456
3/8"	65	10	182,4
No. 4	23	42	766,08
No. 8	15	8	145,92
No. 30	8	7	127,68
No. 200	3	5	91,2
FILLER		3	54,72
TOTAL			1824

FIGURA 27. COMPARACIÓN ENTRE LOS TAMAÑOS DE LAS PROBETAS



El Ensayo de Inmerso-compresión requiere probeta cilíndricas de 4" diámetro y $4" \pm 0.1"$ de altura, por lo que las realizadas tienen en cuenta estas especificaciones.

La temperatura de mezclado y compactación, para cemento asfáltico como ligante son las adecuadas para que la viscosidad en el proceso de realización de las probetas sea de 170 ± 20 cSt (28). Cuando los agregados y el asfalto han alcanzado la temperatura de mezcla se procede a realizarla individualmente. Teniendo en cuenta los porcentajes de asfalto mostrados en la tabla 8, y el peso total de la probeta (tabla 9), se calcula la cantidad de asfalto a agregar a la mezcla.

TEMPERATURAS DE MEZCLADO:

Agregado 160°C

Asfalto 150°C

Una vez realizada la mezcla, se procede a la compactación de las probetas a una temperatura de 140°C, en la Máquina Universal Marca TREBEL, del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Escuela de Ingeniería Civil. Después de tener la mezcla lo más homogénea posible, se vacía en los moldes de compactación, que deben ser precalentados a una temperatura similar a la anteriormente mencionada. El vaciado de la mezcla, se debe hacer en dos capas, en la primera se realiza un preacomodamiento de los materiales, con la aplicación de 25 golpes, opción que se repite al vaciar la segunda capa.

El Método de compactación realizado es el de doble pistón, este requiere una precompactación con una carga de una tonelada la cual debe mantenerse por un minuto, para que la mezcla se acomode. A continuación se le sigue aplicando carga con una velocidad constante de 1 Ton/min, hasta la presión requerida de compactación de 17 toneladas, según la norma INVIAS E - 738. En el estudio realizado por Garcés G. y García A. (18) se encontró que la carga de 17 toneladas mencionada en la Norma producía

fractura de los agregados ya que la mayoría correspondían a gravas gruesas, por lo que se optó por aplicar una carga de 13 toneladas.

Las probetas deben desmoldarse después de dos horas de finalizado el proceso de compactación con ayuda de un gato hidráulico o algún otro dispositivo que permita deslizar de una manera suave y uniforme la probeta. Una vez extraídas deben dejarse en curado por un día y luego de esto se procede a su caracterización.

5.3.1 RESUMEN GRÁFICO

FIGURA 28. AGREGADOS PRECALENTADOS A 160°C



FIGURA 29. CALENTAMIENTO DEL ASFALTO A 150°C



FIGURA 30. INCORPORACIÓN DEL PORCENTAJE DE ASFALTO NECESARIO EN PESO A LOS AGREGADOS



FIGURA 31. PROCESO DE MEZCLADO DE LOS AGREGADOS Y EL ASFALTO, A UNA TEMPERATURA DE 150°C



FIGURA 32. PARA UNA COMPOSICIÓN MÁS HOMOGÉNEA SE UTILIZÓ LA MEZCLADORA DEL LABORATORIO DE HORMIGÓN.



FIGURA 33. DETALLE DE LA MEZCLA YA LISTA



FIGURA 34. VERTIMIENTO DE LA MEZCLA EN UN MOLDE



FIGURA 35. SE MANTIENE LA MEZCLA EN SU MOLDE EN EL HORNO PARA QUE NO SE ENFRÍE Y SE ENCUENTRE EN EL MOMENTO DE LA COMPACTACIÓN A 140°C





FIGURA 36. PRECALENTAMIENTO DE LOS MOLDES DE COMPACTACIÓN, A LA TEMPERATURA ADECUADA.



FIGURA 37. ENGRASADO DE LOS MOLDES DE COMPACTACIÓN.



FIGURA 38. VERTIMIENTO Y ACOMODAMIENTO DE LA MEZCLA EN EL MOLDE DE COMPACTACIÓN.

LA MEZCLA SE INCORPORA EN DOS CAPAS CON 25 GOLPES CADA UNA.



FIGURA 39. PROCESO DE COMPACTACIÓN DE PROBETAS EN LA MÁQUINA UNIVERSAL.



FIGURA 40. DETALLE DE LA CARGA ÚLTIMA APLICADA DE 13 TONELADAS



FIGURA 41. DESMOLDE DE LA PROBETA YA COMPACTADA

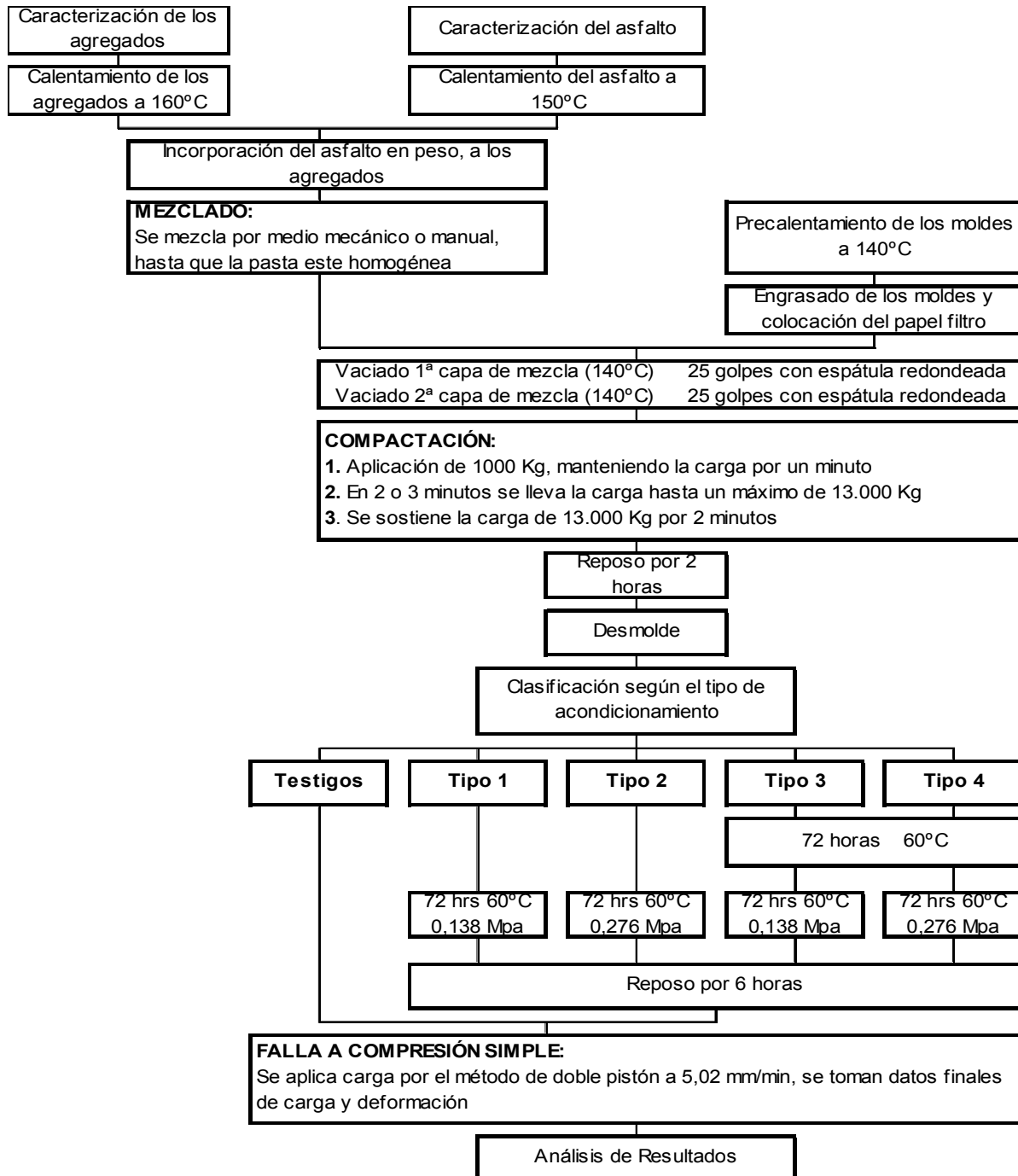


FIGURA 42. PROBETAS COMPACTADAS



5.3.2 RESUMEN ESQUEMÁTICO

FIGURA 43. RESUMEN ESQUEMÁTICO



5.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS

5.4.1 Nomenclatura

Cada probeta se identificó con un código de 4 caracteres, como se describe a continuación:

FIGURA 44. EJEMPLO DE NOMENCLATURA UTILIZADA



El primer carácter corresponde a la Fuente del Agregado, puede ser C si este proviene del río Chicamocha o S si proviene del río Sogamoso.

El Segundo carácter se relaciona con el tipo de acondicionamiento, descrito en la Tabla N° 10, puede tomar los siguientes valores: T para la probeta testigo y 1, 2, 3 o 4 según corresponda el grupo de acondicionamiento.

El tercer carácter establece el contenido de asfalto utilizado, que puede ser N: Normal, es decir el contenido de asfalto obtenido por la fórmula de Duriez ó B: Bajo, como se muestra en la Tabla N° 7.

Como se elaboraron 2 especímenes de cada tipo de probeta, el último carácter corresponde a este, ya sea 1 ó 2

5.4.2 Ensayos de Caracterización

Para comprobar que el porcentaje de vacíos de las probetas coincide con lo estipulado en el diseño, se realizaron los siguientes ensayos:

- ❑ Peso específico aparente y Peso unitario de mezclas asfálticas compactadas empleando especímenes saturados con superficie seca. Norma I.N.V. E. – 733.
- ❑ Peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas para pavimentos. Norma I.N.V. E. – 735.
- ❑ Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas. Norma I.N.V. E. – 736.

FIGURA 45. DENSIDAD MÁXIMA MEDIDA

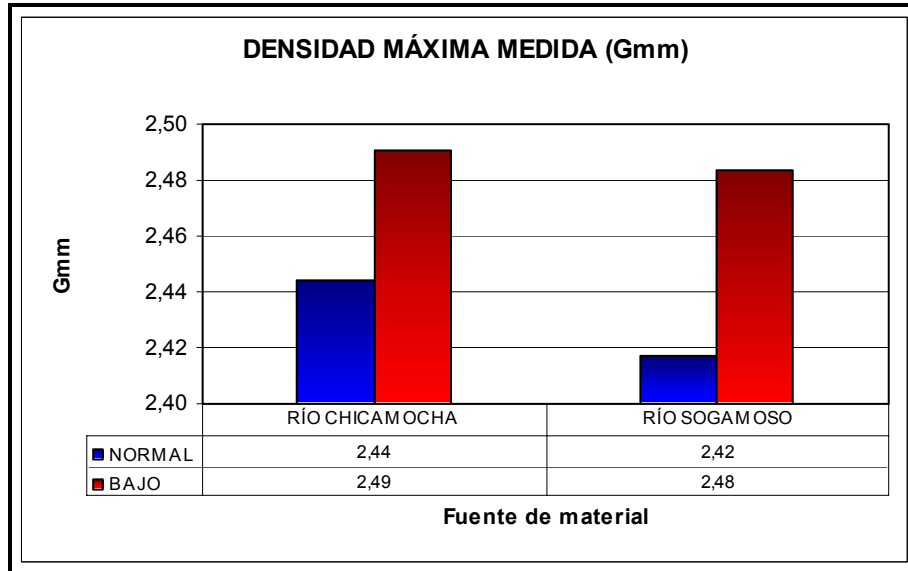
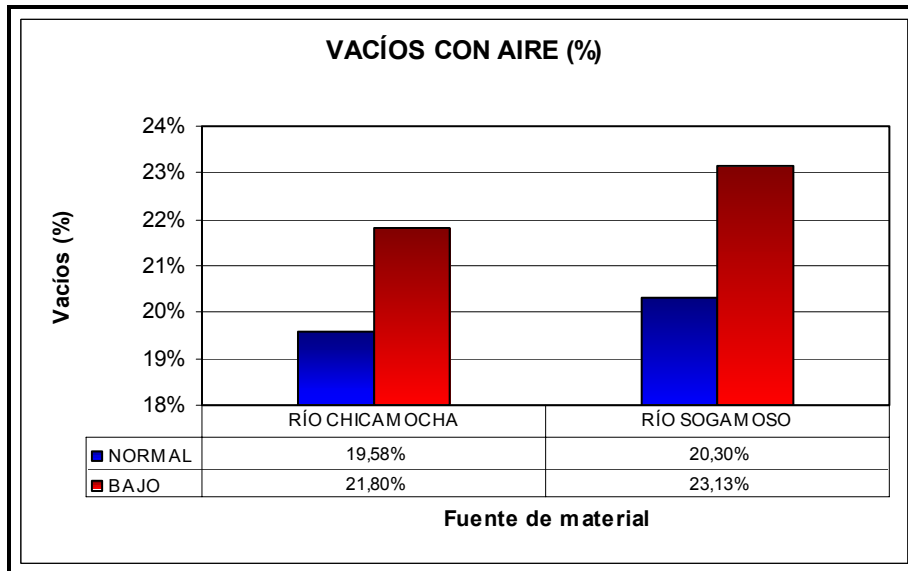


FIGURA 46. PORCENTAJE DE VACÍOS



5.5 ACONDICIONAMIENTO

Luego de finalizado el periodo de curado de las probetas se procede a la subdivisión en grupos con características de acondicionamiento diferentes. En cada grupo se tienen cuatro probetas de las cuales dos se realizaron con contenido óptimo de asfalto y las dos restantes con bajo contenido del mismo.

5.5.1 Determinación del acondicionamiento

Para escoger el período de aplicación de la inmersión de las probetas, se hicieron pruebas sometiéndolas a 24, 48 y 72 horas con la presión máxima de 0.276 MPa., para observar la variación de la resistencia y el efecto del agua sobre el stripping. Teniendo en cuenta este análisis realizado, se decidió optar por un acondicionamiento de 72 horas, en el cual se observó un desprendimiento del asfalto más significativo, que conllevó a una mayor disminución de la resistencia.

FIGURA 47. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA CON EL TIEMPO

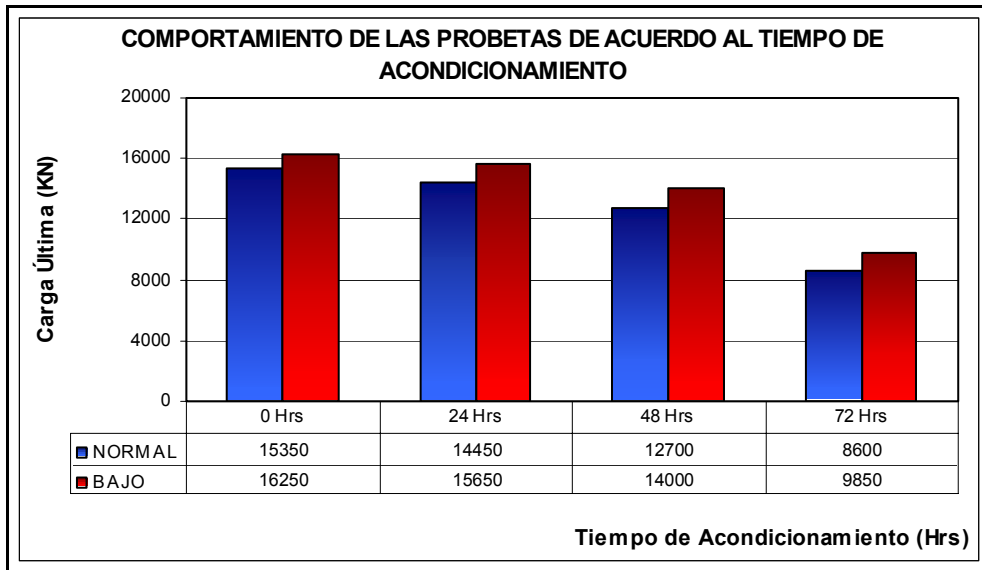


FIGURA 48. DESVESTIMIENTO A LAS 24 HORAS.

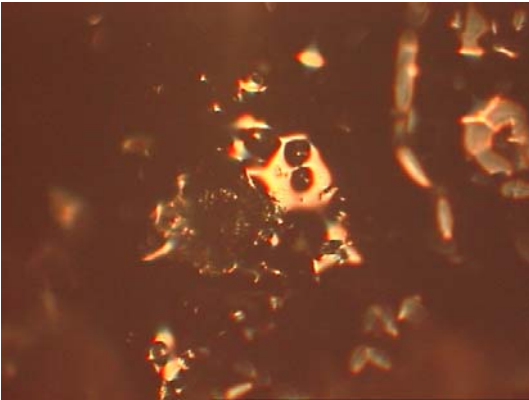


FIGURA 49. DESVESTIMIENTO A LAS 48 HORAS.

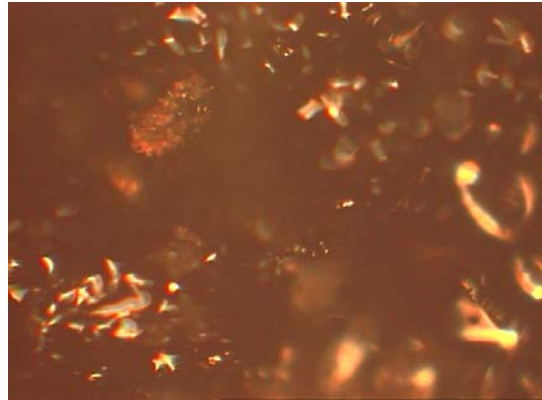
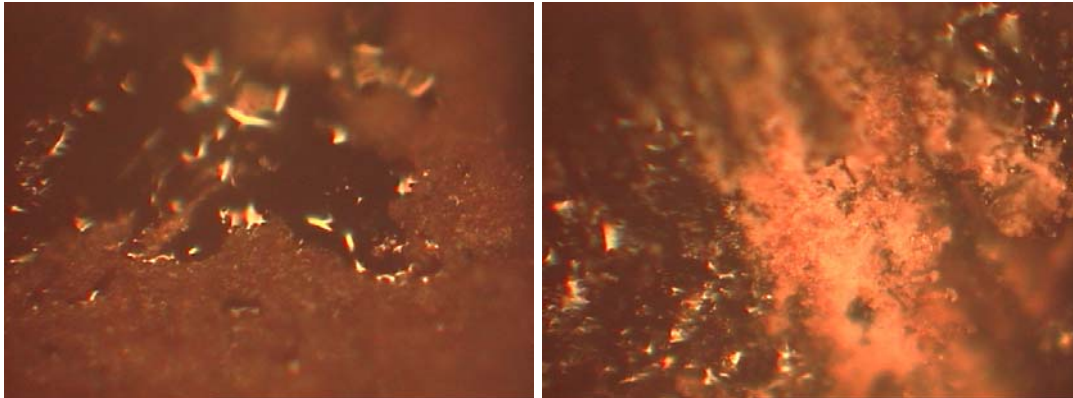


FIGURA 50. DESVESTIMIENTO A LAS 72 HORAS.



5.5.2 Acondicionamiento aplicado

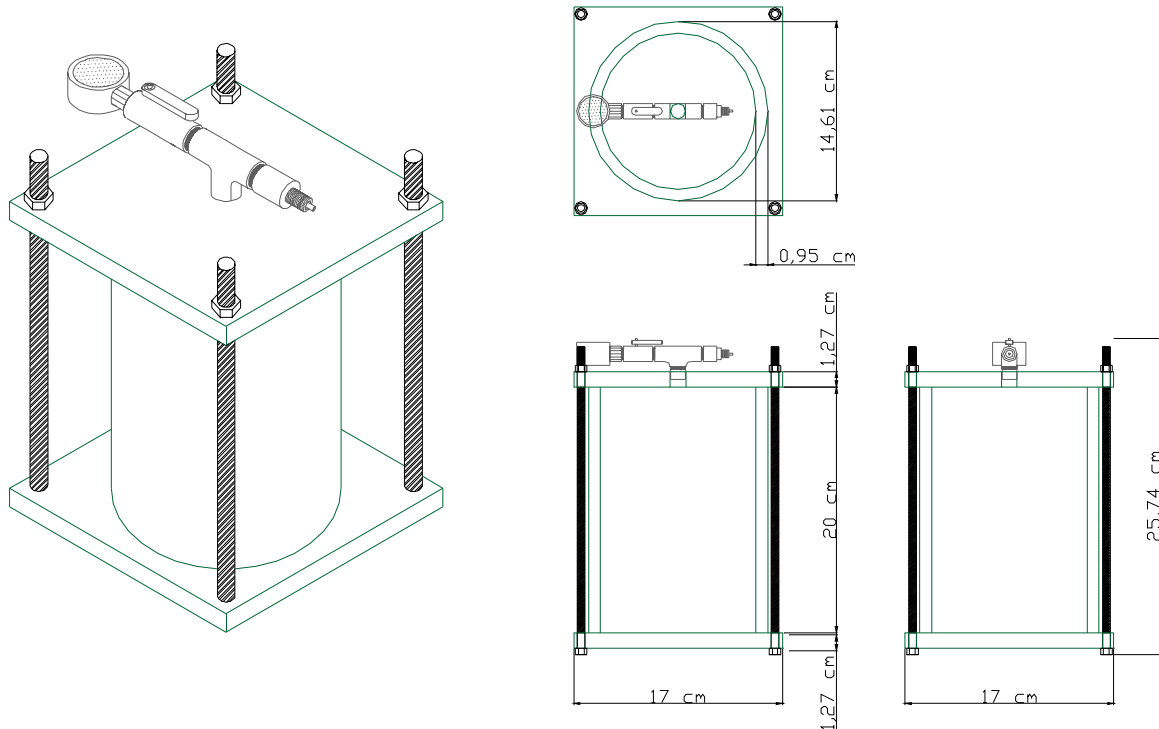
Los testigos no tienen acondicionamiento. Los grupos 1 y 2 no tienen inmersión inicial. Los grupos 3 y 4 se sometieron a inmersión por un período de 72 horas a una temperatura de 60°C. Posteriormente, los grupos 1 y 3 se sometieron a una presión de 0.138 MPa por un tiempo de 72 horas y a una temperatura de 60°C, y los grupos 2 y 4 con las iguales condiciones de temperatura y tiempo pero a una presión de 0.276 MPa. A continuación se detalla en forma más clara el acondicionamiento de cada grupo.

TABLA 9. ACONDICIONAMIENTO DE LOS GRUPOS DE PROBETAS.

TESTIGO				GRUPO 1				GRUPO 2				GRUPO 3				GRUPO 4			
Normal		Bajo		Normal		Bajo		Normal		Bajo		Normal		Bajo		Normal		Bajo	
1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Ninguno												Preacondicionamiento: 72 horas a 60°C							
Ninguno				Acondicionamiento final:															
				Presión: 0.138 Mpa 72 horas a 60°C				Presión: 0.276 Mpa 72 horas a 60°C				Presión: 0.138 Mpa 72 horas a 60°C				Presión: 0.276 Mpa 72 horas a 60°C			

5.5.3 Equipos Utilizados

FIGURA 51. PLANO DEL MOLDE PARA ACONDICIONAMIENTO



De acuerdo a lo planteado en el plan de proyecto se utilizaría el autoclave CENCO WENZEL del Laboratorio de Hormigón, como cámara de presión y temperatura para el acondicionamiento de las probetas. Sin embargo, al conocer las especificaciones técnicas del equipo este servía como cámara de presión pero su rango de temperatura estaba fuera del objeto de este estudio que era 60°C, por lo que se decidió diseñar un molde hermético y con control de temperatura, que facilitara la realización del presente proyecto.

El molde consta de una base metálica conformada por una platina de 17cm x 17cm y 1.27cm ($\frac{1}{2}$ ") de espesor, soldada a un cilindro de 20cm de altura, diámetro externo de 12.7cm (5"), y un espesor de 0.9525cm ($\frac{3}{8}$ ").

FIGURA 52. DETALLE DE LA BASE METÁLICA DEL MOLDE



Sobre este cilindro se encuentra con otra platina que sirve de tapa, cuenta con las mismas dimensiones de la anterior, posee un bisel en su cara inferior donde se ubica un empaque de neopreno de 0.3cm de espesor, se ajusta con 4 tornillos de 0.635cm ($\frac{1}{4}$ ") de diámetro y 25.4cm (10") de largo, todo esto, garantiza un sello hermético del molde.

FIGURA 53. DETALLE DE LA TAPA Y EL EMPAQUE DEL MOLDE



Sobre la tapa se soldó un niple de 1.27 cm ($\frac{1}{2}$ "), sobre el cual se instalaron los siguientes accesorios:

- Una T de 1.27cm (1/2")
- Una Válvula de bola de 1.27cm (1/2")
- Un Manómetro Bourdon de lectura máxima de 7 MPa
- Una Válvula de inyección de aire tipo cheque.

FIGURA 54. DETALLE DE ACCESORIOS DEL MOLDE



FIGURA 55. MOLDE PARA ACONDICIONAMIENTO



Para mantener la temperatura constante, se utilizó un horno con sistema de reventilación que impide variaciones considerables de esta por largos lapsos de tiempo.

FIGURA 56. HORNO DESPATCH DEL LABORATORIO DE HORMIGÓN



5.5.4 Procedimiento

Cada probeta se introduce en el molde, al cual se le adiciona agua destilada para evitar reacciones químicas que puedan alterar las propiedades del ligante. Posteriormente se debe verificar el estado del empaque de neopreno, para garantizar un sello hermético, se ajusta la tapa respectiva del molde, teniendo en cuenta que las tuercas deben ser apretadas en diagonal.

Con la ayuda de un compresor, se inyecta aire hasta lograr la presión deseada en el manómetro. El molde posee una válvula tipo cheque por la cual se inyecta el aire y una válvula de bola anterior al manómetro para poder retirarlo sin afectar la presión interna del molde. El molde se introduce en el horno y se ajusta la temperatura a la cual se desea trabajar (60°C).

Una vez cumplido el ciclo de presión, el molde es retirado del horno, se deja enfriar y se procede a sacar la probeta ya acondicionada.

5.6 EVALUACIÓN DE LAS RESISTENCIAS DE LAS PROBETAS

Las probetas fueron falladas por el Método de Resistencia a la Compresión Simple de mezclas bituminosas, Norma I.N.V.E. – 747, el cual está normalizado para una velocidad de deformación de 5.08 mm/min. Este procedimiento se realizó en la Máquina Universal Trebel del Laboratorio de Resistencia de Materiales, ya descrita anteriormente.

FIGURA 57. DETALLE DE LA FALLA DE PROBETAS A COMPRESIÓN SIMPLE



Se realizó una calibración de la máquina teniendo en cuenta el anillo de carga de Marshall, obteniéndose el siguiente factor de corrección para los datos de las resistencias obtenidas:

$$Y = 0.934X - 3.0982$$

Donde:

X= Carga leída en la Máquina Universal (KN).

Y= Carga corregida (KN).

FIGURA 58. ANILLO DE CARGA MARSHALL



6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los datos presentados en este capítulo, corresponden al promedio de los dos especímenes de cada tipo de acondicionamiento realizados para tener una mejor precisión de los resultados.

Para las dos fuentes, las probetas testigos obtuvieron las resistencias más altas, lo que concuerda con lo esperado de acuerdo con la teoría recopilada.

6.1 PROBETAS CON CONTENIDO APROPIADO DE ASFALTO

6.1.1 Evaluación del efecto de la presión de acondicionamiento

FIGURA 59. RESISTENCIA PARA LAS PROBETAS DE CONTENIDO APROPIADO DE ASFALTO, GRUPOS 1 Y 2

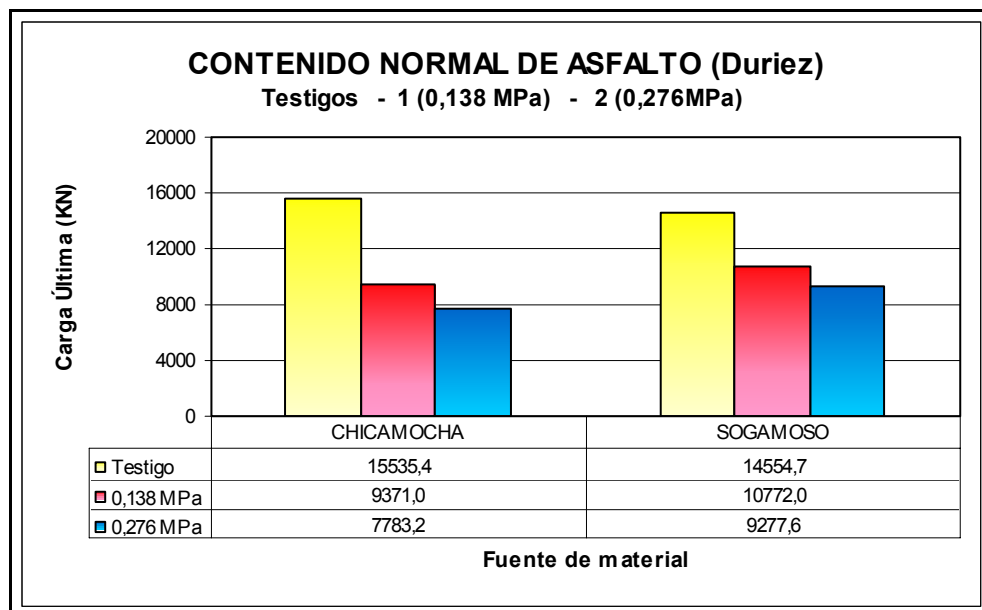
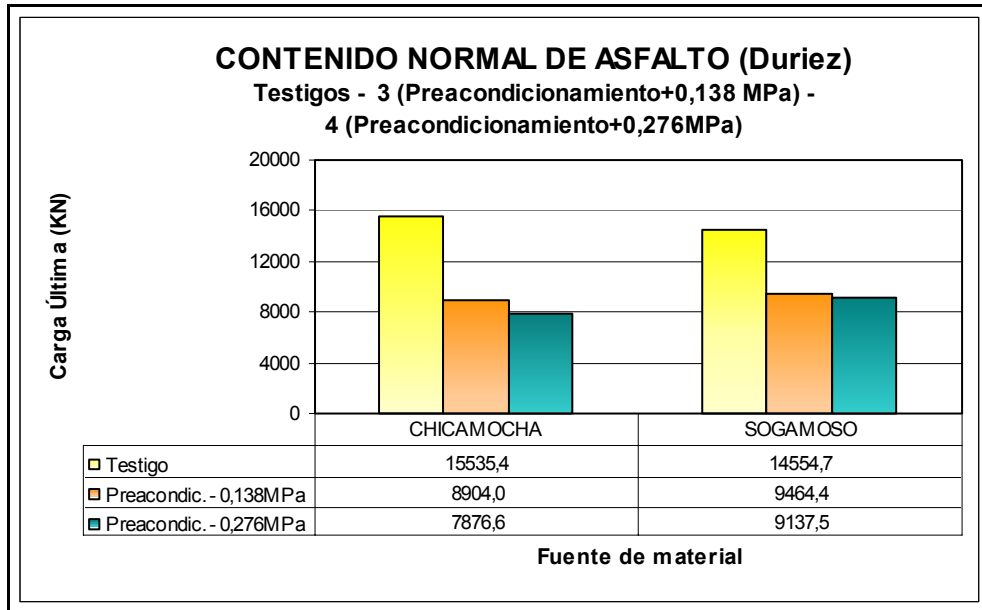


FIGURA 60. RESISTENCIA PARA LAS PROBETAS DE CONTENIDO APROPIADO DE ASFALTO, GRUPOS 3 Y 4



En las probetas sometidas a 0.138 MPa de presión, la carga soportada se redujo en 40% para el agregado proveniente del río Chicamocha y 27% para el del río Sogamoso, y en las probetas sometidas a 0.276 MPa de presión de acondicionamiento, la degradación aumentó a 50% y 37%, respectivamente (Figura 59). Un comportamiento similar se observa en probetas que fueron sometidas al preacondicionamiento (Figura 60).

En los dos materiales evaluados se evidencia una leve reducción de la carga soportada por la probeta al aumentar la presión, por lo que se infiere que en el acondicionamiento al aumentar la presión se puede ocasionar un daño más acelerado en la probeta.

6.1.2 Análisis del efecto del precondicionamiento.

FIGURA 61. RESISTENCIA PARA LAS PROBETAS DE CONTENIDO APROPIADO DE ASFALTO, GRUPOS 1 Y 3

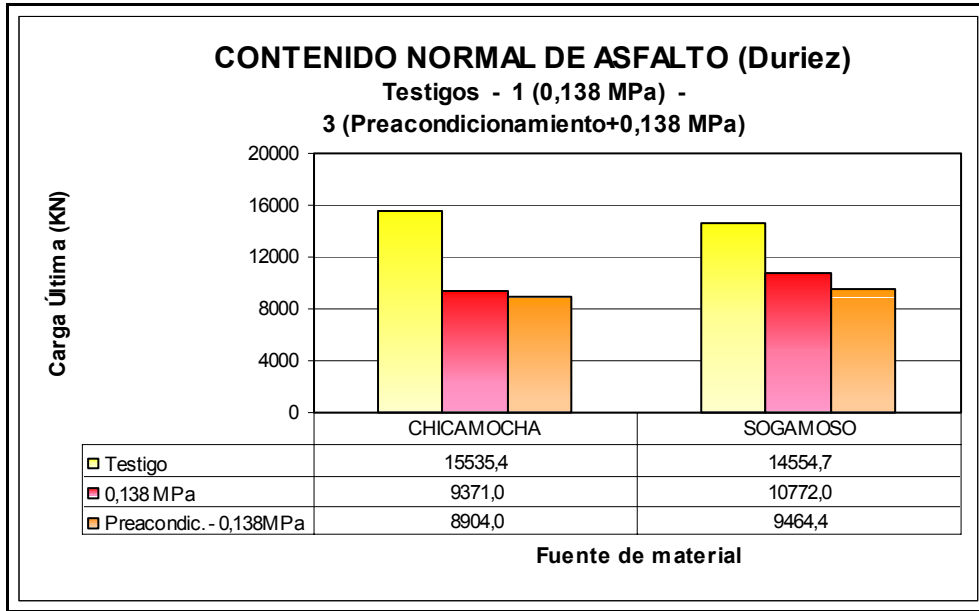
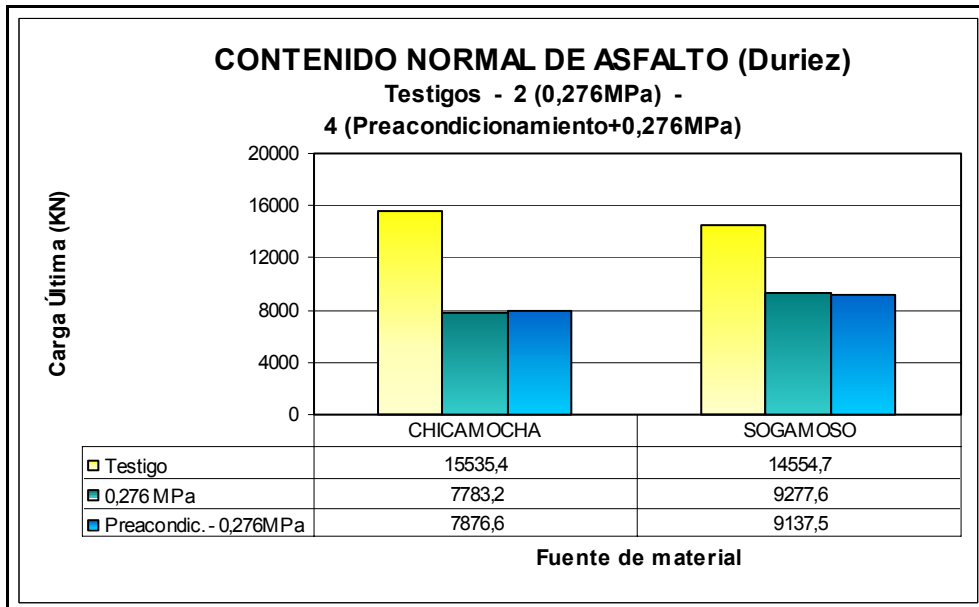


FIGURA 62. RESISTENCIA PARA LAS PROBETAS DE CONTENIDO APROPIADO DE ASFALTO, GRUPOS 2 Y 4



Dentro del grupo de probetas sometidas a 0,138 MPa, las que no fueron sometidas al 28% para el río Sogamoso, y las que si lo tuvieron variaron el 43% y 35% respectivamente (figura 61).

En la figura 62 se observa la disminución de la resistencia respecto de los testigos del 50% para el río Chicamocha y 38% para el río Sogamoso a 0.276MPa de presión. Se esperaba que a mayor tiempo de contacto con el agua, esta entrara en mayor cantidad y desprendiera una mayor proporción de asfalto en los agregados, creando una interfase de agua que disminuyera la cohesión de la mezcla y así el acondicionamiento con presión ocasionara un daño más acelerado en la mezcla asfáltica.

Sin embargo, no es lógico que el preacondicionamiento no muestre un efecto significativo, debido a que la inmersión por 72 horas a 60°C es un factor considerable de deterioro en la interfase agregado – asfalto, que no se evidencia en los resultados.

6.1.3 Índices de Resistencia Conservada

El índice de resistencia conservada IRC, propuesto en el ensayo de inmersión compresión I.N.V.E -738, indica la pérdida producida al comparar las resistencias a la compresión simple obtenidas entre probetas recién moldeadas y curadas al aire y probetas duplicadas sometidas a la acción del agua, en las condiciones que se prescriben en esta norma. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$IRC(\%) = \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \cdot 100$$

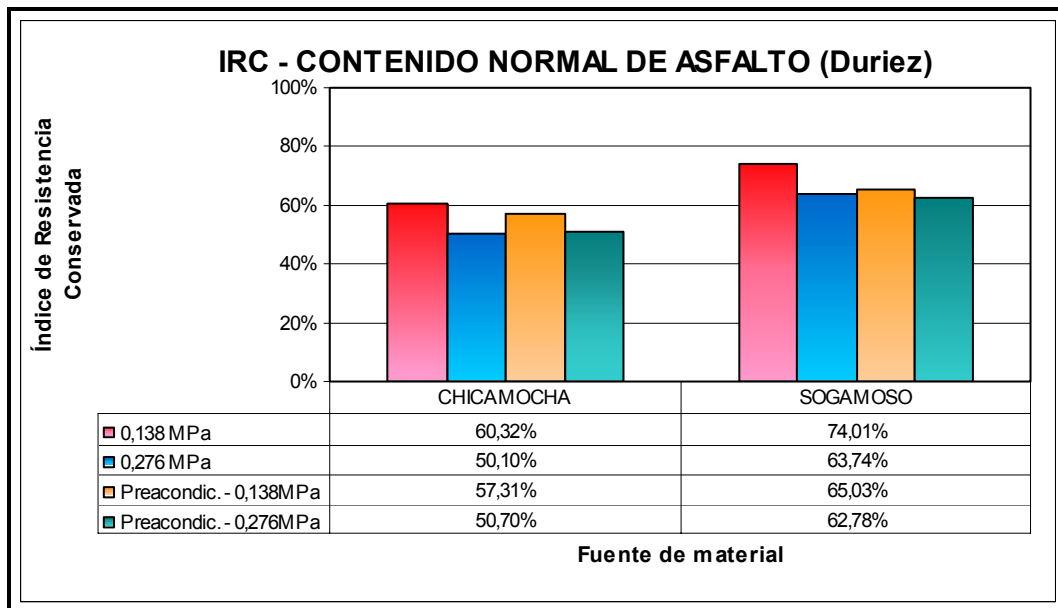
donde,

R_2 = Resistencia a compresión de las probetas no sumergidas

R_1 = Resistencia a compresión de las probetas sumergidas

Se muestra a continuación un IRC, calculado como la relación entre la resistencia de las probetas testigo y la resistencia de las probetas sometidas a diferentes tipos de acondicionamiento, para facilitar al lector la visualización de los resultados.

FIGURA 63. ÍNDICES DE RESISTENCIA CONSERVADA PARA PROBETAS CON APROPIADO CONTENIDO DE ASFALTO



Se observan mejores índices de resistencia conservada en las probetas sometidas a menor presión. Con el incremento en la presión de 0.138 a 0.276 MPa, las probetas presentaron una reducción de resistencia conservada cercana al 8 %.

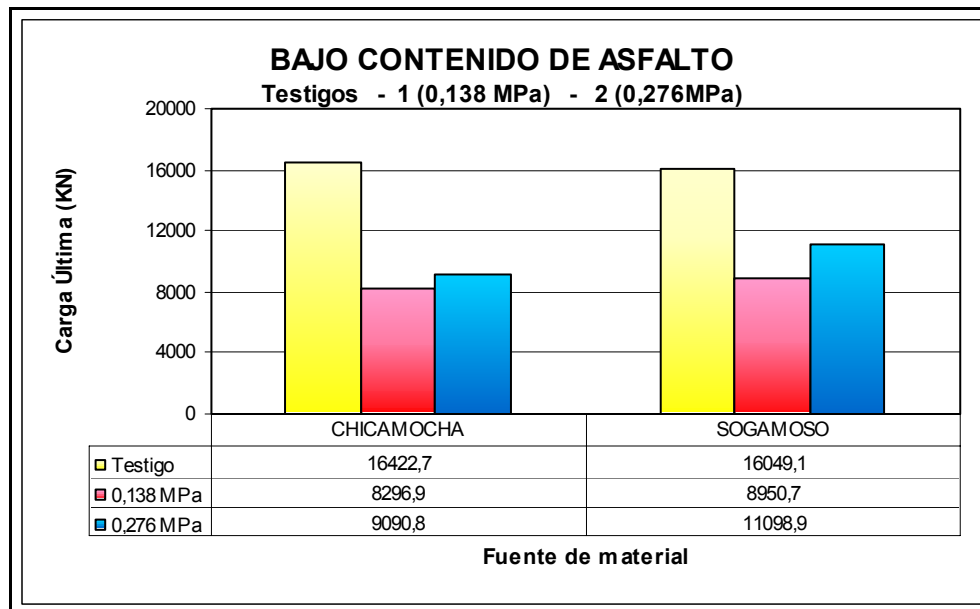
El ensayo planteado no muestra la magnitud del efecto de la presión en la mezcla asfáltica, aunque su influencia es indudable. El envejecimiento del asfalto se genera cuando este entra en contacto con el oxígeno disuelto presente en el agua, lo que conlleva a un aumento

inusual de la cohesión que produce resultados confusos que son más evidentes en las probetas realizadas con bajo contenido de asfalto, por lo que el ensayo debe ser modificado para reducir este fenómeno.

6.2 BAJO CONTENIDO DE ASFALTO

6.2.1 Evaluación del efecto de la Presión de acondicionamiento en probetas con bajo contenido de asfalto

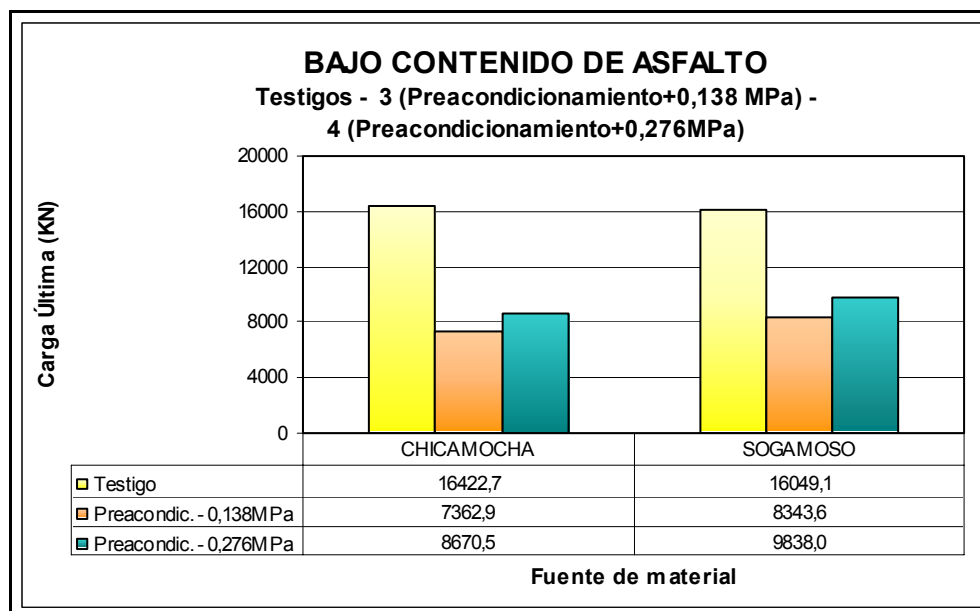
FIGURA 64. RESISTENCIA PARA LAS PROBETAS DE BAJO CONTENIDO DE ASFALTO, GRUPOS 1 Y 2



La resistencia no presenta el comportamiento esperado, ya que esta aumenta con la presión. Para la fuente del río Chicamocha a 0.138MPa de presión, la resistencia disminuye en un 49% y para una presión de 0.276MPa, esta diferencia es del 45%, y para el río Sogamoso estos datos corresponden a 47% y 38% respectivamente. Este aumento es del 9%.

Aunque este comportamiento es atípico es coherente con la investigación previa, realizada por Garcés B. y García I. (18), en la cual se concluyó que este se debe a “que se hizo presente el fenómeno de envejecimiento en la capa de ligante ya que la presión afectó la estructura química del asfalto”, lo cual comprobaron al realizar el ensayo de penetración para el asfalto bajo diferentes acondicionamientos. Este fenómeno se hace presente en las probetas que poseen un bajo contenido de asfalto, ya que la capa de ligante que cubre el agregado es más delgada y por lo tanto más susceptible a las causas del envejecimiento.

FIGURA 65. RESISTENCIA PARA LAS PROBETAS DE BAJO CONTENIDO DE ASFALTO, GRUPOS 3 Y 4

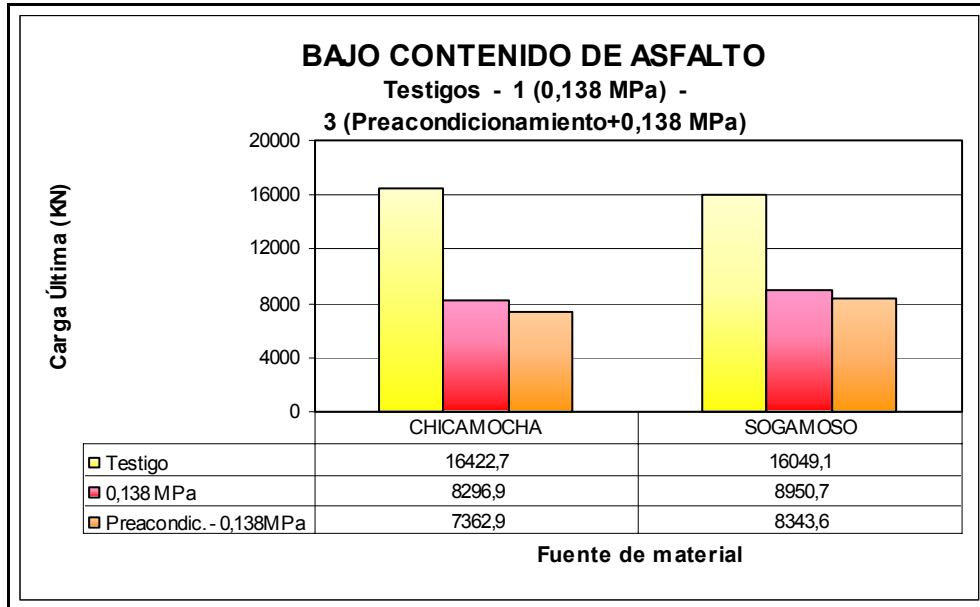


Comparando los testigos con los grupos 3 (0.138MPa) y 4 (0.276MPa), se obtienen los siguientes datos: Para el río Chicamocha la resistencia disminuye en un 55% para el grupo 3 y en un 47% para el grupo 4 y para el río Sogamoso esta disminución es de 48% y 39% respectivamente. La diferencia de presión entre los dos grupos es de 9%.

La explicación del porqué aumenta la resistencia en las probetas sometidas a una presión de 0.276MPa, fué realizada en el punto anterior.

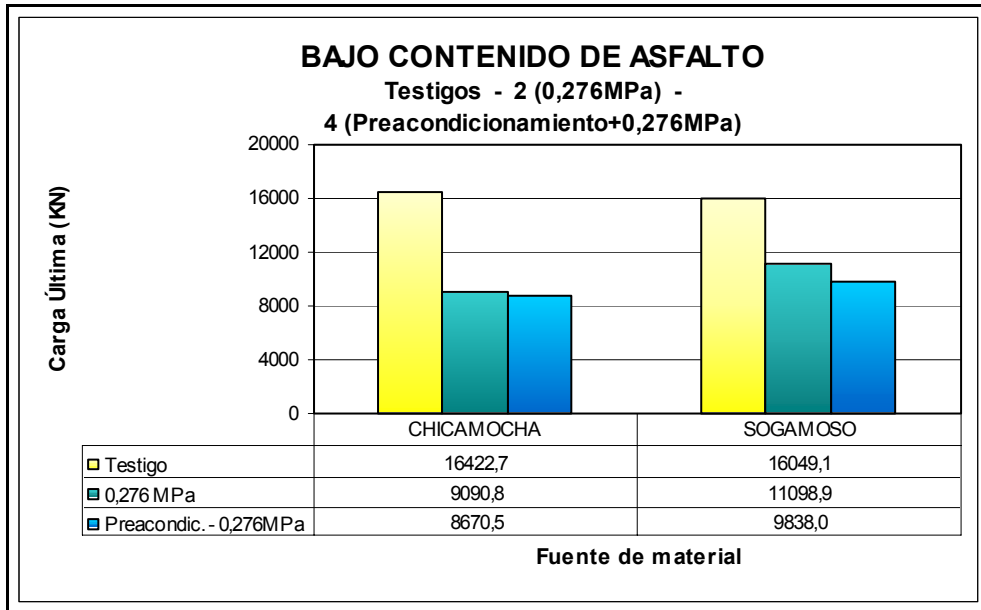
6.2.2. Análisis del efecto de un preacondicionamiento en probetas con bajo contenido de asfalto

FIGURA 66. RESISTENCIA PARA LAS PROBETAS DE BAJO CONTENIDO DE ASFALTO, GRUPOS 1 Y 3



La resistencia disminuye en comparación a los testigos, para el río Chicamocha en un 49% para probetas sin acondicionamiento previo y un 55% para las probetas que si lo tienen, y para el río Sogamoso en un 44% y 48% respectivamente. La disminución en la resistencia entre las probetas que tienen acondicionamiento previo y las que no lo poseen es del 5%, por lo cual se afirma que el contenido de asfalto no es determinante al cambiar las condiciones de inmersión previas, en probetas sometidas a una presión de 0.138Mpa..

FIGURA 67. RESISTENCIA PARA LAS PROBETAS DE BAJO CONTENIDO DE ASFALTO, GRUPOS 2 Y 4



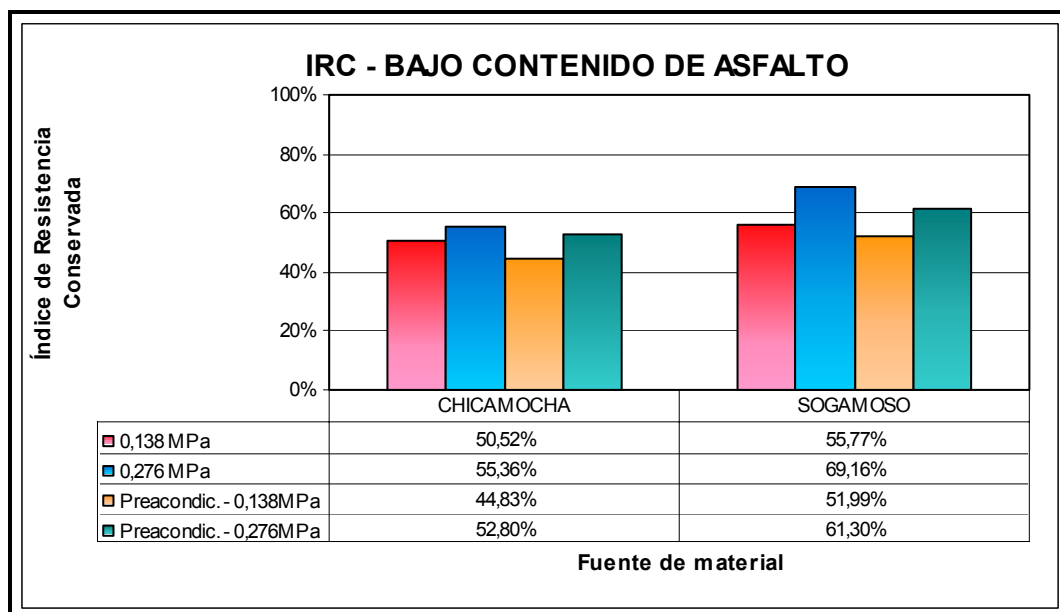
En comparación con los testigos, la resistencia disminuye para el río Chicamocha en un 45% para probetas sin acondicionamiento previo y un 47% para las probetas que si lo tienen, y para el río Sogamoso en un 31% y 39% respectivamente. La disminución en la resistencia corresponde al 5%.

A pesar de que el envejecimiento del ligante se haga presente, en estas probetas sometidas a la misma presión (0.276MPa), la inmersión previa en agua disminuye la resistencia, en coherencia con el grupo anterior

6.2.3 Índices de Resistencia Conservada

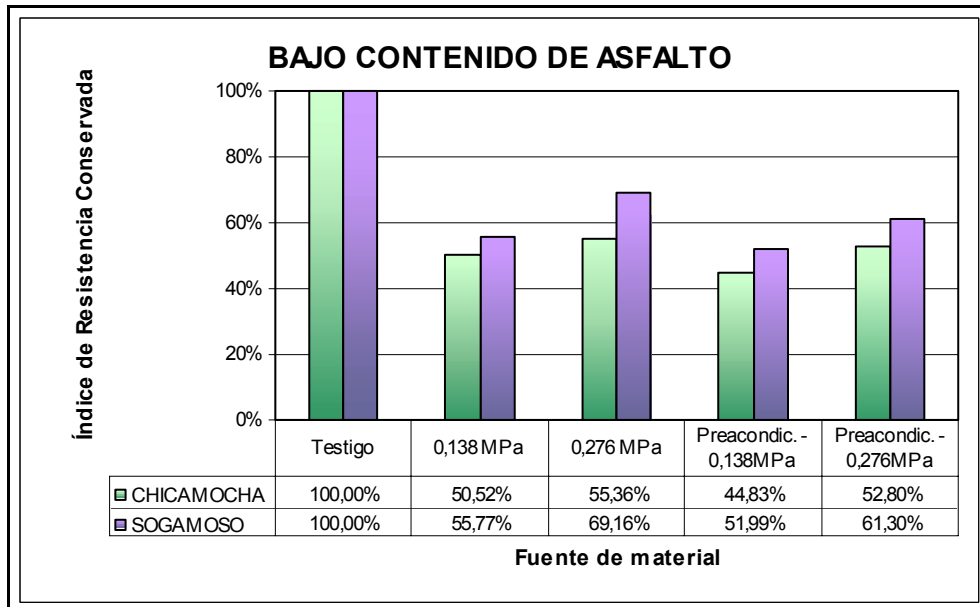
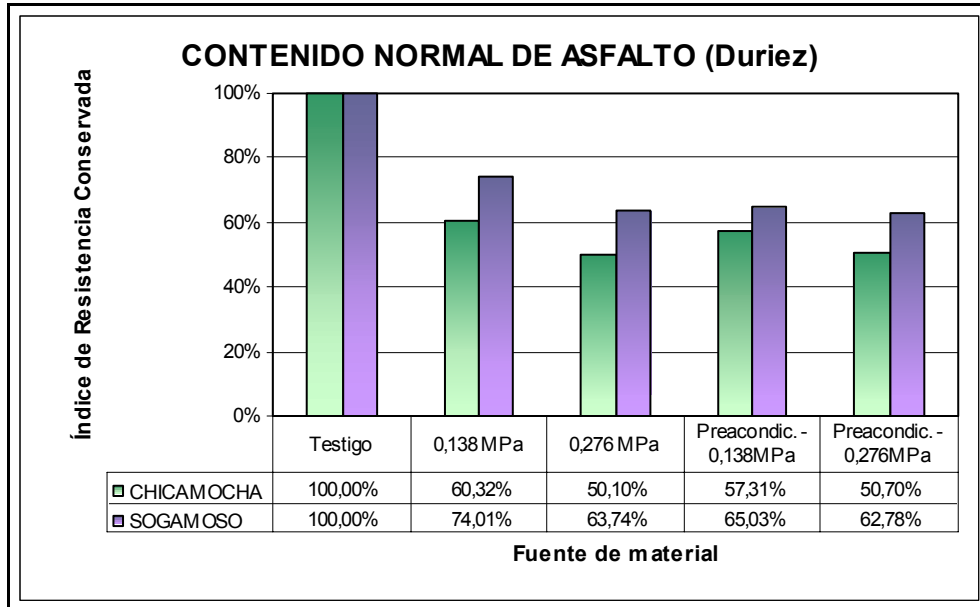
Se observa el comportamiento atípico explicado en 6.2.1., donde las probetas sometidas a 0.276MPa de presión muestran mejores índices de resistencia conservada, debido a la rigidización del ligante. En cuanto a las probetas sometidas a 0.138MPa de presión, las realizadas con agregados provenientes de río Chicamocha tienen un IRC de 47% y las del río Sogamoso un 54%.

FIGURA 68. ÍNDICES DE RESISTENCIA CONSERVADA PARA PROBETAS CON BAJO CONTENIDO DE ASFALTO



6.3 DESEMPEÑO DE LAS FUENTES DE AGREGADO

FIGURA 69. DESEMPEÑO DE LAS PROBETAS DE ACUERDO A LA FUENTE DE LOS AGREGADOS



Las probetas realizadas con agregados del río Chicamocha tuvieron un mejor desempeño cuando no se les realizó ningún acondicionamiento (testigos), presentando valores ligeramente mayores de resistencia que las elaboradas con agregados del río Sogamoso, sin embargo, también fueron más susceptibles a los diferentes tipos de acondicionamiento, como se muestra en la figura anterior:

Esta variación se explica por la diferencia en la composición mineralógica de los agregados de cada una de las fuentes (Tabla 3), lo que muestra a los agregados del río Chicamocha como más susceptibles a la acción del agua, pues poseen mayores porcentajes de micas y feldspatos, igualmente, de materiales que como el cuarzo, poseen altos niveles de óxido de sílice, que favorecen el desvestimiento, debido a la pérdida de adhesión entre la superficie del agregado y el asfalto, condición que también fue observada en el laboratorio.

6.4 RELACIÓN CON ESTUDIOS ANTERIORES

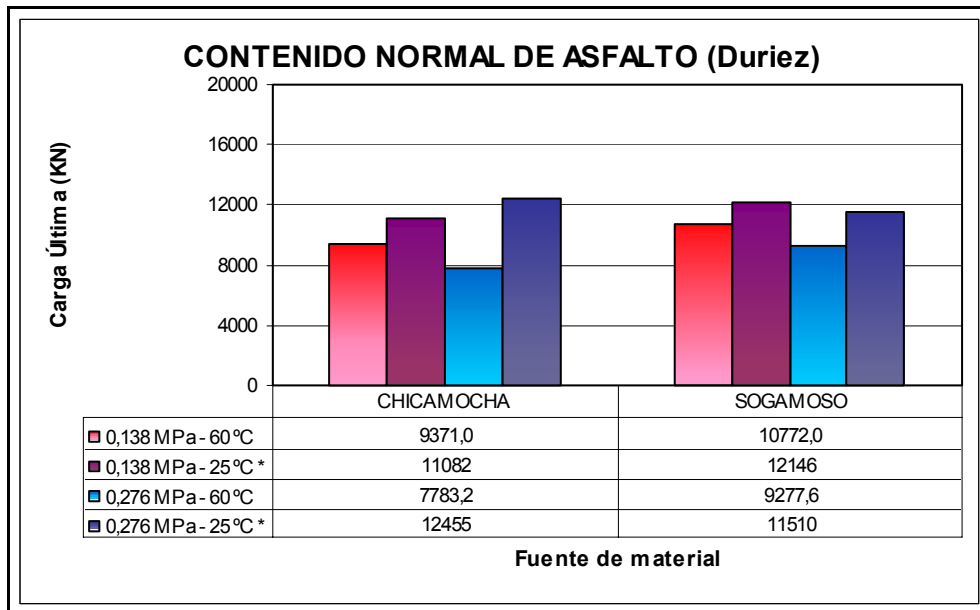
El proyecto desarrollado por Garcés B. y García I. (18), analizó la resistencia a compresión simple de probetas elaboradas con los mismos materiales, el mismo diseño de mezcla e iguales condiciones de presión, pero con variaciones significativas en el tiempo y la temperatura de acondicionamiento, se presenta este análisis teniendo en cuenta que los procesos fueron desarrollados en el mismo laboratorio, pero por diferentes operadores.

TABLA 10. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS ESTUDIOS DE GARCÉS B. Y GARCÍA I. Y EL ACTUAL

		Estudio Garcés B. y García I.		Estudio Actual	
Características Generales	Fecha culminación	2002		2004	
	Fuentes de agregado	Río Chicamocha	Río Sogamoso	Río Chicamocha	Río Sogamoso
	Granulometría	PA - 12		PA - 12	
	Asfalto	Refinería de Barrancabermeja		Refinería de Barrancabermeja	
	Porcentaje de asfalto	5,65 y 5,15 %	5,16 y 5,66 %	5,65 y 5,15 %	5,16 y 5,66 %
Acondicionamiento	Presión	0,138 y 0.276 MPa		0,138 y 0.276 MPa	
	Tiempo	48 horas		72 horas	
	Temperatura	25 °C		60 °C	
	Equipo	Autoclave Cenco Wenzel		Cámara de presión diseñada para el estudio	

El siguiente gráfico corresponde a los valores obtenidos con alto porcentaje de asfalto, debido a que en este no se presentó rigidización del ligante. Se observa claramente que el cambio en las variables tiempo y temperatura del acondicionamiento ocasionan una disminución en la resistencia, aplicando 0.138MPa de presión ésta es del 15 % en las probetas elaboradas con agregados del río Chicamocha y 10% para las del río Sogamoso, y para una presión de 0.276MPa, el descenso se ubicó en el 38 y 20% respectivamente.

FIGURA 70. COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO DE GARCÉS B. Y GARCÍA I.



7. OBSERVACIONES

- ❑ Los resultados obtenidos en esta investigación, se aplican únicamente a los agregados provenientes de las canteras de Esgamo Ltda. y Paviandi Ltda. y originados de los ríos Sogamoso y Chicamocha respectivamente, y el asfalto de la refinería de Barrancabermeja, regulados dentro de las normativas dadas por el INVIAS.
- ❑ El ensayo de laboratorio planteado en este proyecto, establece un avance en el análisis del fenómeno de presión de poros, pero no se constituye como una especificación o regulación para el estudio de las mezclas asfálticas. Las conclusiones obtenidas corresponden únicamente a condiciones de laboratorio.
- ❑ Se observó el desprendimiento inducido a través de la presión de poros y el efecto sobre la resistencia final de las probetas, su cuantificación está por fuera del alcance de este estudio.
- ❑ La compactación se realizó teniendo en cuenta el procedimiento del ensayo de inmersión – compresión (I.N.V.E. -738), variando la carga final aplicada de 17 a 13 toneladas para evitar la fractura en el agregado grueso, debido a que la granulometría usada en el diseño de la mezcla es más susceptible a este problema.
- ❑ La granulometría abierta usada garantizó un alto porcentaje de vacíos (10-21%), que facilitó la penetración del agua a la probeta, y así se pudo tener una mayor observación del fenómeno de desvestimiento.

8. RECOMENDACIONES



- ❑ Efectuar la compactación por un método de aplicación de carga dinámica como el compactador Giratorio Superpave, ya que la aplicación de la carga estática en la Máquina Universal, no permite una reacomodación adecuada de los agregados gruesos durante el proceso, ocasionando en algunos casos la fractura de los mismos.
- ❑ Realizar un grupo adicional de probetas con inmersión en agua durante 72 horas a 60°C (acondicionamiento inicial), y sin acondicionamiento a presión (acondicionamiento final), que permita establecer un mejor análisis del efecto del agua y la temperatura en el desprendimiento y la resistencia final de las probetas.
- ❑ Establecer un mecanismo que permita aplicar presión a través de un flujo de agua que genere bombeo entre poros, para así evaluar una condición más crítica del desvestimiento.
- ❑ Evaluar la mezcla por medio de evaluación de las fuerzas intermoleculares, para analizar el fenómeno de adherencia en la interfase agregado – asfalto.
- ❑ Para aislar el fenómeno de cohesión se debería aplicar presión al agua, sin permitir un aumento en la concentración de burbujas de aire en ella.

9. CONCLUSIONES

- ❑ Como resultado del proyecto, se elaboraron cámaras que permiten someter probetas de mezclas asfálticas a procesos de presión y temperatura en laboratorio.
- ❑ Para observar el desvestimiento en las probetas, estas fueron sometidas a inmersión a 60°C y presión de 0.276 Mpa (40 p.s.i.), lo que permitió estimar el tiempo óptimo de acción del agua (segundo acondicionamiento) en 72 horas.
- ❑ La cámara de presión diseñada para el ensayo mostró un comportamiento acorde a las necesidades del mismo, ya que el valor de la presión entre el inicio y el final del acondicionamiento no varió en más del 1%.
- ❑ En el estudio de acción del agua y específicamente de la presión de poros, el acondicionamiento de las probetas en las cámaras, genera envejecimiento y aumenta la cohesión del ligante, distorsionando las medidas de deterioro del material, ocasionado por desprendimiento de ligante en la interfase asfalto-agregado. Esta acción de incremento en la cohesión es tan fuerte que aún las probetas sometidas a envejecimiento inicial por evaporación de componentes (72 horas a 60 grados) parecieran mejorar sus propiedades cuando se someten a fuertes presiones de poro en la cámara.
- ❑ La variación en el contenido de asfalto posee una gran incidencia en el desempeño de la probeta, aparentemente se facilita el envejecimiento del ligante debido a que la capa de asfalto que cubre el agregado es más delgada y por lo tanto tiende a rigidizarse aumentando la resistencia.
- ❑ El aumento de la presión aplicada ocasiona un aumento en la presión de poros que ocasiona en la mezcla el desvestimiento del agregado y la rigidización del asfalto.

- ❑ Al aumentar la presión aplicada se genera una disminución en la resistencia de las probetas siempre y cuando la rigidización del ligante no sea determinante.
- ❑ Aunque la inmersión previa de las probetas por si sola, contribuye al descenso en el valor de la resistencia, es más agresivo el efecto del aumento de la presión aplicada.
- ❑ Los acondicionamientos más críticos son los que corresponden a los grupos que se le aplicó una presión de 0.276MPa (2 y 4), en los que se observan las menores resistencias.
- ❑ No obstante se aprecian ligeras diferencias en el desprendimiento del asfalto en las probetas, es imposible hacer afirmaciones en este aspecto, debido a que no se realizó un método de análisis cuantitativo.
- ❑ Al realizar los ensayos con una temperatura de 60°C, se obtienen menores valores de resistencia en comparación a los estudios previos realizados con los mismos materiales a 25°C.
- ❑ Las cámaras de presión elaboradas en este proyecto permiten someter probetas de mezclas asfálticas a procesos de envejecimiento en laboratorio, variando la temperatura y la presión de aire en la cámara.

ANEXO A. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS							
A1. ÍNDICES DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO									
Fuente:	RÍO SOGAMOSO	Norma:	I.N.V. E -230						
Planta:	ESGAMO	Laboratorista:	JM - GG						
		Fecha:	Jul-03						
		Hoja:	1 de 2						
$\text{ÍNDICE DE ALARGAMIENTO} = \frac{\sum \%RC \times \%RGO}{\sum \%RGO}$									
TAMAÑO DE TAMICES		PM	PMRC	% RC	% RGO	%RC x %RGO			
PASA	RETIENE	(g)	(g)						
3/4"	1/2"	381,62	24,60	6,45	5,60	0,36			
1/2"	3/8"	174,12	28,43	16,33	17,13	2,80			
3/8"	No.4	73,47	30,62	41,68	23,83	9,93			
TOTALES		629,21	83,65		46,56	13,09			
$\text{ÍNDICE DE APLANAMIENTO} = \frac{\sum \%PC \times \%PGO}{\sum \%PGO}$									
TAMAÑO DE TAMICES		PM	PMPC	% PC	% PGO	%PC x % PGO			
PASA	RETIENE	(g)	(g)						
3/4"	1/2"	381,62	158,40	41,51	5,60	2,32			
1/2"	3/8"	174,12	25,25	14,50	17,13	2,48			
3/8"	No.4	73,47	16,18	22,02	23,83	5,25			
TOTALES		629,21	199,83		46,56	10,06			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">RESULTADOS.</th> <th style="width: 50%;">ESPECIFICACIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Índice de Alargamiento (%)</td> <td>28,11 < 35% ok</td> </tr> <tr> <td>Índice de Aplanamiento(%)</td> <td>21,60 < 35% ok</td> </tr> </tbody> </table>				RESULTADOS.	ESPECIFICACIÓN	Índice de Alargamiento (%)	28,11 < 35% ok	Índice de Aplanamiento(%)	21,60 < 35% ok
RESULTADOS.	ESPECIFICACIÓN								
Índice de Alargamiento (%)	28,11 < 35% ok								
Índice de Aplanamiento(%)	21,60 < 35% ok								
PM: Peso material PMRC: Peso material retenido calibrador % RC: Porcentaje retenido calibrador % RGO: Porcentaje retenido gradación original PMPC: Peso material pasa calibrador % PC: Porcentaje pasa calibrador % PGO: Porcentaje pasa gradación original									



A1. ÍNDICES DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO

Fuente:	RÍO CHICAMOCHA	Norma:	I.N.V. E -230	Fecha:	Jul-03
Planta:	PAVIANDI	Laboratorista:	JM - GG	Hoja:	2 de 2

$$\text{INDICE DE ALARGAMIENTO} = \frac{\sum \%RC \times \%RGO}{\sum \%RGO}$$

TAMAÑO DE TAMICES		PM (g)	PMRC (g)	% RC	% RGO	%RC x %RGO
PASA	RETIENE					
3/4"	1/2"	497,10	97,20	19,55	13,60	2,66
1/2"	3/8"	242,40	75,60	31,19	10,02	3,13
3/8"	No.4	88,00	51,70	58,75	9,87	5,80
TOTALES		827,50	224,50		33,49	11,58

$$\text{INDICE DE APLANAMIENTO} = \frac{\sum \%PC \times \%PGO}{\sum \%PGO}$$

TAMAÑO DE TAMICES		PM (g)	PMPC (g)	% PC	% PGO	%PC x % PGO
PASA	RETIENE					
3/4"	1/2"	497,10	144,90	29,15	13,60	3,96
1/2"	3/8"	242,40	35,50	14,65	10,02	1,47
3/8"	No.4	88,00	23,70	26,93	9,87	2,66
TOTALES		827,50	204,10		33,49	8,09

RESULTADOS.	ESPECIFICACIÓN
Indice de Alargamiento (%)	34,59 < 35% ok
Indice de Aplanamiento(%)	24,16 < 35% ok

- PM: Peso material
 PMRC: Peso material retenido calibrador
 % RC: Porcentaje retenido calibrador
 % RGO: Porcentaje retenido gradación original
 PMPC: Peso material pasa calibrador
 % PC: Porcentaje pasa calibrador
 % PGO: Porcentaje pasa gradación original



A2. DESGASTE EN LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES

Fuente: SOGAMOSO / CHICAMOCHA	Norma: I.N.V. E - 218	Fecha: Jul-03
Planta: ESGAMO / PAVIANDI	Laboratorista: JM - GG	Hoja: 1 de 1

TAMANO		PESO Y GRADACION DE LA MUESTRA						
PESO	RETENIDO	A	B	C	D	E	F	G
3"	2 1/2"					2500		
2 1/2"	2"					2500		
2"	1 1/2"					5000	5000	
1 1/2"	1"	1250					5000	
1"	3/4"	1250						5000
3/4"	1/2"	1250	2500					5000
1/2"	3/8"	1250	2500					
3/8"	1/4"			2500				
1/4"	No. 4			2500				
No. 4	No. 8				5000			
No. de esferas		12	11	8	6	12	12	12

$$\% \text{Desgaste} = \frac{(Pa - Pb)}{Pa} \times 100$$

DATOS DE LA PRUEBA	Sogamoso	Chicamoch
Gradación usada	B	B
No. de esferas	11	11
No. de revoluciones	500	500
Pa = peso muestra seca antes del ensayo (g)	5000	5000
Pb = peso muestra seca después del ensayo y de	4056	3786
Pérdida de material (Pa - Pb)	944	1214
% Desgaste = 100 * (Pa - Pb)/Pa	18,88	24,28
Especificación < 30 % (Art. 400 - Norma INVIAS)	ok	ok

RESULTADOS	
Fuente	% Desgaste
Río Sogamoso	18,88 %
Río Chicamocha	24,28 %



A3. SANIDAD DE LOS AGREGADOS FRENTE A LA ACCIÓN DE LAS SOLUCIONES DE SULFATO DE SODIO

Fuente:	SOGAMOSO / CHICAMOCHA	Norma:	I.N.V. E - 220	Fecha:	Jul-03
Planta:	ESGAMO / PAVIANDI	Laboratorista:	JM - GG	Hoja:	1 de 1

MATERIAL			PESO (g)
DE	A:		
No. 4	3/8"		300 ± 5
3/8"	3/4"		1000 ± 10
3/8"	1/2"	33 %	330 ± 5
1/2"	3/4"	67 %	670 ± 10
3/4"	1 1/2"		1500 ± 50
3/4"	1"	33 %	500 ± 30
1"	1 1/2"	67 %	1000 ± 50
1 1/2"	2 1/2"		5000 ± 300

$$\% \text{Solidez} = \frac{(W_i - W_f)}{W_f} \times 100$$

DATOS DE LA PRUEBA	RIO SOGAMOSO		RIO CHICAMOCHA		
Tamices utilizados	3/8"	No.4	3/8"	1/2"	3/4"
Peso inicial (Wi)	1010,00	305,00	335,00	680,00	1500,00
Peso final (Wf)	1005,40	295,20	328,05	677,70	1488,20
Diferencia (Wi - Wf)	4,60	9,80	6,95	2,30	11,80
% Solidez en sulfato de sodio	0,46	3,32	2,12	0,34	0,79
% Promedio solidez en sulfato de sodio	1,89		1,08		
Solidez < 12 % (Art. 400 - Norma INVIAS)	ok		ok		

RESULTADOS	
Fuente	% Solidez
Río Sogamoso	1,89 %
Río Chicamocha	1,08 %

**A4. PESO ESPECÍFICO DE LOS AGREGADOS FINOS**

Fuente: SOGAMOSO / CHICAMOCHA	Norma: I.N.V. E - 222	Fecha: Jul-03
Planta: ESGAMO / PAVIANDI	Laboratorista: JM - GG	Hoja: 1 de 1

$$\text{Peso_específico_aparente} = \frac{A}{B + S - C}$$

$$\text{Peso_específico_SSS} = \frac{S}{B + S - C}$$

$$\text{Peso_específico_real} = \frac{A}{B + A - C}$$

DATOS DE LA PRUEBA		Sogamoso	Chicamoch
A: Peso de la muestra en el aire (g)		331,52	303,19
B: Peso picnómetro + agua (g)		665,8	664,8
C: Peso picnómetro + agua + muestra (g)		876,7	856,6
S: Peso muestra SSS al aire (g)		345,4	315,2
Peso específico aparente		2,464833	2,456969
Peso específico SSS		2,56803	2,554295
Peso específico nominal o real		2,748466	2,721878

SSS: Saturado con perficie seca

RESULTADOS	
Fuente	Peso específico
Río Sogamoso	2,75
Río Chicamocha	2,72

**A5. PESO ESPECÍFICO DE LOS AGREGADOS GRUESOS**

Fuente: SOGAMOSO / CHICAMOCHA	Norma: I.N.V. E - 223	Fecha: Jul-03
Planta: ESGAMO / PAVIANDI	Laboratorista: JM - GG	Hoja: 1 de 1

$$\text{Peso}_{\text{aparente}} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Peso}_{\text{SSS}} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{Peso}_{\text{nominal}} = \frac{A}{A - C}$$


$$\% \text{ Absorción} = \frac{B - A}{A} \times 100$$

DATOS DE LA PRUEBA		Sogamoso	Chicamocho
A: Peso material seco (g)		2000	2980
B: Peso material saturado (g)		2016	2998
C: Peso material sumergido (g)		1213	1814
Peso aparente		2,49066	2,516892
Peso SSS		2,510585	2,532095
Peso nominal		2,541296	2,555746
% Absorción		0,713521	0,715658

SSS: Saturado con perficie seca

RESULTADOS		
Fuente	Peso	% Absorción
Río Sogamoso	2,54	0,71 %
Río Chicamocho	2,56	0,72 %

ANEXO C. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS	ESCUELA DE INGENIERIA <i>Civil</i>																																																						
<h3>C1. Peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas</h3>																																																									
Fuente: SOGAMOSO / CHICAMOCHA	Norma: I.N.V. E - 735	Fecha: Sep-03																																																							
Planta: ESGAMO / PAVIANDI	Laboratorista: JM - GG	Hoja: 1 de 1																																																							
<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 0 auto; width: 60%;"> $G_{mm} = \frac{A}{(A + D - E)}$ <p style="margin: 5px 0;">G_{mm}: Peso específico máximo de una mezcla asfáltica</p> <p style="margin: 5px 0;">A: Peso de la muestra seca en el aire (g)</p> <p style="margin: 5px 0;">D: Peso del picnómetro con agua a 25 °C (g)</p> <p style="margin: 5px 0;">E: Peso del picnómetro con agua y muestra a 25 °C (g)</p> </div> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">DATOS</th> <th colspan="2">CHICAMOCHA</th> <th colspan="2">SOGAMOSO</th> </tr> <tr> <th>Normal</th> <th>Bajo</th> <th>Normal</th> <th>Bajo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>W picnómetro</td> <td>915,4</td> <td>915,4</td> <td>915,4</td> <td>915,4</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>1500</td> <td>1500</td> <td>1000</td> <td>1000</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>1955,9</td> <td>1955,9</td> <td>1964,3</td> <td>1964,3</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>2839,5</td> <td>2853,7</td> <td>2549,24</td> <td>2561,07</td> </tr> <tr> <td>G_{mm}</td> <td>2,433</td> <td>2,491</td> <td>2,409</td> <td>2,480</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="5">RESULTADOS</th> </tr> <tr> <th>Fuente</th> <th colspan="2">Chicamocha</th> <th colspan="2">Sogamoso</th> </tr> <tr> <td>% asfalto</td> <td>Normal</td> <td>Bajo</td> <td>Normal</td> <td>Bajo</td> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>G_{mm}</td> <td>2,43</td> <td>2,49</td> <td>2,41</td> <td>2,48</td> </tr> </tbody> </table>				DATOS	CHICAMOCHA		SOGAMOSO		Normal	Bajo	Normal	Bajo	W picnómetro	915,4	915,4	915,4	915,4	A	1500	1500	1000	1000	D	1955,9	1955,9	1964,3	1964,3	E	2839,5	2853,7	2549,24	2561,07	G _{mm}	2,433	2,491	2,409	2,480	RESULTADOS					Fuente	Chicamocha		Sogamoso		% asfalto	Normal	Bajo	Normal	Bajo	G _{mm}	2,43	2,49	2,41	2,48
DATOS	CHICAMOCHA		SOGAMOSO																																																						
	Normal	Bajo	Normal	Bajo																																																					
W picnómetro	915,4	915,4	915,4	915,4																																																					
A	1500	1500	1000	1000																																																					
D	1955,9	1955,9	1964,3	1964,3																																																					
E	2839,5	2853,7	2549,24	2561,07																																																					
G _{mm}	2,433	2,491	2,409	2,480																																																					
RESULTADOS																																																									
Fuente	Chicamocha		Sogamoso																																																						
% asfalto	Normal	Bajo	Normal	Bajo																																																					
G _{mm}	2,43	2,49	2,41	2,48																																																					

C2. Peso específico aparente, unitario y porcentaje de vacíos.

Fuente:	RÍO CHICAMOCHA	Normas:	I.N.V. E - 733, I.N.V. E - 736	Fecha:	Sep-03
Planta:	PAVIANDI	Laboratoristas:	JM - GG	Hoja:	1 de 2

$$G_b = \frac{W_a}{W_s - W_w} \quad W_u = G_b \cdot 0.997 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \quad \% \text{vacíos} = 100 \cdot \left(1 - \frac{G_b}{G_{mm}} \right)$$

G_b : Peso específico máximo de una mezcla asfáltica

W_a : Peso de la probeta en el aire (g)

W_s : Peso de la probeta + polietileno (g)

W_w : Peso de la probeta en el agua (g)

0,997 g/cm³: Peso específico del agua a 25 °C

W_u : Peso específico unitario (g/cm³)

% vacíos: Contenido de vacíos de la probeta

No.	Probeta	W_a	W_s	W_w	G_b	W_u	G_{mm}	% Vacíos
1	CTN1	1917,7	1923,5	931,7	1,934	1,928	2,43	20,54%
2	CTN2	1905,5	1911,1	940,2	1,963	1,957	2,43	19,35%
3	CTB1	1904,8	1910,3	932,4	1,948	1,942	2,49	21,80%
4	CTB2	1917,5	1922,9	920,7	1,913	1,908	2,49	23,19%
5	C1N1	1895,3	1910,5	928,9	1,931	1,925	2,43	20,66%
6	C1N2	1879,5	1884,3	944,3	1,999	1,993	2,43	17,84%
7	C1B1	1934,6	1939,8	944,4	1,944	1,938	2,49	21,97%
8	C1B2	1891,8	1896,9	926,4	1,949	1,943	2,49	21,74%
9	C2N1	1825,7	1834,8	935,5	2,030	2,024	2,43	16,58%
10	C2N2	1884,3	1887,6	940,5	1,990	1,984	2,43	18,24%
11	C2B1	1884,9	1890,7	930,3	1,963	1,957	2,49	21,21%
12	C2B2	1921,1	1927,3	933,2	1,933	1,927	2,49	22,42%
13	C3N1	1902,2	1908,1	923,6	1,932	1,926	2,43	20,60%
14	C3N2	1874,1	1885,3	927,8	1,957	1,951	2,43	19,57%
15	C3B1	1910,8	1916,5	950,7	1,978	1,973	2,49	20,57%
16	C3B2	1908,8	1913,9	929,2	1,938	1,933	2,49	22,18%
17	C4N1	1886	1893,1	926,3	1,951	1,945	2,43	19,84%
18	C4N2	1916,6	1921,7	948,2	1,969	1,963	2,43	19,10%
19	C4B1	1877,3	1882,5	925,6	1,962	1,956	2,49	21,24%
20	C4B2	1899,2	1904,7	931,1	1,951	1,945	2,49	21,69%



C2. Peso específico aparente, unitario y porcentaje de vacíos.

Fuente:	RÍO SOGAMOSO	Normas:	I.N.V. E - 733, I.N.V. E - 736	Fecha:	Sep-03
Planta:	ESGAMO	Laboratoristas:	JM - GG	Hoja:	2 de 2

$$G_b = \frac{W_a}{W_s - W_w} \quad W_u = G_b \cdot 0.997 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \quad \% \text{vacíos} = 100 \cdot \left(1 - \frac{G_b}{G_{mm}} \right)$$

G_b: Peso específico máximo de una mezcla asfáltica

W_a: Peso de la probeta en el aire (g)

W_s: Peso de la probeta + polietileno (g)

W_w: Peso de la probeta en el agua (g)



0,997 g/cm³: Peso específico del agua a 25 °C

W_u: Peso específico unitario (g/cm³)

% vacíos: Contenido de vacíos de la probeta

No.	Probeta	W _a	W _s	W _w	G _b	W _u	G _{mm}	% Vacíos
1	STN1	1893,2	1889,1	902,1	1,918	1,912	2,41	20,39%
2	STN2	1926,4	1932,4	935,7	1,933	1,927	2,41	19,78%
3	STB1	1879,3	1885,1	925,3	1,958	1,952	2,48	21,05%
4	STB2	1900,1	1906,3	897,5	1,884	1,878	2,48	24,05%
5	S1N1	1888,3	1893,3	902,7	1,906	1,900	2,41	20,88%
6	S1N2	1906,9	1911,5	879,6	1,848	1,842	2,41	23,30%
7	S1B1	1890,1	1896,4	937,4	1,971	1,965	2,48	20,53%
8	S1B2	1898,8	1904,2	924,1	1,937	1,932	2,48	21,88%
9	S2N1	1866,8	1871,9	929,4	1,981	1,975	2,41	17,79%
10	S2N2	1869,5	1874,7	910,5	1,939	1,933	2,41	19,52%
11	S2B1	1918,8	1925,2	891,8	1,857	1,851	2,48	25,13%
12	S2B2	1940,4	1946,2	907,6	1,868	1,863	2,48	24,67%
13	S3N1	1863,1	1869,1	903,7	1,930	1,924	2,41	19,90%
14	S3N2	1866,6	1872,3	895,3	1,911	1,905	2,41	20,70%
15	S3B1	1907,9	1913,7	919,4	1,919	1,913	2,48	22,63%
16	S3B2	1912,5	1918,7	896,6	1,871	1,866	2,48	24,55%
17	S4N1	1865,3	1871,9	939,2	2,000	1,994	2,41	16,99%
18	S4N2	1890,6	1896,3	901,2	1,900	1,894	2,41	21,14%
19	S4B1	1934,2	1940,4	890,5	1,842	1,837	2,48	25,71%
20	S4B2	1869,5	1875,1	932,2	1,983	1,977	2,48	20,05%

ANEXO D. CALIBRACIÓN DE LA MÁQUINA UNIVERSAL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS				
Calibración de la máquina universal utilizando el anillo de carga marshall						
Realizó:	JM - GG	Fecha:	Ene-04			
		Hoja:	1 de 2			
Carga Teórica Máq. Universal	Lectura deformímetro		Lectura promedio	Carga Real Anillo Marshall	Carga Real Anillo Marshall	Error
	1	2				
(Kg)	(0,001 pulg)	(0,001 pulg)	(0,001 pulg)	(lb)	(Kg)	(%)
100	17	24	20,5	205	93,2	7,32
200	42	47	44,5	445	202,3	1,12
300	64	68	66	660	300,0	0,00
400	83	91	87	870	395,5	1,15
500	103	109	106	1060	481,8	3,77
600	122	127	124,5	1245	565,9	6,02
700	145	150	147,5	1475	670,5	4,41
800	162	168	165	1650	750,0	6,67
900	181	187	184	1840	836,4	7,61
1000	200	204	202	2020	918,2	8,91
1100	218	226	222	2220	1009,1	9,01
1200	240	245	242,5	2425	1102,3	8,87
1300	261	270	265,5	2655	1206,8	7,72
1400	282	291	286,5	2865	1302,3	7,50
1500	302	313	307,5	3075	1397,7	7,32
1600	325	334	329,5	3295	1497,7	6,83
1700	345	356	350,5	3505	1593,2	6,70
1800	362	378	370	3700	1681,8	7,03
1900	386	396	391	3910	1777,3	6,91
2000	407	416	411,5	4115	1870,5	6,93
2100	427	435	431	4310	1959,1	7,19
2200	446	460	453	4530	2059,1	6,84
2300	464	479	471,5	4715	2143,2	7,32
2400	484	498	491	4910	2231,8	7,54
2500	508	520	514	5140	2336,4	7,00
2600	528	542	535	5350	2431,8	6,92
2700	554	566	560	5600	2545,5	6,07
2800	573	584	578,5	5785	2629,5	6,48
2900	592	604	598	5980	2718,2	6,69
3000	614	626	620	6200	2818,2	6,45

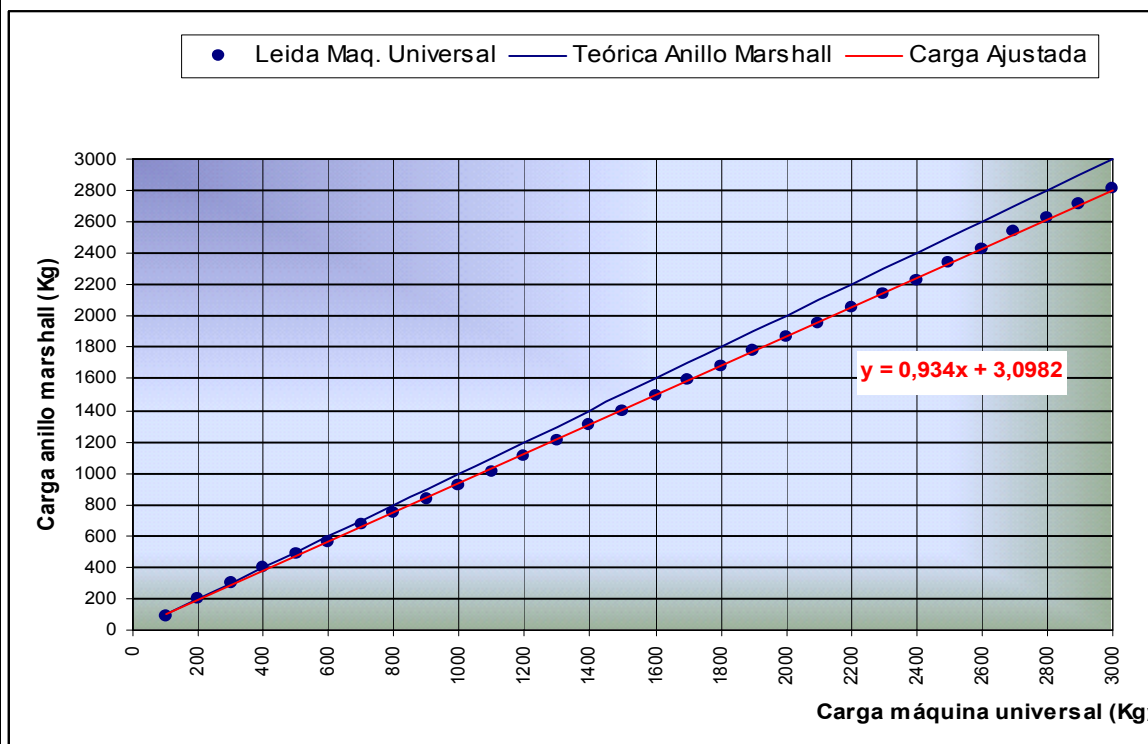


Calibración de la máquina universal utilizando el anillo de carga marshall



Realizó: JM - GG

Fecha: Ene-04

Hoja: 2 de 2



ANEXO E. RESISTENCIA DE LAS PROBETAS A COMPRESIÓN SIMPLE

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER 	LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS	ESCUELA DE INGENIERÍA 					
E1. Probetas realizadas con los agregados del río Chicamocha.							
Fuente:	RÍO CHICAMOCHA	Norma:	I.N.V. E - 747	Fecha:	Feb-04		
Planta:	PAVIANDI	Laboratorista:	JM - GG	Hoja:	1 de 2		
PROBETA	CARGA LEÍDA	CARGA CORREGIDA	DIÁMETRO	ÁREA	ESFUERZO	DEFORMACIÓN	IRC
	(Ton)	(Ton)	(cm)	(cm ²)	(Kg/cm ²)	(mm)	%
CTN1	1700	1591	10,27	82,84	19,2	N.R.	
CTN2	1620	1516	10,24	82,35	18,4	N.R.	
CTB1	1780	1666	10,28	83,00	20,1	N.R.	
CTB2	1730	1619	10,27	82,84	19,5	N.R.	
C1N1	1020	956	10,31	83,48	11,4	5,03	60,87%
C1N2	980	918	10,24	82,35	11,2	5,31	59,29%
C1B1	910	853	10,24	82,35	10,4	5,33	52,30%
C1B2	860	806	10,22	82,03	9,8	5,05	49,63%
C2N1	850	797	10,30	83,32	9,6	6,50	50,86%
C2N2	810	760	10,27	82,84	9,2	6,22	48,76%
C2B1	980	918	10,28	83,00	11,1	5,59	55,87%
C2B2	960	900	10,26	82,68	10,9	5,28	54,95%
C3N1	950	890	10,27	82,84	10,7	5,16	57,15%
C3N2	950	890	10,26	82,68	10,8	5,21	57,26%
C3B1	800	750	10,25	82,52	9,1	6,17	45,91%
C3B2	770	722	10,24	82,35	8,8	6,32	44,28%
C4N1	860	806	10,35	84,13	9,6	4,70	50,96%
C4N2	820	769	10,25	82,52	9,3	4,67	49,55%
C4B1	950	890	10,20	81,71	10,9	5,97	55,02%
C4B2	900	844	10,35	84,13	10,0	6,27	50,63%
IRC: Índice de Resistencia Consevada NR: No reportado							



E2. Probetas realizadas con los agregados del río Sogamoso.

Fuente:	RÍO SOGAMOSO	Norma:	I.N.V. E - 747	Fecha:	Feb-04
Planta:	ESGAMO	Laboratorista:	JM - GG	Hoja:	2 de 2

PROBETA	CARGA LEÍDA	CARGA CORREGIDA	DIÁMETRO	ÁREA	ESFUERZO	DEFORMACIÓN	IRC
	(Ton)	(Ton)	(cm)	(cm ²)	(Kg/cm ²)	(mm)	%
STN1	1580	1479	10,28	83,00	17,8	N.R.	
STN2	1530	1432	10,26	82,68	17,3	N.R.	
STB1	1740	1628	10,25	82,52	19,7	N.R.	
STB2	1690	1582	10,28	83,00	19,1	N.R.	
S1N1	1180	1105	10,27	82,84	13,3	4,83	75,94%
S1N2	1120	1049	10,20	81,71	12,8	5,16	73,08%
S1B1	980	918	10,28	83,00	11,1	5,16	57,06%
S1B2	930	872	10,20	81,71	10,7	5,08	55,01%
S2N1	1020	956	10,27	82,84	11,5	4,95	65,67%
S2N2	960	900	10,26	82,68	10,9	5,21	61,94%
S2B1	1210	1133	10,23	82,19	13,8	4,65	71,09%
S2B2	1160	1087	10,25	82,52	13,2	4,11	67,90%
S3N1	1020	956	10,22	82,03	11,7	4,57	66,31%
S3N2	1000	937	10,25	82,52	11,4	4,29	64,64%
S3B1	900	844	10,35	84,13	10,0	4,85	51,71%
S3B2	880	825	10,27	82,84	10,0	4,57	51,35%
S4N1	980	918	10,30	83,32	11,0	3,40	62,74%
S4N2	970	909	10,30	83,32	10,9	3,84	62,10%
S4B1	1060	993	10,23	82,19	12,1	4,45	62,30%
S4B2	1040	974	10,26	82,68	11,8	4,22	60,77%

IRC: Índice de Resistencia Consevada

NR: No reportado

BIBLIOGRAFIA

ASTM. Normas de Ensayos

COSME VARGAS, Hugo A. Una propuesta para diseñar pavimentos bien drenados en Colombia. 1998

ESCARIO y NÚÑEZ D. P. José L. Caminos. Tomo II. Cuarta edición. Madrid. 1964. Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. P. 560 – 567.

FERRÉ, Franquet Pedro. Adhesividad y activación. Revista técnica de la Asociación Española de la carretera. 4ª época, N° 103, Septiembre – Octubre 1999. p: 48 – 57.

FONSECA N. Pedro S., GALVIS D. Álvaro E.. Variación de las Propiedades Físico – Mecánicas de las mezclas asfálticas con el tiempo de acción del agua. Proyecto de grado como requisito parcial para optar el título de Ingeniería Civil. Director: Ing. Eduardo Castañeda. 2002.

GARCÉS G. Berenice, GARCÍA A. Ibet Z.. Estudio de la adherencia Agregado – Asfalto en presencia de Presión de Poro. Proyecto de grado como requisito parcial para optar el título de Ingeniería Civil. Director: Ing. Eduardo Castañeda. 2002.

HERNÁNDEZ, Agudelo Leonel. Estudio de los fenómenos de adherencia (stripping) y los ensayos de evaluación del comportamiento de la interfase árido – ligante en mezclas asfálticas.

INGENIERÍA DE PAVIMENTOS. 9º Simposio Colombiano. Bucaramanga – Colombia. Noviembre 10-12 de 1993. Universidad Industrial de Santander.

LOS ASFALTOS COLOMBIANOS. Cartilla práctica para el manejo de los asfaltos colombianos. ECOPETROL. ICP. 1997

MONTEJO ALFONSO. Ingeniería de Pavimentos en las vías terrestres. Ediciones Universidad Católica. Bogotá, 1999.

MONTES, Beatriz. Estudio comparativo de ensayos para determinar la adherencia agregado-asfalto. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ciencia fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería civil.

PAREJA, U. Carlos A., RODRIGUEZ, S. Luz Angela., MORALES. M, Pedro C.. Fundamentos teóricos de las interacciones fisicoquímicas entre el asfalto y el agregado mineral. Monografía de especialización en asfaltos para pavimentos, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias Fisicomecánicas; Escuela de Ingeniería civil.

PRIETO S. GLORIA A., ORREGO A. URIEL D. J.. Estudio de las interacciones de los Asfaltos Apiay y Barranca - Agregados por espectrofometría UV y VIS y Adsorción. Proyecto de grado como requisito parcial para optar el título de Químico. Director: Dr. Guillermo González Sierra. 1995.

RODRÍGUEZ S. Luz A., Morales M. Pedro C., Pareja U. Carlos A. Fundamentos teóricos de las interacciones fisicoquímicas entre el asfalto y el agregado mineral. Monografía presentada como requisito parcial para optar el título de especialista en Asfaltos para Pavimentos. Director: Ing. Eduardo Castañeda. 1999.

TAMAYO, T. Jorge. Estudio de la degradación de los Agregados Pétreos durante la vida de los Pavimentos. Ingeniería e investigación. Universidad Nacional de Colombia. P. 13 – 21.

REFERENCIAS

1. TRAXLER, R. N. and SCHWEYWER, H. E. How to make component Analysis. Oil and gas Journal, Vol. 52. 1953.
2. PETERSEN, J. C. Chemical Composition of Asphalt as Related to asphalt Durability: State of the arte. 1984
- 3 H.L.Von Quintus, SCHEROCMAN, J.A., HUGHEN, C. S. and KENNEDY, T., W.. Asphalt-Aggregate Mixture Analysis System (AASM), Transportation Research Board, National Research Council, Washintong, D.C. 1991.
- 4 ASPHALT INSTITUTE. Educational Series No. 10 (ES – 10). Second Edition, July 1, 1987.
- 5 TAMAYO, T. Jorge. Estudio de la degradación de los Agregados Pétreos durante la vida de los Pavimentos. Ingeniería e investigación. Universidad Nacional de Colombia. P. 13 – 21.
- 6 RODRÍGUEZ S. Luz A., Morales M. Pedro C., Pareja U. Carlos A. Fundamentos teóricos de las interacciones fisicoquímicas entre el asfalto y el agregado mineral. Monografía presentada como requisito parcial para optar el título de especialista en Asfaltos para Pavimentos. Director: Ing. Eduardo Castañeda. 1999.
- 7 W., H. GOTEES. “The evaluation of asphalt concret mix Desing”. Asphalt concrete Mix Desing: Development of more **Rotional** Approach, ASTM STP 104. W. Gartner, Jr. Ed. American Society of Testing and Materials. Philadelphia 1989. P. 5 – 12
- 8 GOKHMAN, L. M. Theoretical Basers of the Structure of Bitumens and other Organic Binder. Amer. Chem. Soc. Washintong, D.C. 1980. P 308 – 313.
- 9 L., FREDDY ROBERT, KANDHAL, S. P., BROWN, R. E., D.Y. L., KNEDDY, T. W.. Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction, National Center for Asphalt Technology, 1991.
10. F., N. FINN, MONISMITH, C. L. and MARKEVICH, N. J.. Pavement **performace** and Asphalt concrete Mix Desing, Proceedings. The Association of Asphalt Paving Technologis. Vol 52. 1983. P. 121 – 150.

11. B., E. RUTH, and SCHAUB, J. H.. A Design Procedures for Asphaltic concrete Mixtures. Proceedings the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol 55. 1986. P. 220 – 227.
12. B., E. RUTH, SCHEROCMAN, J. A. and CAROLL, J., J.. Evaluation of FDOT Specifications and Procedures for Asphalt Mixtures in Relating to Pavement Rutting under Heavy traffic conditions. Final Report Submitted to the Florida Department of Transportation (FDOT). University of Florida. 1989.
13. PRIETO S. GLORIA A., ORREGO A. URIEL D. J.. Estudio de las interacciones de los Asfaltos Apiay y Barranca - Agregados por espectrofometría UV y VIS y Adsorción. Proyecto de grado como requisito parcial para optar el título de Químico. Director: Dr. Guillermo González Sierra. 1995.
14. ESCARIO y NÚÑEZ D. P. José L. Caminos. Tomo II. Cuarta edición. Madrid. 1964. Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. P. 560 – 567.
15. BELL, C. A., FELLIN, M. J., and WIEDER, A. J.. Laboratory aging of Asphalt – aggregate Mixtures: Field Validation, Report No. SHRP – A – 390, Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washintong D.C. 1994.
16. ASTM. Normas de Ensayos
17. FONSECA N. Pedro S., GALVIS D. Álvaro E.. Variación de las Propiedades Físico – Mecánicas de las mezclas asfálticas con el tiempo de acción del agua. Proyecto de grado como requisito parcial para optar el título de Ingeniería Civil. Director: Ing. Eduardo Castañeda. 2002.
18. GARCÉS G. Berenice, GARCÍA A. Ibet Z.. Estudio de la adherencia Agregado – Asfalto en presencia de Presión de Poro. Proyecto de grado como requisito parcial para optar el título de Ingeniería Civil. Director: Ing. Eduardo Castañeda. 2002.
19. SCOTT, J.A.N.. Adhesion and Disbonding Mechanism of Asphalt Used In Highway Construction And Maintenance. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologist. Vol. 47. 1978
20. ENSLEY, K.. A Review of Adhesion Mechanism at The Crack Sealant / Asphalt Concrete Interfase. Institute For Research In Construction, National Research Of Council Canada, Canada. 2000.
21. PLANCHER, H., CHOW, C.. Holmes, S.A. And Petersen, J.C.. Moisture Induced Damaged In Bituminous Pavement A Study of Nitrogen Compound Interactions With

Aggregates. Proc. International Symposium, Progressi Nella Tecnologia Dei Bitumi. Milan, Italia. 1981.

22. ASPHALT SEMINAR. Characterization of asphalt in paving materials. Petrocanada (1992); p. al. fl.

23. HANSON, WILLIAM E. et al. Bituminous Materials. John Willey & Sons. Vol. 5. (1964).

24. BARTH, E. J.. Asphalt Science and technology. New York. Gordon and Breach Science Publisher (1984). P. 112 – 170 y 182 – 207.

25. B., E. RUTH and MILLER, M.D.. Shoring of dense grade friction course at interactions. Final report, UF Project No. 99700-7389, Department of Civil Engineering, University of Florida, Gainesville, December, 1987.

26. COBERTT, L. W.. Composition of asphalt based on generic fractionation using solvent deasphalting and elution-adsorption chromatography. En: Anal. Chem. Vol. 41. No. 4 (1979); p: 576 – 579.

27. BUSH, DAVID AARON. Aging Characteristics of asphalt binder and asphalt-aggregate mixture. UMI Dissertation Services. A Bell & Howell Company. University of Florida. 1997.

28. LOS ASFALTOS COLOMBIANOS. Cartilla práctica para el manejo de los asfaltos colombianos. ECOPETROL. ICP. 1997

29. HERNÁNDEZ, Agudelo Leonel. Estudio de los fenómenos de adherencia (stripping) y los ensayos de evaluación del comportamiento de la interfase árido – ligante en mezclas asfálticas.

30. FERRÉ, Franquet Pedro. Adhesividad y activación. Revista técnica de la Asociación Española de la carretera. 4ª época, N° 103, Septiembre – Octubre 1999. p: 48 – 57.

31. FRITZ, H. and JUNKER, J.. Adherencia de los ligantes bituminosos a los áridos. Strate U. Verkehr N° 11. Nov. 1975, p: 445 – 452

32. FRITZ, H. and JUNKER, J.. Fundamental properties of Asphalt – Aggregate interactions including adhesion and absorption. National Research Council Washington, D.C.. 1993.

33. CURTIS, Christine W; ENSLEY, Keith; EEPS, Jon. Fundamental properties of Asphalt – Aggregate Interactions including adhesion an absorption, Strategic Highway Research Program, Washington, D.C.. 1993
34. CUEVAS, Hernández Ricardo. La importancia del conocimiento de la mineralogía de los materiales de pavimentos. IX Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos. UIS, Tomo II (1993); p: 1 – 26.
35. KANDHAL, Prithvi S. National Center for Asphalt Technology. Auburn University of Alabama. State of Art and Critical Review of Test Methods.
36. KANDHAL, Prithvi S. National Center for Asphalt Technology. Auburn University of Alabama. Water Damage to Asphalt Overlays.
37. KANDHAL, Prithvi S. National Center for Asphalt Technology. Auburn University of Alabama. Moisture Susceptibility of HMA Mixes: Identification of Problem and Recommended Solutions.