

**LA ECONOMÍA DE LA ENERGÍA Y DE IMPACTO AMBIENTAL EN LOS
PAVIMENTOS**

DIEGO FERNANDO CLARO CARRASCAL

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN ASFALTOS Y PAVIMENTOS
BUCARAMANGA**

2004

**LA ECONOMÍA DE LA ENERGÍA Y DE IMPACTO AMBIENTAL EN LOS
PAVIMENTOS**

DIEGO FERNANDO CLARO CARRASCAL

**Trabajo de Grado para optar al título de
ESPECIALISTA EN ASFALTOS Y PAVIMENTOS**

Director

MARIO ÁLVAREZ CIFUENTES

Ingeniero Químico, PhD

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN ASFALTOS Y PAVIMENTOS
BUCARAMANGA**

2004

DEDICATORIA

A mi madre por su apoyo permanente y su ayuda incondicional, a pesar de sus temores siempre esta presente.

A toda mi familia. Sin la ayuda de estos, mis seres queridos no hubiera sido posible la feliz culminación de la especialización.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a todas las personas que contribuyeron al desarrollo de este proyecto, especialmente a:

- Todos los compañeros de la especialización por su comprensión y apoyo.
- Al Ingeniero Mario Álvarez.
- A mi Esposa, mi musa, el mejor motivo para proyectarme en el futuro.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. ADITIVOS MEJORADOTES DE ADHERENCIA PARA ASFALTOS	3
1.1 INTRODUCCIÓN	3
1.2 METODOLOGÍA	4
1.3 DOSIFICACIÓN DE LOS ADITIVOS MEJORADOTES DE ADHERENCIA AL ASFALTO	5
1.4 OPTIMIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE MEZCLA ASFALTO ADITIVO MEJORADOR DE ADHERENCIA	6
1.5 EVALUACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	7
1.6 RESULTADOS	7
1.6.1 Análisis de los aditivos	7
1.6.2 Determinación del porcentaje optimo de Aditivo mejorador de Adherencia	8
1.6.3 Optimización de las Condiciones de mezcla asfalto aditivo Mejorador de adherencia	9
1.6.4 Análisis físico del asfalto APIAY con y sin Aditivos	9
1.7 ANÁLISIS FÍSICO MECÁNICO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	11
1.7.1 Granulometría del agregado mineral	11
1.7.2 Diseño Marshall (Norma: INV E-748 (ASTMD 1559-89))	11
1.7.3 Módulos Dinámicos (Norma: INV E-754 (ASTMD 4123))	14
1.7.4 Resistencia a la Deformación Permanente	15
1.7.5 Resistencia a la Fatiga	16

1.7.6 Durabilidad	18
1.7.7 Determinación de la Susceptibilidad a la Humedad (TSR) (Norma AASHTO T 283)	19
2. FORMULACIÓN DE SOLUCIONES ESTRUCTURALES EN UN PAVIMENTO	22
2.1 INTRODUCCIÓN	22
2.2 FACTOR DE EQUIVALENCIA DE CARGA POR EJE AASHTO	23
2.3 METODOLOGÍA EMPLEADA	25
2.3.1 Evaluación visual de la calzada	26
2.3.2 La condición estructural	26
2.4 EVALUACIÓN VISUAL DE LA CALZADA	27
2.4.1 Mantenimiento preventivo	28
2.4.2 Mantenimiento correctivo	28
2.4.3 Mantenimiento intensivo	28
2.4.4 Rehabilitación	28
2.4.5 Reconstrucción	28
2.5 METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN VISUAL DE LA CALZADA	29
2.6 FORMULACIÓN DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN	31
3 DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA RECICLAJE DE PAVIMENTOS ENVEJECIDOS, UTILIZANDO EMULSIÓN REJUVENECEDORA	33
3.1 INTRODUCCIÓN	33
3.2 PROCEDIMIENTOS	34
3.3 RESULTADOS	35
4 LA CONSIDERACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LOS PELIGROS NATURALES EN LA EVALUACIÓN DE PROYECTOS VIALES	49

4.1 INTRODUCCIÓN	49
4.2 MARCO DE REFERENCIA	50
4.3 GENERACIÓN DEL PERFIL DE VULNERABILIDAD EN LOS SISTEMAS CARRETEROS	53
4.4 CONSIDERACIÓN DE COSTOS EN LA EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD	83
5 LA UTILIZACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS DRENANTES: REDUCCIÓN DE LOS IMPACTOS EN EL MEDIO AMBIENTE	62
5.1 INTRODUCCIÓN	62
5.1.1 Historia	62
5.1.2 Descripción de los recubrimientos drenantes	64
5.2 REDUCCIÓN DE LOS IMPACTOS DEBIDOS AL RUIDO	67
5.2.1 Recapitulaciones	67
5.2.2 Los principales resultados obtenidos	70
5.2.3 Interpretación de los resultados	74
5.2.4 Evolución de las características en el tiempo	75
5.2.5 Impactos sobre la molestia sentida por los vecinos	79
5.3 MEJORÍA DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS	81
5.3.1 Principales resultados obtenidos	81
5.3.2 Comparación de una calzada drenante con una calzada clásica	84
5.3.3 Asociación a las estructuras deposito	87
5.3.4 Pruebas de descolmatado	89
6 RECICLAJE EN FRIÓ – EN EL SITIO – DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS USANDO MATERIALES BITUMINOSOS	92
6.1 DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN	92
6.1.1 Introducción	92

6.1.2	Descripción del método	92
6.1.3	Ventajas del método	93
6.1.4	El proceso constructivo	93
6.1.5	Diseño de la mezcla	94
6.1.6	Diseño estructural	96
6.1.7	Especificaciones y control de calidad	97
6.2	CONDICIONES DE LA EXPERIENCIA EXITOSA Y NO EXITOSA	98
6.3	PROBLEMAS ENFRENTADOS Y SOLUCIONES ADOPTADAS	99
6.3.1	De diseño de mezclas	99
6.3.2	De diseños estructurales	100
6.3.3	De construcción	101
6.4	LECCIONES APRENDIDAS	103
6.4.1	De diseño de mezclas	103
6.4.2	De diseño estructural	104
6.4.3	De construcción	104
7	ASFALTO DE ALTA PERFORMANCE PARA CARRETERAS UNA OPCIÓN DE AMPLIO GRADO PARA PAVIMENTACIÓN	106
7.1	INTRODUCCIÓN	106
7.2	PARTE EXPERIMENTAL	108
7.2.1	Consistencia	109
7.2.2	Temperatura de mezclado y compactación	109
7.2.3	Susceptibilidad térmica	109
7.2.4	Módulo de Rigidez (Stiffness)	110
7.2.5	Clasificación SEP de los ligantes asfálticos	110
7.3	PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS	112

7.3.1	Dosificación de concreto asfáltico	112
7.3.2	Ensayo Marshall	113
7.3.3	Wheel Tracking Test realizado en Argentina	114
7.3.4	Ensayo de abrasión sobre mezclas bituminosas (California Test 360)	115
7.4	DETERMINACIÓN DE LA VIDA DE FATIGA	115
7.5	PRUEBA DE APLICACIÓN EN RUTAS	116
7.5.1	En ruta 79 provincia de San Luis – Argentina	116
7.5.2	En Autopistas Ezeiza Cañuelas – Camino Colector	117
7.5.3	Evaluación de estado de pavimento ruta 79	117
8	INFLUENCIA DEL CONTROL DE CALIDAD EN LAS OBRAS	119
8.1	INTRODUCCIÓN	119
8.2	ANÁLISIS COMPARATIVO	122
8.2.1	Obras de texturizado	122
8.2.2	Carpeta de concreto asfáltico reciclado en caliente	125
8.2.3	Carpeta de concreto asfáltico convencional	128
9	EXPERIENCIAS DEL EMPLEO DE EMULSIONES ASFÁLTICAS MEJORADAS CON POLÍMEROS SBR	150
9.1	INTRODUCCIÓN	150
9.2	MATERIALES ASFÁLTICOS EMPLEADOS EN OBRAS DE MANTENIMIENTO	150
9.2.1	Cemento asfáltico	150
9.2.2	Asfalto liquido Cutback	151
9.2.3	Emulsión asfáltico cationica	151
9.3	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO EFECTUADA EN CARRETERA	152
9.3.1	Generalidades sobre los modificadores de asfalto	152

9.3.2 Emulsiones asfálticas modificadas con polímeros S.B.R	153
9.4 PROCEDIMIENTOS EMPLEADOS EN LAS OBRAS DE MANTENIMIENTO	155
9.4.1 Sello asfáltico con emulsión asfáltica modificada	155
9.4.2 Tratamiento de fisuras y grietas	157
9.4.3 Mezclas de arena – emulsión	158
9.4.3.1 Mastic asfáltica en frío	159
9.4.4 Mezclas asfálticas para obras de mantenimiento	161
9.4.5 Estabilización de suelos (mejoramiento de capas granulares	162
10 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SOLUCIONES EN PAVIMENTOS Y LA SEÑALIZACIÓN VIAL ATENDIENDO A LA SEGURIDAD Y LA COMODIDAD DEL TRANSITO	163
10.1 INTRODUCCIÓN	163
10.2 DESARROLLO DEL TRABAJO	163
10.2.1 Costo de una victima	163
10.2.2 Costo global de accidente	165
11 REDUCCIÓN DEL RUIDO DEL TRAFICO URBANO MEDIANTE PAVIMENTACIONES ASFÁLTICAS FINAS	168
11.1 INTRODUCCIÓN	168
11.2 ESTADO DEL ARTE	169
11.3 DEFINICIÓN DE LOS PAVIMENTOS EXPERIMENTALES	174
11.4 DESARROLLO EXPERIMENTAL	176
11.5 RESULTADOS EXPERIMENTALES	178
11.6 ANÁLISIS	179
12 PREVENCIÓN DE RIESGOS EN PAVIMENTACIÓN ASFÁLTICA	181
12.1 INTRODUCCIÓN	181

12.2 PREVENCIÓN DE RIESGOS EN PAVIMENTACIÓN ASFÁLTICA	184
12.2.1 Riesgos generales asociados al asfalto	184
12.3 SELECCIÓN MATERIAL GRANULAR	185
12.3.1 Transporte de maquinaria, planta seleccionadora y chancadora al pozo	185
12.3.2 Montaje de planta seleccionadora y chancadora	186
12.3.3 Roce y despeje de material inadecuado desde sector a explotar	187
12.3.4 Acopio de material	188
12.3.5 Carguio a camiones	189
12.3.6 Selección material granular	189
12.3.7 Transporte y descarga del material chancado y / o selección del material	190
12.4 TRANSPORTE DE PLANTA ASFALTO	192
12.5 MONTAJE DE PLANTA ASFALTO	193
12.6 PUESTA EN MARCHA DE LA PLANTA	193
12.7 ALIMENTACIÓN DE TOLVAS DOSIFICADORAS	195
12.8 DOSIFICACIÓN DE LOS ÁRIDOS EN LAS TOLVAS	196
12.9 TRANSPORTE DE LOS ÁRIDOS POR CORREAS TRANSPORTADORAS	196
12.10 SECADO DEL ÁRIDO EN TAMBOR GIRATORIO	197
12.11 DESCARGA DEL ASFALTO A ESTANQUES	198
12.12 MEZCLA DEL ÁRIDO CON ASFALTO	199
12.13 COLECTOR DE POLVO	200
12.14 CARGUIO Y TRANSPORTE DE LA MEZCLA ASFÁLTICA	200
12.15 DESCARGA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA	201

12.16 EXTENDEDORA DE PRODUCTOS BITUMINOSOS	202
BIBLIOGRAFÍA	204

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Parámetros evaluados al asfalto APIAY con y sin Aditivos	10
Tabla 2. Temperaturas de fabricación y colocación de las mezclas Asfálticas	12
Tabla 3. Diseño de las mezclas asfálticas método Marshall	14
Tabla 4. Deformación permanente de las mezclas asfálticas	16
Tabla 5. Resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas a 25°C	17
Tabla 6. Alternativas de soluciones estructurales en términos del PCI	32
Tabla 7. Granulometría del material extraído de los escombros de Pavimento	36
Tabla 8. Parámetros de caracterización del asfalto envejecido y modificado Con emulsión rejuvenecedora	36
Tabla 9. Datos de la curva reológica del asfalto original y con emulsión Rejuvenecedora	37
Tabla 10. Determinación de la humedad optima de preenvuelta	38
Tabla 11. Resultados de las pruebas de compresión simple a 0°C	39
Tabla 12. Pruebas físico-químicas de las mezclas de escombros reciclados Con E. A y E. R	41
Tabla 13. Módulos dinámicos de los escombros reciclados con los diferentes Tipos de emulsión	42

Tabla 14. Deformación permanente de los escombros reciclados a 40°C	43
Tabla 15. Resultados de la prueba de esfuerzos vs. deformación	44
Tabla 16. Granulometría ajustada del material escombros de pavimento	46
Tabla 17. Pruebas físico-mecánicas de las mezclas de escombros con ajuste de la granulometría y E. R más S. A	47
Tabla 18. Deformación permanente de los escombros con granulometría Ajustada a 40°C	47
Tabla 19. Variables a considerar en la evaluación del peligro potencial de Peligros naturales (OEA, 1993)	55
Tabla 20. Características de los asfaltos	108
Tabla 21. Temperatura de mezclado y compactación	109
Tabla 22. Modulo de rigidez	110
Tabla 23. Clasificación de los ligantes según SHRP	111
Tabla 24. Propiedades físico-mecánicas del concreto asfáltico	113
Tabla 25. Wheel Tracking Test	114
Tabla 26. Ensayo de abrasión (California Test 360)	115
Tabla 27. Evolucion de los controles gradualmente implementados	126
Tabla 28. Reciclado, planilla de evolución de control	132
Tabla 29. Concreto asfáltico convencional. Planilla de evolución de control	141
Tabla 30. Granulometría de la arena	156
Tabla 31. Usos granulométricos de la arena	159
Tabla 32. Usos granulométricos de los agregados	160
Tabla 33. Pavimentos experimentales	175

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Características de los recubrimientos drenantes	66
Cuadro 2. Evoluciones de los valores de ruido en la emisión	69
Cuadro 3. Resultados experimentales de diferentes revestimientos	71
Cuadro 4. Síntesis de la base de datos “ruido de rodamiento”	72
Cuadro 5. Niveles sonoros emitidos para recubrimientos de diferentes Espesores	73
Cuadro 6. Niveles sonoros en recubrimientos antiguos	76
Cuadro 7. Comparación de los niveles sonoros de recubrimientos Recientes y antiguos	78
Cuadro 8. Comparación de los niveles sonoros en el medio ambiente Antes y después de la implantación de recubrimientos Drenantes	81
Cuadro 9. Evolucion de la permeabilidad de un recubrimiento drenante	83
Cuadro 10. Velocidades promedio de precolación (En cm/s)	83
Cuadro 11. Comparación de las concentraciones de las aguas de Chorro	84
Cuadro 12. Comparación de los flujos de contaminación	85
Cuadro 13. Dedución de los flujos de contaminación gracias a los Recubrimientos drenantes	86

Cuadro 14. Comparación de los valores de los parámetros de calidad De las aguas pluviales medidas en dos sitios	88
Cuadro 15. Dedución de contaminación obtenida en un Estacionamiento	88
Cuadro 16. Contenidos de metales pesados de los sedimentos de Descolmatado (En mg/kg MS)	90

LISTA DE GRAFICAS

	pág.
Grafica 1. % aditivo A vs TSR (%)	8
Grafica 2. % aditivo B vs TSR (%)	8
Grafica 3. Estabilidad Marshall vs Ligante	12
Grafica 4. Gravedad Bulk vs % Ligante	12
Grafica 5. Vacios en el agregado vs % Ligante	13
Grafica 6. Flujo Marshall vs % Ligante	13
Grafica 7. Modulos dinamicos	19
Grafica 8. Deformación plastica	19
Grafica 9. Desempeño a la fatiga	19
Grafica 10. Durabilidad	19
Grafica 11. Susceptibilidad a la Humedad	21
Grafica 12. Susceptibilidad a la Humedad	21
Grafica 13. Definición de sectores comunes	37
Grafica 14. Curva reologica de los asfaltos extraidos y con emulsión rejuvenecedora	39
Grafica 15. Porcentaje optimo de humedad de preenvuelta	40
Grafica 16. Resistencia a la compresión simple a 0° C	42
Grafica 17. Modulos dinamicos de las mezclas de escombros con diferentes tipos de emulsion	45

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema de interpretación de vulnerabilidad a peligros naturales	54
Figura 2. Perfil de vulnerabilidad de la carretera a los peligros naturales A, B y C.	56
Figura 3. Periodo de análisis: 20 Años	61

RESUMEN

TITULO: LA ECONOMÍA DE LA ENERGÍA Y DE IMPACTO AMBIENTAL EN LOS PAVIMENTOS*

AUTOR: CLARO CARRASCAL, Diego Fernando**

PALABRAS CLAVES: Economía Ambiental, Mezclas Bituminosas, Reciclaje en frío, Adherencia

DESCRIPCIÓN:

Los deterioros en las mezclas bituminosas relacionados con la mala adherencia árido – asfalto, ocasionan grandes pérdidas económicas para el país, no sólo porque exigen una intervención más pronta de lo previsto, si no porque el estado funcional de las vías se ve afectado de tal forma, que puede implicar un considerable aumento de los costos operativos del transporte.

Patologías asociadas a la mala adherencia como el stripping y el ravelling, que se manifiestan por un desprendimiento de áridos gruesos, pueden originar la formación de baches y llegar a afectar negativamente la estructura del pavimento, al facilitar la acción de los agregados agresivos. Una situación aún más crítica, se produce cuando los problemas de adherencia se combinan con un deficiente drenaje, ya que es en presencia del agua que estos problemas se complican, haciéndose más notorios. En síntesis, los inconvenientes debidos a la mala adherencia árido – ligante de fabricación de las mezclas, son favorecedores de rápidos deterioros del pavimento.

Dada la situación actual y la que se espera, se puede observar la importancia que tiene el agilizar las operaciones de mantenimiento y rehabilitación en cada uno de sus pasos; es decir, entre más se optimicen los procesos para llevar a cabo dichas operaciones, la conservación del patrimonio vial será más eficiente y por lo tanto más económica; En Colombia y en otros países, el reciclaje en frío del concreto asfáltico envejecido y parte de la base granular, se realiza por medio de incorporación de emulsiones asfálticas, preferiblemente catiónicas de rompimiento lento. Este material tratado se emplea como base estabilizada, observándose simplemente que el asfalto presente se utiliza como agregado mineral, lo que puede causar alta rigidez de estos materiales.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Especialización en Asfaltos y Pavimentos, ALVAREZ C., Mario.

SUMMARY

TITLE: THE ECONOMY OF THE ENERGY AND ENVIRONMENTAL IMPACT IN THE PAVEMENTS*

AUTHOR: CLARO CARRASCAL, Diego Fernando**

KEYWORDS: Environmental Economy, Bituminous Mixtures, Recycling in cold, Adhesion

DESCRIPTION:

The deteriorations in the bituminous mixtures related to the bad adhesion arid - asphalt, economically cause great lost for the country, non just because they demand a quick intervention, if not because the functional state of the routes is affected of such form, that it can imply a considerable increase of the operative costs of the transport.

Pathologies associated to the bad adhesion like stripping and raveling, to manifest by a loosening of thickness arid, can originate the formation of potholes and affect negatively the structure of the pavement, when facilitating the action of aggressive aggregates. Even more critic situation, takes place when the adhesion problems are combined with a deficient drainage, since it is in the water presence that these problems are complicated, becoming more well-known. On synthesis, the disadvantages due to the bad adhesion arid - ligature of manufacture of the mixtures, are supporters of fast deteriorations of the pavement.

Given to the present situation and the one that is expected, can be observed the importance of making agile the operations of maintenance and rehabilitation in each one of its steps; that is to say, even more the processes are optimizing to carry out these operations, the conservation of the road patrimony will be more efficient and therefore economic; In Colombia and other countries, the recycling in fried of aged asphaltic concrete and part from the granular base, is made by means of incorporation of asphalt emulsions, preferably cationics of slow breaking. This treated material is used as stabilized bases, simply observing that present asphalt is used like mineral aggregate, which can cause high rigidity of these materials

* Research paper.

** Faculty of engineerings Physical – Mechanical, School of Civil Engineering, Specialization in Asphalts and Pavements, ALVAREZ C., Mario.

INTRODUCCIÓN

La economía de la energía y del impacto ambiental es el estudio de cómo y por que las personas, bien sean consumidores, firmas, organizaciones sin animo de lucro o agencias no gubernamentales, toman decisiones sobre el uso de recursos valiosos que tienen consecuencias ambientales. Además, se ocupa de estudiar las maneras como se pueden cambiar las políticas e instituciones económicas con el propósito de equilibrar un poco mas esos impactos ambientales con los deseos humanos y las necesidades del ecosistema en si mismo.

La degradación ambiental surge a partir del comportamiento humano que carece de ética o moral. No es el subdesarrollo moral lo que conduce a la destrucción ambiental; mas bien, es la forma como se ha organizado el sistema económico dentro del cual las personas se dan a la tarea de hacer sus vidas.

Las personas contaminan por que esta es la forma más económica que poseen para resolver un problema practico muy común. Este problema consiste en la eliminación de los productos de desecho que quedan después de que los consumidores han terminado de utilizar algo, o después de que sus firmas comerciales acaban de producir los bienes.

En las economías de la empresa privada, como las de los países occidentales industrializados, las personas son recompensadas por maximizar las utilidades, es decir, por la diferencia existente entre el valor de lo que se produce y el valor de lo que se utiliza en el proceso de producción. Mas aún, según esta misma idea, las ganancias que los empresarios tratan

de maximizar son de carácter estrictamente monetario. En esta precipitada búsqueda de utilidades monetarias, los empresarios no tienen en cuenta los impactos ambientales de sus acciones porque esto “no vale la pena”. Por consiguiente, en esta lucha incontrolada por obtener utilidades monetarias, la única manera de reducir la contaminación ambiental es debilitar la fortaleza del deseo de obtener ganancias.

Cualquier sistema producirá impactos ambientales destructivos si los incentivos del sistema no están estructurados para evitarlo. Se debe mirar de manera mas profunda para poder entender como se pueden cambiar para obtener una economía razonablemente progresiva sin efectos colaterales de desastre ambiental.

1. ADITIVOS MEJORADORES DE ADHERENCIA PARA ASFALTOS

1.1 INTRODUCCIÓN

Los deterioros en las mezclas bituminosas relacionados con la mala adherencia árido – asfalto, ocasionan grandes pérdidas económicas para el país, no sólo porque exigen una intervención más pronta de lo previsto, si no porque el estado funcional de las vías se ve afectado de tal forma, que puede implicar un considerable aumento de los costos operativos del transporte.

Patologías asociadas a mala adherencia como el stripping y el ravelling, que se manifiestan por un desprendimiento de áridos gruesos, pueden originar la formación de baches y llegar a afectar negativamente la estructura del pavimento, al facilitar la acción de los agregados agresivos. Una situación aún más crítica, se produce cuando los problemas de adherencia se combinan con un deficiente drenaje, ya que es en presencia del agua que estos problemas se complican, haciéndose más notorios. En síntesis, los inconvenientes debidos a la mala adherencia árido – ligante y que existen desde el mismo instante de fabricación de las mezclas, son favorecedores de rápidos deterioros del pavimento.

De cara a solucionar esta situación, es necesario llevar a cabo un programa de investigación tendiente a reducir la ocurrencia de estos problemas, que por su complejidad se debe realizar en dos etapas o fases, ya que el fenómeno de adherencia como un problema de conjunto, tiene que ver con la interacción de dos materiales específicos, el árido y el ligante. En esta primera etapa de la investigación, se ha optado por actuar sobre el ligante, manteniendo como condición fija el esqueleto mineral.

Con este estudio, se pretende emplear residuos de refinería para producir Aditivos Mejoradores de Adherencia (AMA). El desarrollo de estos AMA, requieren el empleo de compuestos químicos (tensoactivos) que proporcionen mayor capacidad de adherencia del conjunto árido – ligante, tendientes a evitar el desprendimiento de partículas causantes en las vías de problemas como los expuestos anteriormente y aumentar de esta manera la vida útil del pavimento, con los consecuentes ahorros económicos para el país.

Como la mayoría de tensoactivos empleados para este propósito en nuestro país son importados, los costos de fabricación de las mezclas asfálticas que los contienen son relativamente altos, factor que hace indispensable el desarrollo de nuevos aditivos que produzcan los mismos efectos a menores costos, utilizando para este fin, materias primas que en la actualidad son residuos o subproductos de la industria petroquímica.

En este contexto, se evalúa esta clase de tensoactivos, obtenidos en el Laboratorio de Asfaltos del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), a partir de los subproductos y residuos de la industria petrolera y química. De esta manera se pretenden disminuir los costos de producción y minimizar el impacto ambiental de estos materiales de desecho, adicionándoles valor agregado, en tanto que se mejora el comportamiento de las mezclas en presencia del agua.

1.2 METODOLOGÍA

Los Aditivos Mejoradores de Adherencia (AMA) A y B empleados, se fabricaron tomando como base las condiciones de preparación establecidas en estudios preliminares realizados en el Instituto Colombiano del Petróleo

(ICP). El asfalto APIAY fue seleccionado como ligante, ya que con él se han adelantado varios proyectos de investigación, permitiendo establecer un punto de comparación. Así mismo, existe el antecedente de la deficiencia de adherencia identificada en la interfase de los materiales Pescadero – Apiay, cuando se encuentran haciendo parte de la mezcla asfáltica, en condiciones de saturación.

1.3 DOSIFICACIÓN DE LOS ADITIVOS MEJORADORES DE ADHERENCIA AL ASFALTO

Una vez obtenidos los dos aditivos, se efectuó la dosificación basada en el método de Evaluación de Susceptibilidad a la Humedad de Mezclas Asfálticas, según la Norma AASTHO (American Association of State Highway and Transportation Officials) T 283-89. Este ensayo evalúa la resistencia de mezclas asfálticas compactadas en caliente al daño causado por la humedad, a través del parámetro “TSR”, el cual deriva su origen de las iniciales de las palabras Tensile Strength Ratio. Se busca mejorar la adherencia y la compatibilidad entre los áridos y el ligante, mediante la maximización de este parámetro, adicionando diferentes porcentajes de aditivo respecto al peso del ligante. Con el aditivo A se ensayaron porcentajes de 1, 2, y 3% en peso, mientras que con el B los porcentajes fueron: 3, 5, 7, 10 y 15% en peso, escogiéndose el que mayor valor de TSR proporcionara a la mezcla asfáltica. Los porcentajes seleccionados se escogieron con base a los resultados obtenidos en el ICP.

El TSR, es un indicativo del grado de adherencia entre el asfalto y el árido, cuando son sometidos a variantes climáticas. Este fenómeno se evalúa a través de la relación entre el esfuerzo de tracción indirecta producido en muestras secas y en muestras sometidas a un proceso de saturación y

acondicionamiento (%TSR), simulando los efectos reales del agua en los vacíos de la mezcla compactada. El valor mínimo sugerido por la norma, sobre el cual se determina si una mezcla posee buenas propiedades de adherencia, es 80%. Sin embargo, se recomienda que los resultados obtenidos después de la prueba excedan el valor mínimo recomendado.

1.4 OPTIMIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE MEZCLA ASFALTO ADITIVO MEJORADOR DE ADHERENCIA

Una vez determinado el porcentaje óptimo de AMA mediante la prueba TSR, se procede a establecer las mejores condiciones de tiempo y temperatura de mezclado entre el ligante y el aditivo, para lo cual fue necesario desarrollar una metodología aplicando como variable de respuesta, la rigidez del asfalto a temperaturas por debajo de cero grados (-28°C) y la viscosidad a 60, 135 y 165°C, utilizando los reómetros de viga flexible (Bending Beam Rheometer) y rotacional respectivamente, teniendo como variables de entrada la temperatura y el tiempo de reacción entre el asfalto y el aditivo. La velocidad de agitación se seleccionó con base en la consistencia del ligante, una vez es incorporado el aditivo, aspecto que implica mantenerla constante en toda la metodología desarrollada.

El parámetro de viscosidad a temperaturas altas se escoge en razón a que esta propiedad varía poco con el aumento de aditivo, por tanto se espera que al mantener un mismo porcentaje de éste y variar la temperatura de reacción se logren apreciar cambios en sus viscosidades; mientras que la rigidez a bajas temperaturas, sirve para evaluar el deterioro del pavimento por fisuramientos ocasionados por una alta rigidez del material asfáltico; siendo estas propiedades complementarias.

1.5 EVALUACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Se realizó el diseño y la caracterización físico-mecánica de la mezcla asfáltica elaborada con áridos triturados proveniente del sitio Pescadero, Río Chicamocha en el departamento de Santander, bajo la granulometría ideal para capa de rodadura, según la especificación MDC-2 del INV-96. Se evalúan las variaciones ocurridas al fenómeno de adherencia del conjunto árido-ligante, como resultado de adicionar los aditivos, así como su respuesta a las sollicitaciones a las que se verá sometida durante su funcionamiento en la estructura del pavimento. A través de la caracterización dinámica, se determinan parámetros que indican el comportamiento a las cargas repetitivas, como son, el módulo de rigidez (relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación recuperable), utilizando el ensayo de módulos dinámicos, así como su posibilidad de falla por ahuellamiento mediante el ensayo de carga axial repetida ó prueba de deformación plástica y su resistencia al fisuramiento mediante el ensayo de fatiga.

1.6 RESULTADOS

1.6.1 Análisis de los aditivos. El ADITIVO A presenta una consistencia semisólida con bajo punto de fusión y aspecto de color amarillo verdoso. El peso molecular promedio del ADITIVO A es de $M_w = 663$ g/mol (determinado por el método crioscópico).

El ADITIVO B es un sólido de color café, que al ser calentado presenta la consistencia típica de un plástico. Este comportamiento se debe a la presencia de jabones de diferentes especies presentes en el residuo, los cuales al estar en conjunto registran propiedades elásticas a temperaturas altas, y rígidas a temperatura ambiente. Su peso molecular promedio no fue

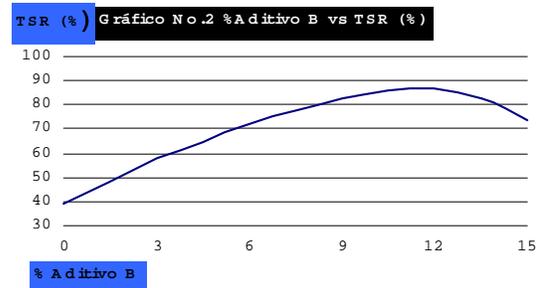
posible determinarlo en razón a que el producto no es soluble en benceno, condición indispensable para la realización del ensayo.

1.6.2 Determinación del porcentaje óptimo de Aditivo Mejorador de Adherencia. La tendencia de los valores de TSR evaluados en la dosificación para el asfalto original y los mejorados con diferentes concentraciones de los dos aditivos se muestra en las Gráficas 1 y 2.

Gráfica 1. % Aditivo A vs TSR (%)



Gráfica 2. % Aditivo B vs TSR (5)



Según los resultados obtenidos, al adicionar aditivo A, no se aprecia una tendencia clara para determinar su contenido óptimo mediante un máximo, sin embargo, con base en la norma AASTHO T 283, 3% es el porcentaje recomendado, ya que este valor supera el 80% de TSR (91%) (ver gráfica 1), factor que indica una mejora significativa en la adherencia entre los dos materiales respecto a su comportamiento original (TSR = 36%), previendo un buen comportamiento de la mezcla asfáltica en condiciones de saturación. En la gráfica 2 se aprecia una tendencia clara para determinar el contenido

óptimo de aditivo B, representada a través de un punto máximo calculado como 10%. Sin embargo, todos los porcentajes de aditivo que posean un valor de TSR mayor que 80%, son aceptables según la norma. El mejoramiento progresivo de TSR mostrado en la grafica, representa la influencia positiva del aditivo B en la adherencia, previendo menores pérdidas en la resistencia a la tracción de la mezcla en condición saturada.

1.6.3 Optimización de las Condiciones de Mezcla Asfalto Aditivo Mejorador de Adherencia. Determinado el porcentaje óptimo de AMA mediante el ensayo TSR, para el aditivo A (3%) y para el B (10%), se procede a seleccionar la temperatura y tiempo óptimo de reacción asfalto – aditivo utilizando la metodología mencionada anteriormente. Con ella se determinaron satisfactoriamente las condiciones óptimas de mezclado de estos dos materiales. Se encontró que la temperatura y el tiempo de mezclado para el aditivo A son 152°C y 45 minutos respectivamente, mientras que para el B son 175°C y 60 minutos. Los resultados y análisis se encuentran consignados en el documento final, propiedad del ICP.

1.6.4 Análisis Físico del asfalto APIAY con y sin Aditivos. En la tabla 1 se presentan las propiedades físicas más relevantes del asfalto APIAY sin aditivo y con los porcentajes óptimos determinados.

Tabla 1. Parámetros evaluados al asfalto APIAY con y sin Aditivos.

Tabla No.1 Parámetros evaluados al asfalto APIAY con y sin Aditivos			
Parámetros	Asfalto		
	SIN	CON ADITIVO	CON ADITIVO
	ADITIVO	A	B
Viscosidad, @60°C (Poises)	1641.0	1210.0	4597.5
Punto de Ablandamiento (°C)	48.0	47.7	50.1
Penetración, @25°C(1710mm)	72.1	86.5	54.6

Como se puede observar en la tabla anterior, el aditivo A (3% en peso) le induce al asfalto un incremento en la penetración y por consiguiente una disminución de la viscosidad con relación al asfalto sin aditivo.

Este comportamiento, se debe posiblemente a la adsorción de los compuestos constituyentes del aditivo sobre los lugares poláricos de la estructura molecular del ligante, envolviéndola y a la vez impidiendo la formación de enrejados moleculares (dispersión alta de los asfáltenos) disminuyendo así la viscosidad y aumentando la penetración.

Con el aditivo B (10% en peso) ocurre lo contrario; aumenta la viscosidad y disminuye la penetración, fenómeno que se presenta posiblemente porque los cationes presentes en él se absorben en los sitios más polares de los

asfáltenos, mientras que sus sitios menos polares se orientan hacia el medio dispersante, originando la formación de una nueva red dentro de la estructura molecular del asfalto, causando un incremento del grado de entrecruzamiento molecular e induciendo el aumento de la viscosidad y disminución de la penetración.

1.7 ANÁLISIS FÍSICO MECÁNICO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

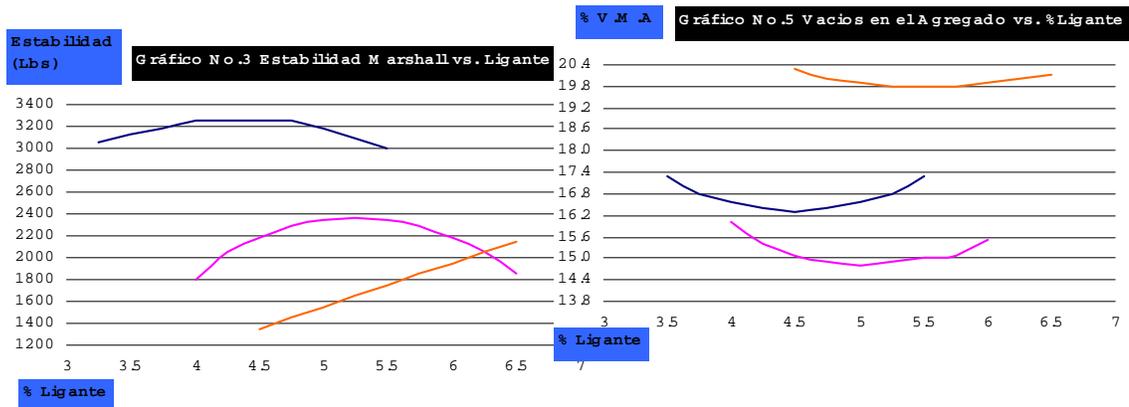
1.7.1 Granulometría del agregado mineral. La granulometría del agregado mineral utilizada corresponde a la combinación ideal para capa de rodadura, según la especificación MDC-2 del INVIAS-96. El tamaño máximo nominal de partículas, está representado por la abertura del tamiz N° 3/4”.

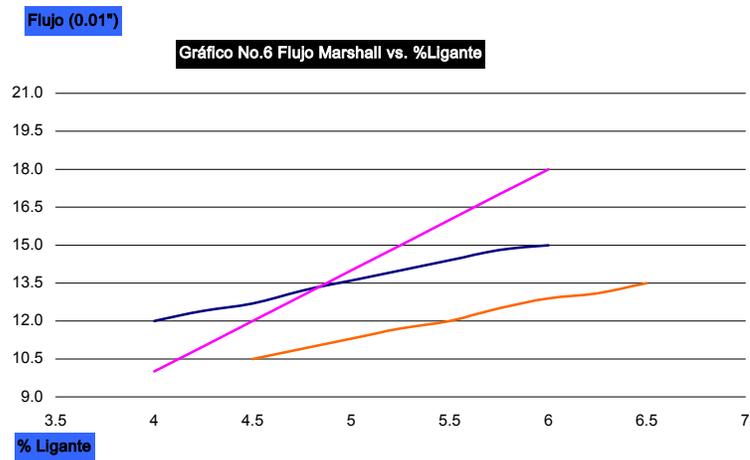
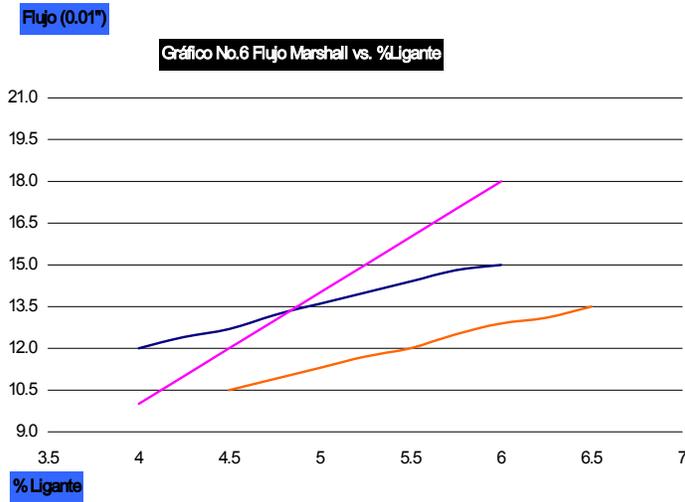
1.7.2 Diseño Marshall (Norma: INV E-748 (ASTMD 1559-89)). Partiendo del análisis reológico de los tres ligantes, se determinan las condiciones de preparación de las mezclas asfálticas que finalmente se fabricaran en la obra. Las temperaturas de preparación en la vía y de compactación en el laboratorio, de las mezclas asfálticas se muestran en la tabla 2 y en las graficas 3, 4, 5 y 6 se representan las propiedades mecánicas calculadas y medidas que permiten evaluar y clasificar las mezclas con ligante original, aditivo A y aditivo B, según las especificaciones Marshall para transito, tales como, contenido de vacíos en la mezcla (%), densidad, estabilidad, flujo y vacíos en el agregado mineral (%).

Tabla 2. Temperaturas de fabricación y colocación de las mezclas asf

Tabla No.2 Temperaturas de Fabricación y Colocación de las mezclas Asfálticas				
Nombre	Temperatura °C			
	Mezclado	Compactación	Agregados	Asfalto
Asfalto SIN Aditivo	145	136	166	145
Asfalto CON Aditivo A	145	135	165	145
Asfalto CON Aditivo B	164	154	184	164

— Original
 — Con Aditivo A





De acuerdo con el criterio de diseño (vacíos en la mezcla = 4%), los contenidos óptimos de ligante y las propiedades mecánicas y volumétricas, se presentan en la tabla 3. Con base en estos resultados, se determina que

las mezclas fabricadas con los tres asfaltos, cumplen las especificaciones para trafico alto.

Tabla 3. Diseño de las mezclas asfálticas Método Marshall.

Tabla No.3 Diseño de las mezclas Asfálticas Método Marshall					
Asfalto	Contenido Optimo	Estabilidad (Kg)	Flujo (mm)	% V.M.A	Densidad (gr/cm ³)
SIN Aditivo	6.3%	977.03	3.35	19.9	2.293
CON Aditivo A	4.8%	1030.56	3.43	14.9	2.396
CON Aditivo B	5.3%	1397.06	3.30	16.8	2.354

1.7.3 Módulos Dinámicos (Norma: INV E-754 (ASTM D4123)). Por medio de esta prueba se determina el módulo dinámico por tracción indirecta de una probeta tipo Marshall. El valor del modulo, representa el grado de rigidez de la mezcla y es útil para el diseño de espesores de las capas superficiales. La frecuencia de aplicación de carga con la cual se realizó la prueba es 5 Hz.

La grafica 7 representa el comportamiento de los módulos de rigidez de las mezclas asfálticas en el rango de temperaturas de servicio. Se observa, que a iguales temperaturas, los módulos de rigidez aumentan su valor, siendo los más bajos los correspondientes a las mezclas con asfalto original y los mas elevados, los módulos de las mezclas con aditivo B. Las mezclas fabricadas con aditivo A poseen un valor intermedio de rigidez respecto al original y al mejorado con aditivo B. Así, es posible afirmar que los AMA, modifican sustancialmente la rigidez de las mezclas asfálticas que los contienen, incrementando la componente elástica, y consecuentemente los módulos

dinámicos, en todo el rango de temperaturas evaluado. Se destaca, que las mezclas asfálticas que contienen aditivo B, presentan un incremento bastante elevado de los módulos, no sólo con respecto a las mezclas asfálticas con asfalto sin aditivo, sino que sobrepasan significativamente la rigidez ofrecida por las que contienen aditivo A, sobre todo a 25°C, temperatura en la cual, el conjunto se comporta como un material viscoelástico.

1.7.4 Resistencia a la Deformación Permanente. Mediante esta prueba se evalúa la posible falla por ahuellamiento de una mezcla asfáltica. Este tipo de falla se produce por la acumulación de la deformación no recuperable en un pavimento en servicio, producida por las cargas que le imprime el tránsito. La carga aplicada en el ensayo es constante durante el tiempo de aplicación (10 ms). Las condiciones del ensayo de carga axial repetida son: Temperatura: 40°C, carga axial: 100 kPa y número de ciclos de carga: 3600.

Tomando como base la granulometría, los áridos, el ligante y las condiciones de fabricación en los tres diseños son iguales, es posible interpretar, que las mejoras obtenidas en los ensayos de carga axial repetida, son introducidas por los aditivos, provocando de alguna manera que la resistencia a los esfuerzos de corte en el asfalto con aditivo se incremente. En la tabla 4 se muestran los resultados de la deformación acumulada promedio para cada una de las mezclas asfálticas ensayadas.

Tabla 4. Deformación permanente de las mezclas Asfálticas

Tabla No.4 Deformación permanente de las mezclas Asfálticas	
Nombre	% Deformación acumulada promedio
Asfalto SIN Aditivo	1.046
Asfalto CON Aditivo A	0.851
Asfalto CON Aditivo B	0.824

La estabilidad de las mezclas asfálticas que contienen los aditivos, mejoró significativamente respecto a la que no contiene aditivo, sin embargo, se hace énfasis que a iguales ciclos de carga, la deformación gradual de las mezclas con aditivo B, es menor, fenómeno que se refleja en el valor final de deformación acumulada, obtenido después de los 3600 pulsos de carga. Los resultados de las pruebas reflejan que las mezclas elaboradas con asfalto conteniendo aditivos A y B, probablemente no presentarán problemas de ahuellamiento, según las especificaciones dadas por la Universidad de Nottingham (deformación admisible < de 1,000%). En la grafica 8 se representa la respuesta al ahuellamiento, en términos de la deformación permanente acumulada en función del número de repeticiones de carga.

1.7.5 Resistencia a la Fatiga. Las pruebas se realizaron a 100 kPa de esfuerzo horizontal y 2.5 Hz de frecuencia de aplicación de carga. Los resultados obtenidos para cada una de las muestras analizadas son reportados en la tabla 5.

Tabla 5. Resistencia a la fatiga de las mezclas Asfálticas a 25°C

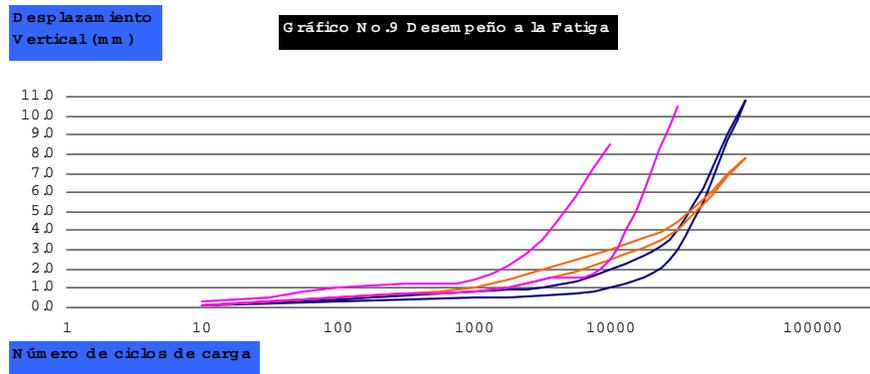
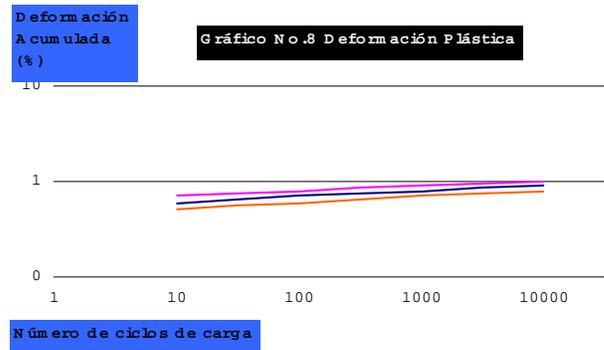
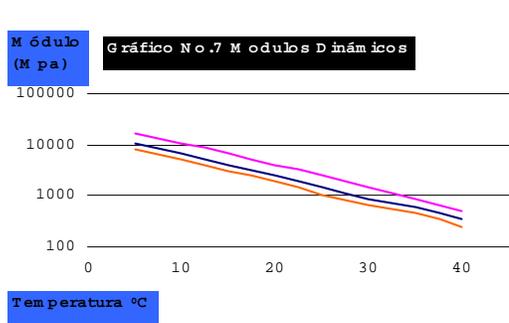
Tabla No.5 Resistencia a la fatiga de las mezclas Asfálticas a 25°C		
Nombre	Muestra	No. De Repeticiones de Carga
Asfalto SIN Aditivo	1	56334
	2	58326
Asfalto CON Aditivo A	1	16937
	2	10717
Asfalto CON Aditivo B	1	38690
	2	42958

La grafica 9, representa la evolución de la deformación vertical hasta la falla de las muestras. Según los resultados obtenidos, se observa que la mezcla asfáltica de mejor desempeño a la fatiga es la fabricada con asfalto sin aditivo, situación atribuible quizá, a un exceso de rigidez introducido por los AMA. Sin embargo, se aprecia que a un mismo número de ciclos de carga las mezclas asfálticas con aditivo B, se deforman menos que con aditivo A, situación justificable por la presencia de un mayor módulo. Además, la evolución de la deformación que produce la falla de rotura, es mayor en las mezclas asfálticas con asfalto sin aditivo, a pesar que él numero de repeticiones de carga que finalmente soporta antes de ella, es mayor que en las que contienen AMA, fenómeno representado por la disipación de energía a través de deformación. Este análisis, finalmente lleva a concluir que la mezcla asfáltica con aditivo B, conduce a un asfalto modificado en su estructura, tal que su utilización provoca mejoras en el desempeño mecánico de mezclas asfálticas. Es posible pensar que el asfalto haya sido modificado

en su estructura por el aditivo B, ya que sólo la modificación conduce a mezclas asfálticas de alto modulo y mejor desempeño a la fatiga y al corte.

1.7.6 Durabilidad. La evaluación de la durabilidad frecuentemente involucra pruebas “antes y después”, donde el material está sometido a un acondicionamiento, que está diseñado para acelerar los cambios en las propiedades fundamentales, producidos por efectos de temperatura extrema y oxidación. La prueba que se utiliza para evaluar estos cambios es el ensayo de módulos dinámicos. El efecto de envejecimiento del ligante puede ser evaluado analizando muestras, que involucren acondicionamiento de las mezclas sueltas o especímenes compactados a una temperatura elevada, por un período de acelerar el proceso de envejecimiento.

En la gráfica 10 se muestra el comportamiento del bitúmen envejecido reflejado en la rigidización de las mezclas asfálticas, al término del ensayo en el laboratorio. Se observa que las mezclas asfálticas que contienen AMA aumentan considerablemente su componente elástica, reflejado en el incremento de sus rigideces evaluadas a 25 y 40°C y en menor grado las que contienen asfalto sin aditivo. A 40°C las mezclas asfálticas con Aditivo B aumentan significativamente los módulos y consecuentemente la rigidización del asfalto es más severa. Incrementos menores muestran las fabricadas con Aditivo A y sin aditivo. Sin embargo, se aprecia que a 25°C los módulos de rigidez de las tres mezclas muestran un aumento considerable, siendo mayores los de las mezclas asfálticas que contienen AMA. (N = Nuevo, E = Envejecido).



1.7.7 Determinación de la Susceptibilidad a la Humedad (TSR) (Norma: AASHTO T 283). En mezclas asfálticas, la adherencia se define como la capacidad de un ligante asfáltico, de permanecer fijo al agregado, el cual debe quedar completamente recubierto con el fin de evitar desplazamientos, por efectos del tráfico, humedad y temperaturas extremas. Con el ensayo de TSR es posible evaluar la incidencia de los dos aditivos en la adherencia del asfalto con el agregado, es decir, cómo la adhesividad entre el asfalto y los agregados de Pescadero, se ve afectada por los cambios de humedad, empleando los dos aditivos. La gráfica 11, registra el comportamiento de los resultados de la prueba TSR de las mezclas asfálticas fabricadas con asfalto sin y con aditivo en condiciones de saturación con el tiempo. Los tiempos de

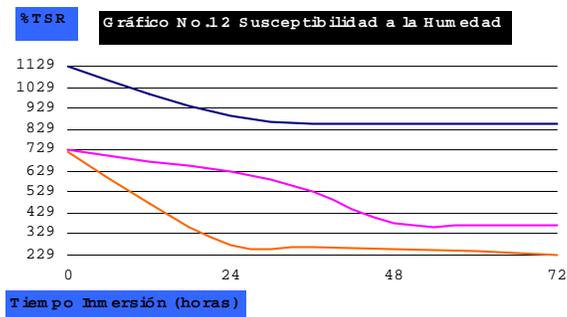
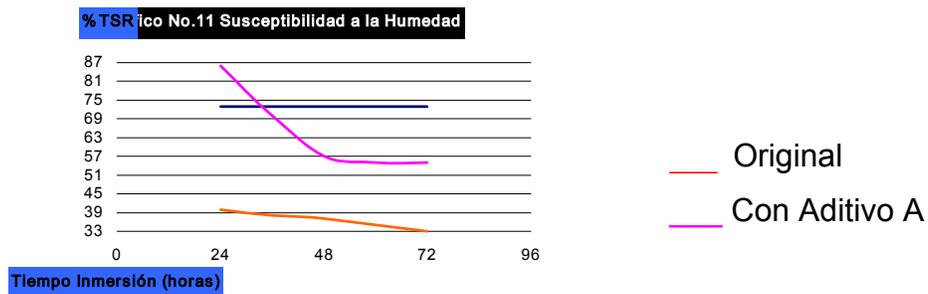
inmersión en el baño de agua (acondicionamiento), fueron variados de 0 a 72 cada 24 horas, con el fin de determinar la velocidad de decremento de la propiedad en cuestión, y evaluar la preservación de los efectos de los dos aditivos en las mezclas con el tiempo.

Como se puede observar en la grafica 11, la mezcla con aditivo B, mantiene buenas propiedades de adherencia con el tiempo. Las mezclas con aditivo A, muestran un buen valor de adherencia representado en el porcentaje de TSR obtenido a las 24 horas, sin embargo, pasadas las 48 horas, reduce esta propiedad hasta 37.50% valor alrededor del cual se mantiene hasta las 72 horas. En este contexto, ambos aditivos reflejan ser buenos mejoradores de adherencia, destacando las buenas propiedades que el aditivo B le introduce a las mezclas asfálticas, aumentando y manteniendo la durabilidad por humedad.

Se efectuó un ensayo de repetibilidad del TSR para las mezclas asfálticas con aditivo B, debido a la diferencia entre los resultados obtenidos en la dosificación y en la evaluación. Se infiere que esta diferencia es debida al tipo de finos utilizados para la evaluación del aditivo, ya que estos se habían cambiado. Nótese que a pesar de que la fuente de agregados es la misma (Pescadero), este pequeño cambio introdujo en la mezcla un comportamiento desfavorable. Teniendo el cuidado de utilizar agregados limpios similares a los de la dosificación inicial, finalmente, la prueba arrojó resultados bastante satisfactorios (TSR = 100%).

Similarmente, se muestra la variación de la resistencia a la tracción indirecta de las tres mezclas asfálticas, con el fin de observar gradualmente la pérdida de resistencia debida a la humedad y reproducir una idea de los daños causados por ella en la obra. En la grafica 12 se representan los esfuerzos de tensión seca y húmeda a las 24, 48 y 72 horas y se observa, que la mayor

pérdida de adherencia se produce las primeras 24 horas, período al cabo del cual esta propiedad tiende a mantenerse estable. Según estos resultados, los mayores daños por humedad de las muestras compactadas en el laboratorio se producen las primeras 24 horas, instante en el cual la relación entre las tensiones secas y húmedas de la mezcla debe superar el 80% es decir, que la mezcla asfáltica debe mantener el 80% de la adhesividad original. Se destaca el comportamiento de las mezclas asfálticas con aditivo A, ya que son ellas las que muestran mayor resistencia al ataque de la humedad las primeras 24 horas, sin embargo, al cabo de las 48 y 72 horas, disminuyen significativamente su adhesividad. Estos valores, pueden inferir que el aditivo A, es un AMA que proporciona poca durabilidad, debido a los continuos enfrentamientos del agua con la mezcla durante su vida útil.



2. FORMULACIÓN DE SOLUCIONES ESTRUCTURALES EN UN PAVIMENTO.

2.1 INTRODUCCIÓN

Los costos de las operaciones de transporte suman miles de millones de pesos; el monto global puede verse seriamente afectado por las características geométricas y el estado de los caminos. A este respecto estudios especializados en Colombia indican que los costos de operación del transporte se multiplican tres o cuatro veces cuando la vía se encuentra en mas estado y así mismo, afirman que el no hacer mantenimiento oportuno de las carreteras conllevan a atender posteriormente su rehabilitación o su reconstrucción, lo cual implica según los mismos estudios, tener que invertir tres o cuatro veces mas para acondicionar la vía hasta el estado requerido para el buen funcionamiento; es decir que los sobrecostos para la Nación suman entre seis y ocho veces mas por cuenta del mantenimiento deficiente y poco oportuno de la red de carreteras. (Presidencia, 1997).

Sin embargo vale la pena destacar que se trata de sobrecostos evitables realmente y que lo que puede u debe lograr es consolidar un buen sistema para el mantenimiento vial. Llevarlo a cabo significa, desde el punto de vista económico, una gran inversión; no hacerlo, significa desidia y sobre todo irresponsabilidad gubernamental para con la sociedad.

Este documento formula una metodología de trabajo en un proyecto de rehabilitación que permita diseñar un pavimento flexible con la menor incertidumbre posible. Esto conlleva a que los pasos a seguir en un diseño

estén claramente definidos y que quien los aplique conozca de una forma muy objetiva las debilidades y fortalezas del pavimento a rehabilitar.

La metodología se apoya en un programa de computador para agilizar el cálculo del valor del Pavement Condition Index (PCI) (Shahin, Walter, 1994) y definir la sectorización de la vía en estudio en términos de deterioro superficial de la calzada en una vía en rehabilitación para así, llegar a sectores no menores de un kilómetro en donde se formulará una alternativa de solución que se podrá en un momento dado descartar o tomar.

Las soluciones que se propone no son integrales debido a que solo se tienen en cuenta los efectos de fatiga sobre la estructura a causa de una carga dinámica causada por los vehículos comerciales. Por esto, se debe tener presente que una solución integral tendrá necesariamente que contemplar el análisis de otros aspectos como drenaje superficial y subsuperficial.

2.2. FACTOR DE EQUIVALENCIA DE CARGA POR EJE AASHTO (Asociación americana de Transporte y carreteras Estatales de los EE.UU.).

Para establecer el deterioro de las capas asfálticas es necesario definir con certeza el número de ejes equivalentes que las mismas soportan para posteriormente llegar a un diseño de espesores de las capas, sin olvidar obviamente el resto de variables que influyen en el cálculo. Aquí se hará referencia solamente al factor de equivalencia de carga por eje debido al incremento indiscriminado y no controlado de las cargas que circulan en las vías, el cual ha originado un daño prematuro en los pavimentos.

En una primera fase de investigación, se pretende evaluar el exponente n utilizando en la formulación de la AASHTO para determinar los factores de equivalencia de carga por eje FECE-, bien sea simple, tandem o tridem, que actualmente es muy utilizado en Colombia (Murgueitio V., Benavides C. A., Solano E., 1996).

$$(1)FECE = (P_1 / P_0)^n$$

Donde:

FECE: Factor de equivalencia de carga por eje.

P_1 : Carga aplicada.

P_0 : Carga de referencia.

n : Exponente, generalmente constante.

Esta fase se desarrolló en dos vías administradas por el sistema de concesión (El cortijo Siberia La Punta el Vino y la Calera Guasca) de gran importancia a nivel nacional, en las cuales se presenta un gran volumen de vehículos comerciales y además, como resultado de anteriores estudios, se puede afirmar que es una muestra significativa del sector transportador terrestre en Colombia, teniendo en cuenta que la primera de ellas comunica a Santa Fe de Bogotá con la Costa Atlántica (Díaz y Medina, 1999).

En la determinación de los factores de equivalencia de carga por eje el trabajo se fundamentó en la metodología propuesta por Iserrato Michele, Farraggi Víctor y Gaete Rodrigo en el Sexto Congreso Iberoamericana del Asfalto, en donde se utilizaron diferentes leyes de fatiga como la CRR _ Bélgica, SHELL, NOTT, Pell Brown y Hudson (Díaz y Medina, 1998), llegando a las siguientes conclusiones:

- ❖ En las cargas medidas en jornadas de 10 horas en cada una de las vías estudiadas se presentaban sobrepesos en porcentajes que oscilan entre el 20% y 30%.
- ❖ Las presiones de inflado tomadas en vía se encontraban más altas a las que considera la AASHTO y el método Shell.
- ❖ Se presenta gran heterogeneidad en los resultados aplicando las diferentes leyes de fatiga, es decir, no se presentó convergencia en los resultados y debido a esto, fue necesario realizar un análisis estadístico severo de los resultados.
- ❖ Los valores que se obtuvieron de n se encontraban en un intervalo entre 4.5 y 5 aproximadamente para los vehículos comerciales evaluados.

Debido a lo anterior, es necesario reflexionar sobre los valores de n que se deben utilizar en el diseño, puesto que, según los resultados obtenidos en el pasado, se debe prestar mucha atención a esta variable y no utilizar como un valor estándar para las características existentes en cada proyecto, que no son necesariamente las mismas siempre. La utilización de valores erróneos de n así como el poco control al sector transportador generará deterioros prematuros independientemente de la solución que se formule en un sector dado.

2.3. METODOLOGÍA EMPLEADA.

Dentro de la evaluación global del pavimento con fines de reconstrucción o mejoramiento, se tienen en cuenta dos parámetros para decidir sobre el procedimiento a seguir basados en el programa MECAPAV (Muñoz, 1998), el cual está conformado por diferentes procedimientos que calculan y grafican los valores de PCI, deflexión características y deflexión modal para su posterior sectorización:

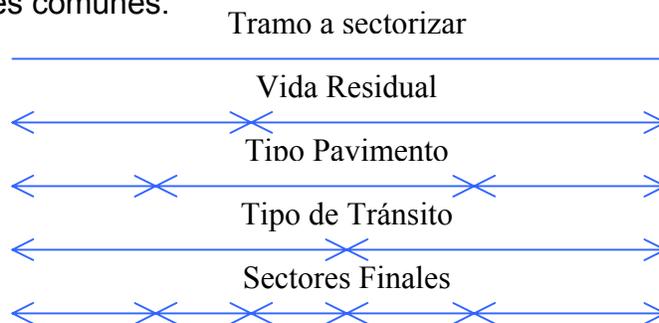
2.3.1 Evaluación visual de la calzada. Esta consiste en realizar un inventario de fallas producidas en la superficie del pavimento y el deterioro en el drenaje. En forma general, se han clasificado los daños en las siguientes categorías que pueden observarse en la superficie de los pavimentos flexibles y semirígidos: Deformación, fisuras, desprendimientos y otros daños en la calzada (exudación, pulimento, afloramiento de llenante, etc.). Los parches se involucran debido a que la existencia de estos influye en alto grado en la alternativa de solución debido a que el alto porcentaje de parcheo implica en un momento dado que se descarte la posibilidad de reciclar, puesto que la base reciclada pierde sus niveles de calidad y homogeneidad.

2.3.2 La condición estructural. Este concepto se refiere a la capacidad del pavimento para amortiguar y disipar de una forma gradual las cargas de tránsito sobre la subrasante en la actualidad. Como parámetro indicativo se utilizó el parámetro denominado Deflexión Benkelman (Muñoz, 1998), que representa la recuperación elástica, medida sobre la vertical, de la superficie del pavimento cuando deja de actuar la carga producida por una rueda doble de determinadas características. El radio de curvatura es el indicativo de la elástica y, asociado con el valor de deflexión, ofrece una idea razonablemente clara de la forma en que el paquete estructural responde a la sollicitación por cargas colocadas en la superficie.

Con estos dos parámetros se puede decidir sobre el estado global del pavimento, dado que en los casos de mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción, no es necesario darle el mismo tratamiento a toda la vía, sino que se deben identificar sectores o tramos de condiciones similares para poder determinar en cada uno, el tratamiento más apropiado según el estado actual. Antes de entrar a evaluar los parámetros mencionados anteriormente, es necesario tener cierta información preliminar sobre las

condiciones de la vía, con el fin de poder dividir la calzada en tramos que presentan cierta homogeneidad teniendo en cuenta los factores de vida residual, tipo de pavimento y nivel de tránsito. Para esto, se presenta a continuación un ejemplo de cómo podría ser la sectorización teniendo en cuenta las variables antes mencionadas.

Definición de sectores comunes.



NOTA: Estos sectores serán tramos obligados en que la vía se dividirá para su posterior caracterización.

Luego de haber determinado unos tramos en términos de los factores anteriormente anotados, se procede a determinar sectores que estarán definidos en función del estado superficial de la calzada y evaluación defletoométrica.

2.4 EVALUACIÓN VISUAL DE LA CALZADA.

Aparte de la simple identificación de los tipos de falla encontrados en la vía, estos se cuantificaran para así poder identificar el grado de deterioro de la vía y decidir el tipo de obra a realizar en los diferentes tramos de la vía, de los cuales se puede decir que son de cinco tipos:

2.4.1 Mantenimiento preventivo: Cuando el pavimento se encuentra aún en buen estado, con una superficie uniforme pero con unas fallas ocasionales y poco significativas. Es una actividad de costo fijo que se caracteriza por la colocación de parches superficiales y sello de grietas.

2.4.2 Mantenimiento correctivo: Se realiza cuando el pavimento está en buena condición pero se observan fallas localizadas e incipientes para lo cual se deberá colocar parcheo superficial y profundo.

2.4.3 Mantenimiento intensivo: Se realiza cuando el pavimento se encuentra en condiciones regular, donde se presenta circulación poco confortable, daños manifiestos y frecuentes. El pavimento se aproxima al cumplimiento de su vida útil; el tratamiento a seguir es la colocación de parches asociados a una capa asfáltica.

2.4.4 Rehabilitación: Implica un refuerzo estructural y debe realizarse cuando el pavimento se encuentra en condición deficiente, la circulación es muy incómoda y los daños se encuentran en proceso de generalización. El pavimento ha sobrepasado el periodo de vida útil asignado y deberá formularse un tratamiento intensivo en donde posiblemente se colocará una o unas capas asfálticas según el valor del PCI o posiblemente se recomiende el reciclar un espesar de estructura.

2.4.5 Reconstrucción: Se realiza cuando el pavimento se encuentra en estado muy deficiente, donde la circulación es pésima o casi imposible, los

daños se encuentran totalmente generalizados y se presentan valores bajos de PCI.

Es prioritario que el seccionamiento se haga de acuerdo con el grado de deterioro de la capa rodadura. (Manual de Auscultación Red Vial Nacional Dinámica y INVIAS, 1996). Adicionalmente, es importante tener en cuenta que las soluciones deben corresponder a los tipos de daños presentados, pero no se deben dar soluciones aisladas para cada tipo de daño. Se debe dar solución para el daño más generalizado, teniendo en cuenta que éste cubija a los otros daños y el espesor del refuerzo dependerá básicamente de la capacidad estructural del pavimento en el momento de la evaluación.

2.5 METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN VISUAL DE LA CALZADA.

Existen varias metodologías Ingeroute y Vizir (Francia), PCI (Estados Unidos), SAPCOL (Dinamarca) cada una de las cuales busca con diferentes procedimientos evaluar de una forma metódica el estado superficial de la calzada. El método del Pavement Condition Index (PCI), desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América, es un método que ha tenido gran aceptación en varias entidades alrededor del mundo por su objetividad y por los criterios cuantitativos que emplea.

El PCI (Shahin, M.Y., Walter, J:A, 1994) es un índice numérico cuyo rango va de cero, para un pavimento en pésimas condiciones, a cien, cuando éste se encuentra en perfecto estado. Para calcular dicho índice se deben tener en cuenta el tipo de falla, su severidad y su cantidad, elementos obtenidos por medio de la evaluación superficial de la calzada. La combinación de los tres factores mencionados anteriormente puede ser un poco complicada a primera vista; para superar este problema, el sistema trabaja con unos

“valores de deducción”, los cuales son un resultado de la combinación de dichos factores; estos valores de deducción son el resultado de extensas investigaciones llevadas a cabo por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército Americano, así como de las experiencias de muchos ingenieros, quienes han dedicado su vida profesional al trabajo con pavimentos, y de evaluaciones realizadas para la obtención de resultados por diferentes métodos.

Para determinar el PCI de un tramo de pavimento, el tramo debe ser dividido en secciones de inspección a las cuales se les halla el PCI para luego determinar tramos homogéneos y su correspondiente índice; en el caso de la metodología que se plantea la longitud de los tramos será de cien (100) metros.

La evaluación del estado superficial de un pavimento debe cumplir los siguientes requisitos:

- Ser objetiva, es decir, que la descripción de las fallas sea independiente del inspector que realice el inventario.
- Ser periódica; es necesario evaluar sistemáticamente el estado visual del pavimento con el fin de observar el progreso de sus fallas y poder así programar labores de mantenimiento y mejoramiento oportuno.
- Ser ordenada; El inspector debe llenar de forma ordenada y completa los formatos de evaluación, con el fin de facilitar el análisis posterior de los datos recolectados.

2.6. FORMULACIÓN DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN.

Para definir una alternativa de solución se deberá tener en cuenta, como se mencionó anteriormente, la cuantificación de los daños existentes a partir del PCI, en donde según este valor se definirán los tratamientos a seguir, los tratamientos que a continuación se mencionan son muy generales y solo tienen en cuenta las fallas superficiales:

T1: Parcheo superficial y sello de grietas.

T2: Parcheo superficial y profundo.

T3: Parcheo y base asfáltica rodadura, la base asfáltica será de gradación abierta sí dentro del inventario existente mayor porcentaje de grietas y no de fisuras.

T4: Reciclaje y base asfáltica rodadura, dependiendo del tráfico y del tipo de subrasante se recomendará base asfáltica.

T5: Reemplazo del pavimento existente.

Los rangos de valores de PCI asociados a los tratamientos ya mencionados se obtuvieron luego de aplicar la metodología en diferentes vías nacionales e internacionales de primer y segundo orden entre los años de 1996 a 1998, en donde los resultados de los diseños se presentaron tendencias, que en la mayoría de los casos coinciden con los resultados que aparecen en la siguiente tabla.

Tabla 6. Alternativas de soluciones estructurales en términos del PCI

Tabla No.6 Alternativas de soluciones estructurales en términos del PCI	
Tratamiento	PCI
T1	100 – 90
T2	90 – 70
T3	70 – 50
T4	50 – 30
T5	< 30

La tabla anterior tiene por objeto dar al consultor de vías herramientas para definir alternativas de solución para un sector dado y disminuir el subjetivismo en los diseños basados únicamente en la “experiencia”.

Los tratamientos presentados en función del PCI buscan, entre otras cosas, que posterior a la modelación de cada estructura tipo en los diferentes sectores, el diseño de espesores a los que se llegue sea consistente, puesto que un tratamiento mal enfocado en un sector dado generará sobrecostos que se podrían obviar.

3. DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA RECICLAJE DE PAVIMENTOS ENVEJECIDOS, UTILIZANDO EMULSIÓN REJUVENECEDORA.

3.1 INTRODUCCIÓN.

Se entiende como asfalto envejecido aquel que por medio de un proceso de oxidación (con el oxígeno del aire), ha perdido gran parte de sus componentes saturados y aromáticos, los cuales lo convierten en un material frágil a bajas temperaturas y rígido a temperatura ambiental. Una solución a este problema, fue diseñar una emulsión que pueda penetrar al asfalto envejecido sin necesidad de calentamiento, introduciendo los compuestos perdidos.

El reciclaje se basa en la utilización de mezclas asfálticas envejecidas, que son removidas y / o retiradas de las vías por procesos tales como: Escarificación vibratoria, perfilado en frío y parcheo tradicional [1]. Al material triturado y homogeneizado se le adiciona agua y después emulsión rejuvenecedora (E. R.).

Entre mas tiempo permanezcan los escombros en “remojo” con E. R., mejores son los resultados. La emulsión rejuvenecedora es aniónica de rompimiento lento, preparada a partir de productos nacionales y su comportamiento la convierte en un producto importante para los usuarios.

3.2. PROCEDIMIENTOS.

El material para reciclar se tritura lo más fino posible, teniendo en cuenta que el tamaño máximo sea de $\frac{1}{2}$ ", y luego se homogeniza. Se extrae el asfalto de los escombros y se determina el porcentaje de ligante, las propiedades físico-químicas, la granulometría y la gravedad específica del material mineral. Paralelamente, se determina la humedad natural del material.

La humedad de preenvuelta se determina, tomando un porcentaje constante de emulsión rejuvenecedora (2,0%), teniendo en cuenta la humedad natural del material y agregando varios porcentajes de agua (1,2,3,4,5,6,7 y 8%). Para cada porcentaje se preparan don briquetas con 75 golpes por cara, con un martillo de 10 Lb. La mezcla compactada se deja reposar 24 horas dentro del molde a temperatura ambiente, se desmoldan y se dejan dentro del horno a 60°C, hasta peso constante. Después se retiran del horno y se dejan reposar a temperatura ambiente por 24 horas. A las briquetas curadas, se les mide el espesor y luego se fallan en la prensa Marshall a 25°C. El valor máximo de la estabilidad se considera como el valor óptimo de la humedad de preenvuelta. Este método para determinar la humedad de preenvuelta es más preciso, que el modificado de la Universidad de Illinois, por el cual se determina visualmente.

Con el valor óptimo de humedad de preenvuelta se adicionan diferentes porcentajes de E. R. Y se preparan briquetas con cada uno de ellos: 0.5; 1; 2; 3 y 4%, teniendo en cuenta la cantidad de agua presente en esta emulsión, 50,8%.

Las mezclas se dejan en curado por dos (2) días, a temperatura ambiental, herméticamente tapadas. Después se compactan y se continúa con el procedimiento anterior para determinar el valor óptimo de la emulsión

rejuvenecedora, sometiendo las briquetas a compresión simple a 0°C. En este intervalo de temperatura, el asfalto presenta un comportamiento visco-elástico. Este método se comparó con la metodología del Marshall modificado de la Universidad de Illinois, donde se pudo establecer que con el aumento de la concentración de la emulsión rejuvenecedora (E. R.), disminuyen las estabilidades tanto seca como saturada y aumentan las densidades, es decir, no existe un máximo.

A las briquetas curadas se les determina el coeficiente de resistencia de estabilidad al agua (Ks), densidades y vacíos en la mezcla, propiedades mecánicas por medio de los módulos dinámicos, resistencias a la fatiga y a la deformación permanente.

Observación: Para reciclajes con Emulsión Asfáltica (E. A.) se sigue el mismo procedimiento.

3.3. RESULTADOS.

La cantidad de asfalto en la muestra de escombros de pavimento es de 6,0% y la gravedad específica del material mineral es de 2,58.

La Tabla 7 muestra los resultados del análisis granulométrico.

Como se observa en la tabla, el agregado mineral extraído de los escombros no cumple con las normas colombianas, INVIAS-96, en los tamices No. 4, No. 10y No. 40.

La Tabla 8, muestra la caracterización físico-química y la Tabla 9, los datos reológicos del asfalto extraído de los escombros con y si E. R.

Tabla 7. granulometría del material extraído de los escombros de pavimento.

TAMAÑO TAMIZ	ABERTURA TAMIZ, mm	% QUE PASA	% RETENIDO	% QUE PASA INVIAS - 96	% QUE PASA ASPHALT INSTITUTE	% RETENIDO IDEAL INVIAS - 96
¾"	1.90	100.00	-	100	100	-
½"	12.50	99.24	0.76	80 – 100	90 – 100	10.00
No. 4	4.75	80.19	19.05	51 – 68	44 – 74	30.00
No. 10	2.00	58.90	21.29	38 – 52	27 – 56	15.00
No. 40	0.42	30.73	28.17	17 – 28	9 – 28	22.00
No. 80	0.18	15.27	15.46	8 – 17	4 – 18	10.00
No. 200	0.075	7.31	7.96	4 – 8	2 – 10	7.00
FONDO	Menor 0.075	0.00	7.31	-	-	6.00

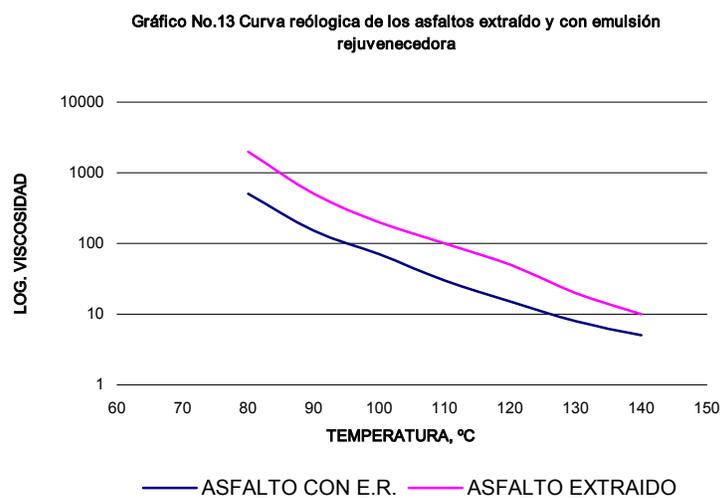
Tabla 8. Parámetros de caracterización del asfalto envejecido y modificado con emulsión rejuvenecedora.

PROPIEDADES	ASFALTO EXTRAÍDO	ASFALTO CON E.R.
Penetración a 5 °C (0.1 mm)	0.33	11.10
Penetración a 25 °C (0.1 mm)	12.50	43.00
Penetración a 40 °C (0.1 mm)	45.23	185
Índice de penetración, IP	-2.60	0.92
Punto de ablandamiento °C	62.30	47.70
Ductilidad a 25 °C, cm	7.00	> 150
Temperatura de agrietamiento, °C	4.73	-20.60
Gravedad especifica	1.01523	1.03592
% de saturados	10.5806	12.9013
% de aromáticos	20.2975	36.1400
% de resinas	51.5903	34.7685
% de asfáltenos	15.5456	16.1902
Índice coloidal, IC	0.3634	0.4103

De los datos anteriores se concluye que la presencia de la E. R., incluye positivamente en las propiedades del asfalto extraído, observándose un rejuvenecimiento de este asfalto envejecido.

Tabla 9. Datos de la curva reológica del asfalto original y con emulsión rejuvenecedora.

TEMPERATURA, °C	VISCOSIDAD (P) ASFALTO EXTRAÍDO	VISCOSIDAD (P) ASFALTO CON E.R.
80.00	1907.50	293.75
90.00	585.00	103.75
99.90	202.81	42.81
120.00	36.25	10.05
130.00	17.80	5.46
135.00	12.73	4.09
140.00	9.32	3.13



En la gráfica anterior se observa una disminución apreciable de la viscosidad con la adición del agente rejuvenecedor, presente en la emulsión.

La Tabla 10, muestra los valores de estabilidad Marshall con diferentes porcentajes de agua, tanto con emulsión asfáltica (E. A.) como rejuvenecedora (E. R.).

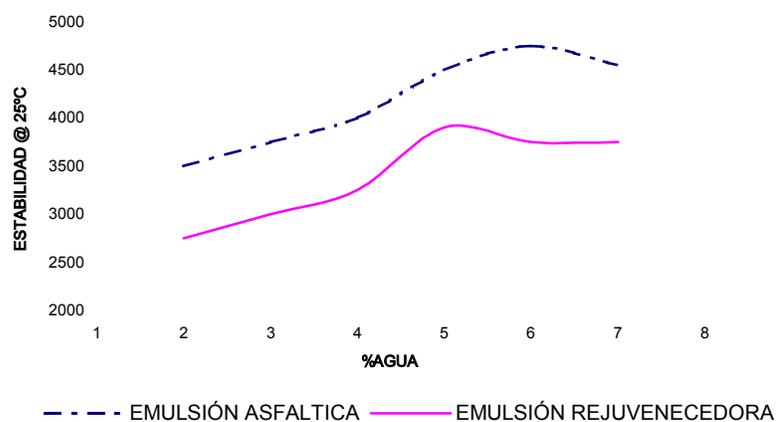
Tabla 10. Determinación de la humedad óptima de preenvuelta.

% DE AGUA	ESTABILIDAD E.A. @ 25 °C, Lb	ESTABILIDAD E.R. @ 25 °C, Lb
2	3505	2652
4	3911	3250
5	4502	3478
6	4894	3261
7	4694	3235

En la Tabla 10 se observa que el porcentaje óptimo de humedad de preenvuelta es el 5% para los escombros reciclados con E. R. Y 6% para los escombros con E. A.

También se observa que los valores de las estabilidades con E. A. Son mayores que con E. R.

Gráfico No.14 Porcentaje óptimo de humedad de preenvuelta

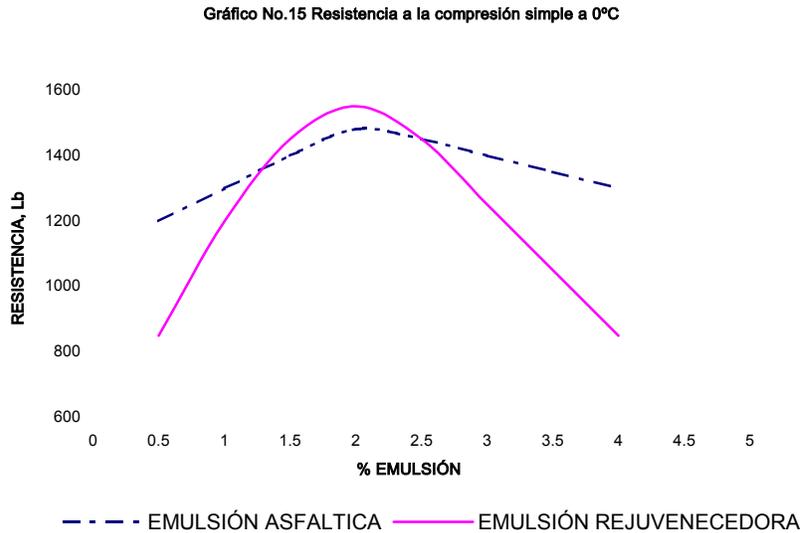


En la tabla 11, se presentan los resultados de compresión simple a 0°C, tanto de los escombros reciclados con E. R. Como con E. A.

Tabla 11. resultados de las pruebas de compresión simple a 0°C.

% DE EMULSIÓN	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CON E.A.,Lb	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CON E.R., Lb
1.0	1250.0	1165.0
1.5	-	1345.0
2.0	1380.0	1440.0
2.5	1410.0	1525.0
3.0	1470.0	1312.50
3.5	1390.0	-
4.0	1350.0	945.0

De los datos anteriores se concluye que el porcentaje de E. R. Es de 2,5% y de E. A. E de 3,0%.



Con el fin de mejorar la adsorción entre el asfalto envejecido y la emulsión rejuvenecedora, a la mezcla se le adicionó un compuesto activo (S. A.), la cantidad óptima de este compuesto se halló también por el método de compresión simple. La E. R. Con este compuesto se llamó E. R. – II y los resultados de las pruebas físico-mecánicas se compararon con los escombros reciclados con E. A. Y E. R., utilizando el mismo curado implementado en esta metodología.

Tabla 12. Pruebas físico-químicas de las mezclas de escombros reciclados con E. A y E. R.

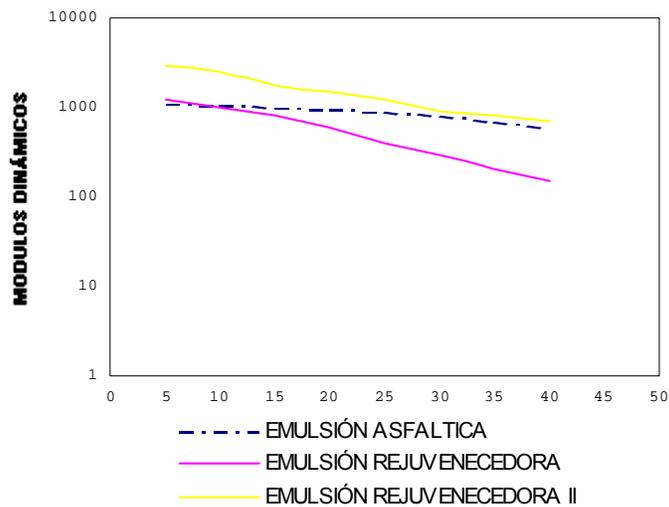
EMULSIÓN	BASE SECA			BASE SATURADA			Ks
	E. a 25 °C, Lb	FLUJO 1/100 pulg	DENSIDAD RELATIVA	% VACÍOS	E. a 25 °C, Lb	FLUJO 1/100 pulg	
E.A.	4186	26	1.83	27.00	2959.00	16	0.70
E.R.	3192	20	1.95	17.66	1922.00	12	0.60
E.R.-II	3222.60	14	1.98	15.97	2449.40	13	0.76

En la Tabla 12 se observa que, las estabilidades cumplen con las especificaciones para mezcla asfáltica densa en frío, mayores de 750 Lb., mientras que los flujos, en la base seca de las mezclas recicladas con E. A y E. R., y los vacíos de estas tres mezclas, no cumplen con las especificaciones, los flujos deben estar entre 8 y 18 centésimas de pulgada y los vacíos entre 3 y 8%.

Tabla 13. Módulos dinámicos de los escombros reciclados con los diferentes tipos de emulsión.

EMULSION	RISE TIME, miliseg	MÓDULOS DINÁMICOS, MPa			ERROR RELATIVO, %
		5 °C	25 °C	40 °C	
E. A.	99.34	1437.00	700.75	177.25	6.23
E. R.	102.23	1556.50	247.00	85.40	4.76
E. R. - II	99.05	3360.70	837.40	193.50	6.80

Gráfico No.16 Módulos dinámicos de las mezclas de escombros con diferentes tipos de emulsión



Los módulos dinámicos de los pavimentos reciclados con E. A., E. R., E. R. – II respectivamente, no son típicos de pavimentos para capa de rodadura. Además, se observa que los módulos dinámicos de las muestras con E. R son más susceptibles a la temperatura. Los anteriores comportamientos se

deben posiblemente a la falta de curado de las mezclas o a un ajusté de la granulometría.

Tabla 14. Deformación permanente de los escombros reciclados, a 40°C.

EMULSIÓN	STRESS,	No	DEFORMACIÓN	ERROR
N	kPa	PULSE	AXIAL, %	RELATIVO, %
E. A.	100	2795	7.15	3.21
E. R.	100	1002	6.65	3.75
E. R. - II	100	3600	2.35	4.60

Los pavimentos reciclados con E. A., E. R y E. R – II tienen baja resistencia a la deformación permanente, pues según las especificaciones de la Universidad de Nottingham la deformación axial relativa debe ser menor de 1%. Sin embargo, se observa que el material reciclado con E. R – II se acerca más a las especificaciones y por ende presenta mayor resistencia a la deformación permanente.

Con el fin de determinar la rigidez de las mezclas recicladas con los diferentes tipos de emulsión, se prepararon briquetas tipo Marshall y se probaron en una prensa de carga @25°C. los resultados del ensayo fueron los siguientes:

Tabla 15. Resultados de la prueba de esfuerzos vs. deformación.

3 % E. A.		2.5 % E. R.		2.5 % E. R. y S. A.	
CARGA	DEFOR.	CARGA	DEFOR.	CARGA	DEFOR.
Lbs	pulg	lbs	pulg	lbs	Pulg
0	0.0	0	0.0	0	0.0
560	0.6	280	0.5	224	1.2
1120	1.0	560	1.0	448	2.0
1680	1.5	840	1.2	672	2.8
2240	1.8	1120	1.6	896	3.3
2800	2.0	1400	2.0	1120	4.0
3360	2.3	1680	2.6	1344	4.5
3920	2.8	1960	3.1	1568	5.1
4480	3.1	2240	3.7	1792	5.7
5040	3.6	2520	4.4	2016	6.3
5600	4.4	2800	5.0	2240	6.9
6160	5.4	3080	5.9	2464	7.3
6720	8.9	3360	6.6	2688	7.9
6798	12.8	3640	7.6	2912	8.5
6720	13.8	3920	8.7	3136	9.1
6608	14.8	4200	10.3	3360	9.8
6216	19.7	4480	12.8	3584	10.4
		4536	14.8	3808	11.0
		4480	18.0	4032	12.2
		4312	19.7	4256	13.2
		4060	22.1	4480	14.8
		3724	24.6	4592	15.7
		3444	27.1	4704	17.7
		3108	29.5	4726	18.9
		2856	32.0	4704	19.7
				4614	21.7
				4458	23.6
				4234	25.6

Al analizar los resultados de la Tabla 15 y la gráfica 17 se observa que las briquetas recicladas con E. A son más rígidas con respecto a las briquetas recicladas con E. R y E. R – II, pues tienen una mayor pendiente y menor deformación. Además, estas briquetas fallaron en menor tiempo, debido a su rigidez.

Continuando con la investigación sobre reciclaje en frío con E. R., el material de escombros triturado en planta se le ajustó la granulometría adicionando 7% (en peso) de material triturado de Pescadero de ½” y 13% de No. 4, de la misma procedencia.

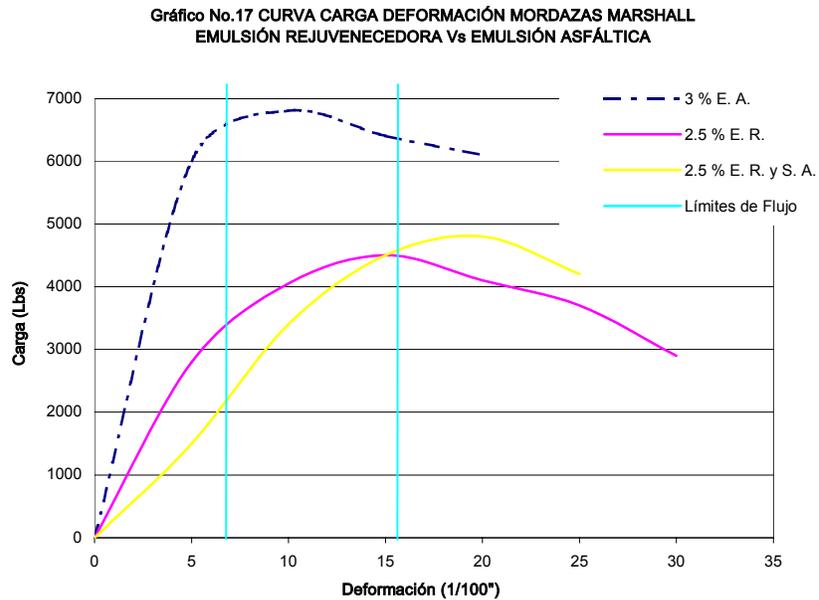


Tabla 16. Granulometría ajustada del material escombros de pavimento.

TAMAÑO TAMIZ	ABERTURA TAMIZ, mm	% QUE PASA	% RETENIDO	% QUE PASA INVIAS - 96	% QUE PASA ASPHALT INSTITUTE	5 RETENIDO IDEAL INVIAS - 96
¾"	1.90	100.00	-	100	100	-
½"	12.5	93.53	6.47	80 – 100	90 – 100	10.00
No. 4	4.75	66.82	26.71	51 – 68	44 – 74	30.00
No. 10	2.00	49.40	17.42	38 – 52	27 – 56	15.00
No. 40	0.42	25.92	23.48	17 – 28	9 – 28	22.00
No. 80	0.18	13.04	12.88	8 – 17	4 – 18	10.00
No. 200	0.075	6.41	6.63	4 – 8	2 – 10	7.00
FONDO	Menor	0.00	6.41	-	-	6.00

Al finalizar la Tabla 16 se observa que el material cumple con la granulometría INVIAS- 96 para capa de rodadura.

Con la granulometría ajustada se determinó la humedad óptima de preenvuelta, los porcentajes óptimos de E. R y sustancia activa. Se estableció que la humedad de preenvuelta es igual a 5%, la cantidad de E. R corresponde a 2,75% y el porcentaje de sustancia activa es igual a 0,0025%.

Con los datos anteriores se prepararon briquetas, en el compactador giratorio, con el fin de determinar la influencia de la granulometría en la estabilidad remanente y la deformación permanente.

Tabla 17. Pruebas físico-mecánicas de las mezclas de escombros con ajuste de la granulometría y E. R más S. A.

EMULSIÓN	BASE SECA				BASE SATURADA		Ks
	E. a 25 °C, Lb	FLUJO 1/100 pulg	DENSIDAD RELATIVA	% VACÍOS	E. a 25 °C, Lb	FLUJO 1/100 pulg	
E. R. y S. A.	4580	19	2.215	7.70	3478	16.5	0.76

Se observa que el valor de la estabilidad remanente es igual al valor sin ajuste de la granulometría, pero los valores de estabilidad tanto seca como saturada, son mayores en las muestras con ajuste de granulometría. Los vacíos disminuyen notablemente, cumpliendo con las especificaciones.

Tabla 18. Deformación permanente de los escombros con granulometría ajustada a 40°C.

EMULSIÓN	STRESS, kPa	No. PULSE	DEFORMACIÓN AXIAL, %
E. R. y S. A.	100	3600	0.92

En la Tabla 18 se observa que los escombros con granulometría ajustada a la norma INVIAS – 96 para capa de rodadura, cumplen con las

especificaciones de la prueba de resistencia a la deformación permanente o ahuellamiento de la Universidad Nottingham.

Para comparar el impacto ambiental [4] que puedan causar las mezclas recicladas con E. R por arrastre de hidrocarburos bajo la acción del agua, las briquetas compactadas se sometieron a inmersión por 15 días en agua a 25°C. se tomo una muestra de agua después de este período de tiempo, y se le determinó la presencia de hidrocarburos saturados y aromáticos por medio de cromatografía de gases, métodos SW846 8000/8020 Y 3510. la muestra de agua no presenta contaminación alguna por compuesto orgánicos.

4. LA CONSIDERACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LOS PELIGROS NATURALES EN LA EVALUACIÓN DE PROYECTOS VIALES.

4.1 INTRODUCCIÓN

En 1976 la organización de Estados Americanos (OEA) inicio el desarrollo de temas vinculados con la consideración del impacto de los desastres naturales en las economías de los países miembros. Detectó que por una falta de prevención, a considerar en las etapas de formulación, evaluación e implementación de los proyectos, las pérdidas sufridas por estos desastres superaban largamente los 54 billones de dólares (OEA.1972).

La falta de una adecuada percepción de la necesidad de reducción o mitigación de estas pérdidas obedece a factores diversos: subvaloración de los costos reales, presiones políticas y financieras, suposición de intervención de agencias internacionales como un medio de ayuda en el caso de ocurrencia del fenómeno, etc.

La conclusión es que, no obstante las claras ventajas económicas y humanitarias de la prevención, el socorro y las medidas de reconstrucción son las que, típicamente, gozan de atracción política y de apoyo económico. Las naciones donantes ofrecen rápidamente equipos sofisticados y personal altamente entrenado para las misiones de búsqueda y rescate. Los esfuerzos a corto plazo para la recuperación del desastre y prevención, particularmente dada la cobertura que recibe la fase de socorro del desastre por los medios de comunicación. No es sorprendente, por lo tanto, encontrar que de todos los fondos invertidos en el manejo de peligros naturales en la región, más del 90% está destinado a salvar vidas durante el desastre y a reponer la

inversión perdida; menos del 10% va a la prevención antes de que ocurra el desastre.

Desde que la OEA percibió esta situación, se ha implementado un programa dirigido a concienciar a los técnicos y a quienes toman decisiones políticas, de los beneficios que se obtendrían en la consideración de estas variables en la evaluación de los proyectos.

Esta presentación hace referencia a conceptos generales vinculados con el análisis de la vulnerabilidad de sistemas viales frente a peligros naturales. Al mismo tiempo presenta esquemas metodológicos de aplicación, tanto en la identificación del perfil de vulnerabilidad, como en los aspectos vinculados con su empleo en la evaluación económica de proyectos viales.

4.2 MARCO DE REFERENCIA.

Resulta conveniente para el desarrollo de los contenidos iniciar esta presentación a través de la definición de algunos conceptos, a modo de marco de referencia general.

Una definición generalmente aceptada, es aquella atribuida a Burton (1978) y adoptada por la Organización de los Estados Americanos en sus publicaciones, que dice que los peligros naturales son “aquellos elementos del medio ambiente físico, o del entorno físico, perjudiciales al hombre y causados por fuerzas ajenas a él”. Más específicamente se refiere a fenómenos atmosféricos, hidrológicos u originados por el fuego que, por razón del lugar en el que ocurren, su severidad y su frecuencia, pueden afectar de manera adversa a los seres humanos, sus estructuras o sus actividades.

Este concepto resulta diferenciado del fenómeno o evento natural, en el cual las acciones naturales se manifiestan sin ocasionar daños sobre estructuras o construcciones.

A partir del concepto de vulnerabilidad se desprende el de evaluación de vulnerabilidad como la estimación de pérdidas o daños que pueden ser causados por un evento natural de cierta severidad, incluyendo daños a la construcción, daños personales e interrupción de las actividades económicas, y en el funcionamiento normal de las comunidades.

Asociada a la evaluación de vulnerabilidad se puede mencionar la evaluación de riesgo como una estimación de la probabilidad de que se produzcan las pérdidas esperadas, dado un evento natural determinado.

La aplicación de estos conceptos pone de manifiesto la necesidad de consideración de trabajos o propuestas de mitigación de los daños causados por los diversos eventos naturales que pueden actuar sobre la estructura principal. De esta forma todo evento o fenómeno natural que actúe sobre un bien, se transforma, o puede hacerlo en algún momento, en peligro natural. Si este evento o fenómeno natural ocurre sobre un bien no vulnerable o su grado de vulnerabilidad está reducido por la acción de la prevención / mitigación, ese evento no modifica la situación preexistente.

Tomando como referencia las propuestas de evaluación realizadas por ABRIL (1996) se puede interpretar que un fenómeno natural en función de la magnitud con la cual se presente y de los bienes sobre los que incida puede o no alcanzar la condición de peligro natural. De esta forma la caracterización del evento natural como fenómeno o como peligro implica una íntima relación entre la magnitud del suceso y las características estructurales de los bienes afectados.

Resulta factible transformar la relación anterior en una escala que permita señalar la magnitud de acción del evento respecto del daño ocasionado, de esta forma la condición de máxima destrucción se vincula con la mayor magnitud significativa del evento. Existe una condición para la cual la magnitud del fenómeno no ocasiona daños significativos. Intensidades inferiores no resultan de interés para las valoraciones económicas.

El planteo en forma absoluta de las características de los fenómenos naturales típicos de una región permite establecer una escala de acciones que constituyen un elemento de interés a la hora de establecer mapas temáticos representativos de las intensidades del fenómeno esperable en la zona bajo estudio. Solo cuando estas intensidades se asocian con un bien o estructura es posible establecer el nivel de NO-VULNERABILIDAD y a partir de este determinar el perfil de VULNERABILIDAD correspondiente.

Establecido el perfil de vulnerabilidad de la estructura ante los fenómenos bajo consideración el mismo debe ser asociado con la probabilidad de ocurrencia de estos fenómenos. Esta conjunción permite identificar el riesgo de daño como un elemento que interviene directamente en la valoración económica de la alternativa de acción.

Esquemáticamente el razonamiento anterior puede ser resumido en la Figura N° 1.

4.3 GENERACIÓN DEL PERFIL DE VULNERABILIDAD EN LOS SISTEMAS CARRETEROS.

La generación del perfil de vulnerabilidad permitirá definir el nivel de riesgo y las obras de mitigación necesarias en casos concretos. Para ello, es necesario utilizar una metodología que facilite lograr los objetivos planteados.

En primer lugar, es necesario contar con información básica que caracterice los fenómenos naturales en estudio.

En forma sintética, esta información debe referirse a:

- Ubicación.
- Probabilidad de ocurrencia.
- Severidad.

A modo de ejemplo, la OEA, en su Manual sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado, menciona las variables a considerar para la evaluación del potencial de peligro de algunos fenómenos naturales.

Estas se reproducen en la Tabla N° 19.

Identificados los fenómenos naturales de interés se procese a la confección del correspondiente mapa de peligros naturales. Sobre estos mapas se asientan posteriormente las trazas bajo análisis, permitiendo establecer el grado de afectación de los fenómenos sobre la obra. La interpretación gráfica de los resultados del procesamiento anterior son los indicados en la Figura N° 2.

Figura 1. Esquema de interpretación de la vulnerabilidad a peligros naturales. La condición divisora entre evento y peligro está directamente asociada a tipo de estructura afectado.

MAGNITUD DEL FENÓMENO NATURAL	CALIFICACIÓN DEL FENÓMENO NATURAL	IDENTIFICACIÓN DE VULNERABILIDAD	DAÑO ASOCIADO	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA
1	EVENTO			
2				
3	PELIGRO	1	15	P ₁
4				
5		2	30	P ₂
6				
7		3	50	P ₃
8				
9		4	100	P ₄
10				

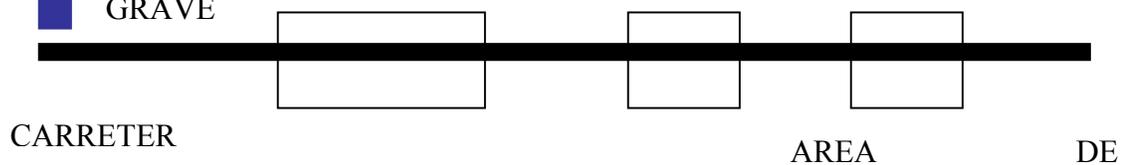
Tabla 19. Variables a considerar en la evaluación del peligro potencial de peligros naturales (OEA, 1993).

VARIABLES	TERREMOTOS	DESLIZAM. DE TIERRA	HURACANES	INUNDACIONES DE RÍOS
UBICACIÓN	Epicentros Formaciones geológicas	Inventarios Formaciones geológicas Pendiente	Desprendimiento de tierras Trayectoria	Canal Trayecto de inundación Llanura de inundación Elevación
SEVERIDAD	Intensidad Magnitud Aceleración Desplazamiento	Velocidad Desplazamiento	Velocidad del viento Precipitación	Volumen Velocidad Tasas de crecidas
PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	Intervalo de recurrencia Velocidades de desplazamiento Sismicidad histórica.	Recurrencia de terremotos Regímenes de precipitación Velocidad de destrucción de bordes	Ocurrencia histórica	Periodos de retorno históricos Registro de inundaciones Evento de diseño

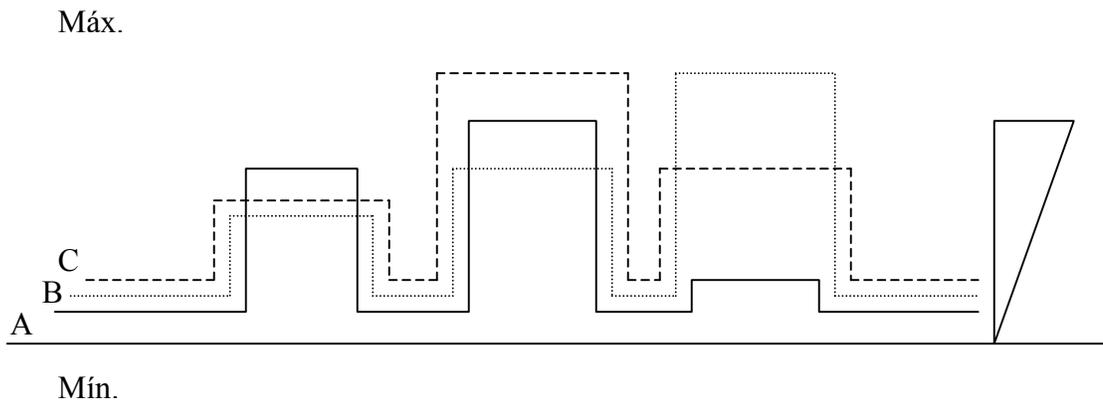
Figura 2 Perfil de vulnerabilidad de la carretera a los peligros naturales A, B y C.

Efectos

- LEVES
- SEVEROS
- GRAVE



Vulnerabilidad



4.4 CONSIDERACIÓN DE COSTOS EN LA EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD.

Los sistemas viales carreteros se caracterizan por su extensión, y como tales pueden verse afectados por impactos de desastres naturales de diferentes magnitud. Así, una sección de una carretera puede estar sometida a

inundaciones mientras que una sección contigua no, o estarlo a inundaciones menos severas.

Para tratar con el problema mencionado en el párrafo anterior es necesario tener en cuenta tres elementos de caracterización de los fenómenos naturales: la ubicación y severidad del fenómeno se evalúa si este afecta a infraestructura humana, convirtiéndose en este caso en un peligro natural.

Sobre la base de los conceptos anteriores se propone a continuación un esquema metodológico de tratamiento del tema. El objetivo final de este esquema es la identificación del riesgo inducido por el fenómeno natural que afecta a la estructura. Los pasos componentes del planteo son los indicados a continuación:

- a) Se asume la existencia de un tramo de análisis en una ruta, el mismo se caracteriza por su ubicación (X) y por la vida útil estimada para su estructura (A). Las variables señaladas anteriormente identifican la infraestructura en cuanto a sus componentes (capas de materiales, obras de arte, estado de conservación, etc.) y en lo referido a su localización espacial. Lo cual permite sistematizar la información en base de datos.
- b) Según los estudios previos de la región la sección bajo estudio se encuentra, dentro del área de influencia (ubicación) de un evento natural (la incidencia del mismo sobre la construcción lo convierte en peligro natural). Este peligro se encuentra caracterizado a través de una severidad (S) y una probabilidad de ocurrencia (P), asociadas al período A de vida útil de la infraestructura. El primero de los conceptos se vincula con identificación de la magnitud de las acciones que implica el evento (intensidad de lluvias, magnitud de acciones sísmicas, etc.). Los

elementos anteriores intervienen directamente en el proceso de evaluación de peligros naturales, es decir caracteriza específicamente al fenómeno.

- c) Sobre la base de la confrontación de las características del peligro natural (S) y las de la infraestructura en la progresiva (X; A) es posible cuantificar las pérdidas y daños que el fenómeno genera sobre la estructura (D). En función de la a magnitud del deterioro ocasionado se pueden alcanzar niveles de desastre natural. Esta evaluación de los efectos ocasionados debe realizarse empleando herramientas coherentes con las características de las obras en estudio. Igualmente, el nivel de certidumbre en la estimación se encuentra vinculado directamente con la inversión bajo análisis. Los daños valorados en cada revisión deben ser expresados en valores monetarios. Este análisis se corresponde con la denominada evaluación de vulnerabilidad.

- d) La probabilidad asociada a las pérdidas y daños mencionados en el punto c no es otra que la del evento natural. Teniendo entonces, el resultado de la ocurrencia del desastre (pérdidas y daños) y su probabilidad, se puede determinar el valor esperado de los daños. Esto es: se consideran dos posibles estados de la naturaleza, ocurre el desastre o no ocurre. La probabilidad del primero es (P) y la del segundo (1-P). Este razonamiento puede ser repetido para el caso de que el evento considerado actúe con distintas magnitudes. Para esta condición cada nivel del evento se encuentra asociado con una probabilidad de ocurrencia (P_i) y con un daño sobre la estructura (D_i).

Los resultados asociados indican la magnitud del daño esperable en función de la combinación de las distintas formas de intervención del evento. Es decir el valor esperado es:

$$R = \sum (D_i \times P_i) + 0 \times (1 - \sum P_i) = \sum (D_i \cdot P_i)$$

El esquema mencionado puede observarse en la Figura 1.

Este valor estimado debe ser incorporado en las evaluaciones económicas de las alternativas bajo estudio. El mismo se adiciona a los costos iniciales de inversión, los costos de mantenimiento y los costos de operación de los usuarios del sistema. En los casos de operación de los usuarios del sistema. En los casos en que corresponda se deben sumar a los anteriores los costos o beneficios exógenos valores para la alternativa.

El esquema metodológico descrito puede incluso complicarse con la consideración de:

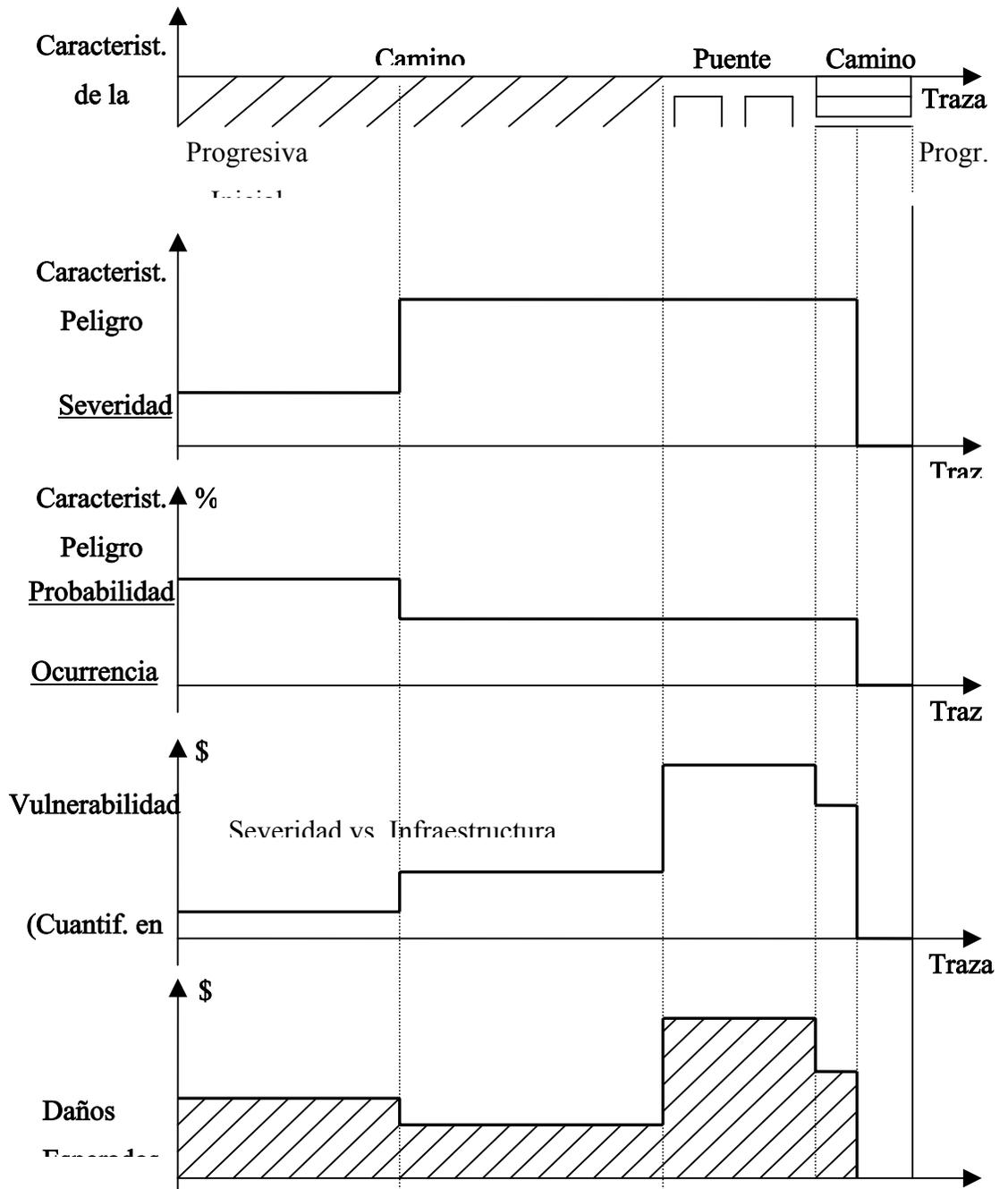
- a) La ocurrencia conjunta o por separado de más de un desastre. En este caso los estados de la naturaleza se multiplican, con la consecuente necesidad de calcular los daños y probabilidades. Por ejemplo, es el caso de dos peligros que denominaremos A y B, aparecen como eventos: “ocurre solamente A” en el periodo de vida útil, “ocurre solamente B”, “ocurren A y B en conjunto” y “no ocurren ni A ni B”. el valor esperado del efecto de los peligros naturales considerados será:

$$R = \Psi_a(\Delta a) + \Psi_b(\Delta b) + \Psi_{ab}(\Delta ab)$$

donde Ψ es la función que implica la sumatoria de las probabilidades de ocurrencia del evento a, b o de ambos simultáneamente, con distintas intensidades las cuales se vinculan directamente con el daño ocasionado sobre la estructura Δ es el daño ocasionado sobre la infraestructura por los eventos a, b o ambos.

- b) Un peligro natural puede afectar distintas partes de la carretera en forma no simultanea. Esta situación debería tratarse como el caso de varios peligros diferentes, es decir los eventos son: afecta a la parte A, afecta a la parte B, afecta a las parte A y B a la vez, no afecta ni a A ni a B.
- c) Existen daños que se producen indirectamente en una sección como consecuencia de la manifestación de peligros naturales en otras secciones.
- d) Consideración de casos en los cuales los períodos de recurrencia de los eventos naturales resultan menores a la vida útil del proyecto. Es decir si se considera una vida útil de 20 años para la infraestructura y se trabaja con un desastre con un periodo de recurrencia de 10 años se puede estar “seguro” que ocurrirá 2 veces en el período de vida útil. En este caso la probabilidad se transforma en certeza ($P = 1$) y los daños se duplican. En forma esquemática la Figura N° 3 presenta el razonamiento anterior.

Figura 3. Período de Análisis: 20 años.



5. LA UTILIZACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS DRENANTES: REDUCCIÓN DE LOS IMPACTOS EN EL MEDIO AMBIENTE.

5.1 INTRODUCCIÓN.

Durante el diseño de los proyectos de carreteras, las preocupaciones por el medio ambiente adquieren una importancia cada vez mayor.

En particular, en Francia, los problemas vinculados al ruido de las infraestructuras de transportes, ocupa uno de los primeros lugares en las preocupaciones de los franceses.

La utilización de los revestimientos de calzadas porosas ha tenido un auge importante, gracias a sus cualidades de comodidad de conducción, a la mejoría de la seguridad para los usuarios, a la reducción del ruido originado por el tráfico y a las posibilidades de limitación de los desechos pluviales en cantidad y en contaminantes.

El objetivo de esta presentación es presentar una síntesis de diferentes experiencias que se han podido llevar a cabo en Francia con el fin de probar las características de los recubrimientos drenantes.

5.1.1 Historia. Los primeros recubrimientos drenantes (también llamados recubrimientos abiertos u hormigones bituminosos drenantes: HBDr) aparecieron en Francia hacia inicios de los años 1960. Las primeras experimentaciones en capas de rodadura de las calzadas datan de mediados de los años 1970, donde se implantaron tres sitios experimentales

en dos carreteras nacionales y una autopista. Después de este período, se produjo una parada de estas experimentaciones para una fase de evaluación de su comportamiento, y porque aparecieron problemas vinculados a la viabilidad invernal.

Hacia mediados de los años 1980 se desarrolló su implantación, en particular para reducir las proyecciones de agua en temporadas de lluvias y mejorar la seguridad de la conducción bajo la lluvia.

La aplicación en el estadio industrial arrancó realmente en 1984 con la realización en autopista de una superficie de recubrimientos drenantes de 200.000 m² de betún de caucho de 4 cm de espesor.

Los hormigones bituminosos se implantaron a gran escala a partir de 1989. esta evolución se explica gracias a las cualidades reconocidas a los recubrimientos drenantes:

- Comodidad y seguridad de conducción en temporada de lluvias;
- Reducción de los ruidos de rodamiento;
- Adherencia a gran velocidad;
- Comportamiento (resistencia mecánica) excelente en fuerte tráfico.

Hacia 1992, se pudo notar una ligera desaceleración de los superficies de recubrimientos drenantes; los administradores se planteaban preguntas al nivel de la seguridad, de las exigencias debidas al mantenimiento invernal y de los problemas de colmatado rápido por obstrucción de los vacíos para las redes viales urbanas.

Se llevaron a cabo numerosas experimentaciones sobre estos recubrimientos para medir sus características, tanto en términos de aptitud para reducir las

proyecciones de agua, que era la primera preocupación de los usuarios, como su bajo nivel de emisiones acústicas, característica que se descubrió tras las primeras pruebas.

5.1.2 Descripción de los recubrimientos drenantes. Los parámetros que permiten definir los recubrimientos drenantes son los siguientes:

- Porcentaje de vacíos (inicial) elevado;
- Permeabilidad y aptitud para reducir las proyecciones de agua;
- Adherencia, textura;
- Eficacia acústica;
- Resistencia mecánica (rodada, durabilidad, etc.) con tráfico;
- Propiedades fotométricas.

Las capas de rodamiento son colocadas en la parte superior de la calzada, directamente en contacto con los vehículos en circulación.

En un recubrimiento drenante, sólo se utilizan los granos gruesos que constituyen así un apilado que deja aparecer entre ellos agujeros en los cuales el agua y el aire penetran con facilidad.

Los hormigones bituminosos drenantes están constituidos generalmente de granulados de 0/10 mm ó 0/14 mm, con un corte de 2/6 ó 2/10 en la curva granulométrica. Quedan por lo tanto las partículas muy finas (0/2 mm) en una proporción de unos pocos % a 15%, y los granulados más gruesos (6/10, 6/14 ó 10/14 según el caso) en una proporción de aproximadamente 85%. De manera general, están más bien compuestos de granulados 0/10 mm, con un corte de 2/6 en la curva granulométrica.

Los granulados se pegan con un conglomerante que puede ser ya sea betún puro en la mayoría de casos, o bien betún modificado, enriquecido con productos elastómeros o con polvo de caucho para garantizar una mayor resistencia mecánica.

Las características de los recubrimientos drenantes son susceptibles de variar en la granularidad, el contenido y el tipo de conglomerante, el tipo de aditivo como lo muestra el siguiente cuadro. Su característica común es que el contenido de vacío inicial debe ser de por lo menos 20%.

Cuadro 1. Características de los recubrimientos drenantes.

Tipo de conglomerante	Discontinuidad ₍₁₎ y Discontinuidad ₍₂₎	Contenido de conglomerante	Que pasa a 2 mm	% en finas
Betún puro	0/10 D 2/6 ó 0/14 D 2/10 ó 0/14 D 4/10	4.2 a 4.8%	13 a 15%	4 a 5%
Betún puro con añadido de fibras minerales ⁽³⁾ : - amianto (1.5%) ⁽⁴⁾ - fibra de roca (0.3 a 0.5%)	0/14 D 2/6 0/10 ó 0/14 discontinuo	6% 5 a 5.5%	13 a 15%	9% a 5%
Betún polímero (SBS o EVA)	0/10 ó 0/14 escasamente o fuertemente discontinuo	4.5 a 5%	10 a 18%	3.5 a 5%
Betún caucho	Frecuentemente 0/10 D 2/6	6.3% aprox.	11% aprox.	3.5 a 4%
HBDr HTV (30% de vacío)	0/10 D 2/6, de los cuales 96% de granulados 6/10 mm	4.9% (con betún de caucho)	0% de arena	4%

(1) Dimensión de los granulados en mm.

(2) D x/y= discontinuidad en la curva granulométrica entre x e y mm.

(3) Cabe señalar también el empleo de fibras orgánicas, a título experimental.

(4) En la actualidad de uso prohibido.

Los recubrimientos drenantes más corrientemente utilizados lo son en espesor de 4 cm.

Parece ser que los recubrimientos drenantes de espesor inferior a 4 cm presentan una baja capacidad para almacenar el agua en temporada de lluvias, y una eficacia acústica baja.

Se puede utilizar estructuras drenantes de espesores muy grandes como limitadores de lluvia.

5.2 REDUCCIÓN DE LOS IMPACTOS DEBIDOS AL RUIDO.

5.2.1 Recapitulaciones.

Las diferentes fuentes de ruido. Un vehículo en movimiento genera una cierta cantidad de emisiones de ruido debidas a diferentes fuentes. Estas fuentes son en particular:

- El ruido del motor mismo, debido en particular a la explosión de la mezcla detonante en los cilindros.
- El ruido del escape, que depende de los tipos de dispositivos utilizados.
- Los ruidos de las transmisiones de los esfuerzos del motor a las ruedas.
- Los ruidos de rodamiento, debidos al contacto de los neumáticos con la calzada.

Los ruidos emitidos por los vehículos han disminuido sensiblemente estos últimos años, gracias a las mejoras técnicas aportadas a los vehículos, bajo la presión de las reglamentaciones, en particular las europeas.

Sin embargo, estas reducciones sólo tienen efectos significativos a largo plazo, tomando en cuenta la tasa de renovación del parque de automóviles, en donde se estima que falta aproximadamente 10 años para renovarlo al 90%.

Las magnitudes de los diferentes tipos de ruidos. Los factores de emisiones, para un mismo vehículo, varían en función de su velocidad. Los ruidos de escape y de las transmisiones aumentan de manera más o menos lineal con la velocidad; los ruidos del motor varían en función de la relación de caja utilizada y de la velocidad; en cuanto al ruido de rodamiento, éste varía de manera exponencial con la velocidad.

Tomando en cuenta las mejorías aportadas a los vehículos, el ruido de rodamiento tiene tendencia a tomar una parte cada vez más importante.

Esto es particularmente cierto cuando la velocidad de los vehículos sobrepasa los 50 km/h lo que es el caso en las vías rápidas (carreteras y autopistas interurbanas), o en las redes viales urbanas cuando la circulación es fluida: el ruido de contacto calzadas neumáticos se vuelve entonces preponderante para los vehículos ligeros.

Para los camiones de carga, cuyo nivel de ruido en la emisión es más importante, la velocidad más allá de la cual el ruido de rodamiento se vuelve preponderante es de 80 km/h.

Parece entonces natural buscar reducir los niveles sonoros emitidos por la circulación mediante la reducción del ruido de rodamiento, implantando revestimientos de calzadas poco ruidosos y los fabricantes de neumáticos llevando a cabo investigaciones en el mismo sentido. En medio urbano

denso, la disminución del ruido de la circulación por este medio se muestra como el único eficaz, con el aislamiento de las fachadas.

Mecanismos de generación del ruido de rodamiento. El ruido de contacto neumático-calzada se debe a fenómenos físicos que se producen en la interfaz de los dos elementos. Se distinguen tres fenómenos principales:

- Los ruidos de choques.
- El fenómeno de “air pumping”.
- El fenómeno de “slip and stick”.

Cuadro 2. Evoluciones de los valores de ruido en la emisión.

Valores máximos de ruido en la emisión, durante la homologación de los vehículos, en Lpmax.				
Fechas de puesta en aplicación	1970	1982	1989	1995
Vehículos ligeros	80 dB (A)	80 dB (A)	77 dB (A)	74 dB (A)
Camiones de carga	91 dB (A)	88 dB (A)	84 dB (A)	80 dB (A)

Los ruidos de choques son producidos por los elementos del neumático que golpean la calzada durante el desplazamiento de la rueda: se puede

comparar estos ruidos con los ruidos de percusión, repetidos una gran cantidad de veces por segundo tanto más cuanto el vehículo circula rápido. Estos ruidos son generados en los ámbitos de las frecuencias medias y medias.

El fenómeno de air pumping se debe a los ciclos de compresión/ liberación del aire al acercarse y al salir de la zona de contacto neumático/ calzada. Estas vibraciones del aire se sitúan en los ámbitos de las frecuencias medias y altas.

En cuanto al fenómeno de slip and stick, se debe a la adherencia que existe entre la goma del neumático y los granulados de la calzada; el avance del vehículo provoca ciclos “adherencia-ruptura de adherencia” que generan ruidos en los ámbitos de las frecuencias bajas y medias.

5.2.2 Los principales resultados obtenidos. Se han realizado campañas de medición de ruido al borde de diferentes tipos de calzadas para caracterizar los niveles sonoros percibidos. Los revestimientos probados fueron los siguientes:

- Hormigón bituminoso ultra delgado (HBUD);
- Hormigón bituminoso muy delgado (HBUD);
- Hormigón bituminoso 0/10 (HB 0/10);
- Hormigón bituminosos 0/10 (HB 0/14);
- Hormigón desnudado (HD);
- Hormigón claveteado desnudado (HCD);
- Recubrimiento drenante (RD).

El resultado de medición utilizado es objeto de una norma francesa (norma NFPr 31 119), y se ha desarrollado sobre la base de una colaboración franco-alemana. Este procedimiento permite medir el ruido emitido por un vehículo aislado (medición MFA- VI).

Los resultados se expresan en niveles L_{pmax} 90 km/h, nivel de presión acústica máxima para una velocidad de 90 km/h.

Estos resultados se pueden comparar a los obtenidos por el Laboratorio Regional de Puentes y Calzadas de Estrasburgo para la constitución de una base de datos sobre una gran cantidad de revestimientos (base de datos “ruido de rodamiento”).

Estos resultados son los del Cuadro 3.

Cuadro 3. Resultados experimentales de diferentes revestimientos[4].

Plancha	L_{pmax} a 90 km/h en dB (A)	Plancha	L_{pmax} a 90 km/h en dB (A)
A 31 – RD	75.3	A 31 – RD	84.6
A 26 – HB 0/10	76.6	A 26 – HB 0/10	85.2
A 5 – HBMD	76.9	A 5 – HBMD	86.5
A 31 – HBUD	77.2	A 31 – HBUD	86.7
A 64 – BUD	78.5	A 64 – BUD	86.8
A 71 – HD	80.3	A 71 – HD	87.1
A 26 – HCD	80.7	A 26 – HCD	87.6
A 4 – HB 0/14	80.8	A 4 – HB 0/14	89.3

Clasificación VL

Clasificación PL

Cuadro 4. Síntesis de la base de datos “ruido de rodamiento”.

	<u>L_{pmax} (90 km/h) en dB (A)</u>	
	mínimo	máximo
Enlucidos superficiales	77.9	79.6
Hormigones bituminosos	74.3	80.8
Hormigones bituminosos drenantes	70.8	78.1
Hormigones de cemento	79.5	80.7

Los hormigones bituminosos agrupan varias categorías: hormigones bituminosos semigranulosos, de espesor superior a 4 cm, hormigones bituminosos delgados, de espesor comprendido entre 2.5 y 4 cm, hormigones bituminosos muy delgados, de espesor comprendido entre 2 y 2.5 cm y hormigones ultra delgados, de espesor comprendido entre 1.5 y 2 cm.

Se observa la clasificación de los diferentes tipos de revestimientos según su contribución sonora; los recubrimientos drenantes tienen en promedio una contribución sonora más baja. Sin embargo se puede observar que algunos revestimientos drenantes poseen contribución acústicas más importantes que algunos hormigones bituminosos cerrados.

Una obra experimental permitió probar los rendimientos acústicos de calzadas gruesas (40 a 50 cm). Los resultados mostraron que se confirmaba el concepto de calzada porosa gruesa poco ruidosa: la plancha de prueba de

mayor rendimiento alcanzó un nivel sonoro bajo: 71 dB (A) en Lmax, ganando 4 dB (A) con relación al promedio de los recubrimientos drenantes y 2 dB con relación al mejor de los recubrimientos drenantes. Sin embargo, las mediciones en las capas intermedias mostraron que el resultado se alcanzó con las primeras capas de superficie (primer tercio aproximadamente). Se confirmó por otra parte que las interfaces son factores muy limitantes de la absorción, y que por lo tanto se debe orientar hacia las monocapas más gruesas posibles para una eficacia máxima.

Otra obra experimental probó varias planchas de recubrimientos drenantes de alto contenido de vacíos, implantadas en espesores de 4, 6 y 8 cm. El conglomerado es una mezcla de betún y polvo de caucho proveniente del molido de neumáticos usados; el contenido de vacíos es superior al 30%, es decir por lo menos 25% de vacíos comunicantes. Los niveles de ruido resultantes se presenta en el siguiente cuadro.

Cuadro 5. Niveles sonoros emitidos para recubrimientos de diferentes espesores.

	4 cm	6 cm	8 cm
LA máx en dB (A)	74.4	72.2	70.6

En la actualidad, se están realizando experimentaciones de este tipo en calzadas mojadas. Los primeros resultados dejan aparecer que se produce un estrechamiento de las clases de contribuciones acústicas de los diferentes recubrimientos, los recubrimientos drenantes que pierden una parte de sus

ventajas en el campo de la protección contra el ruido, en particular en las bajas frecuencias.

Parecería que, por otra parte, hicieran falta varias horas para que un revestimiento mojado recupere su estado seco, y por lo tanto sus cualidades, y que los recubrimientos drenantes poseen menos rendimientos en la materia.

5.2.3. Interpretación de los resultados. La eficacia acústica de los hormigones bituminosos drenantes se explica por la conjunción de varios fenómenos:

- La minimización del ruido de choque; los granulados presentes en la superficie del revestimiento se dispone de tal manera que se limitan las asperezas.
- Dado que la superficie del revestimiento presenta vacíos debidos a la porosidad, la superficie de contacto neumático/ calzada es más baja, y el ruido debido al fenómeno “slip and stick” se reduce.
- El ruido debido al air pumping se reduce por disminución de la puesta bajo presión del aire aprisionado, absorbido en la porosidad; el aire que se encuentra allí se pone en vibración, frota contra las paredes de los materiales y transforma la energía acústica en energía calorífica por efecto Joule.
- La superficie de la calzada, gracias a la porosidad del revestimiento, puede ser considerada como absorbente, lo que limita las reflexiones de los ruidos de rodamiento y de contacto neumático/ calzada en el medio ambiente.

Una calzada drenante posee características óptimas cuando estos fenómenos se acumulan de la mejor manera. Las experiencias recientes muestran que la eficacia óptima se puede obtener con hormigones bituminosos drenantes muy porosos (> 25% de vacíos comunicantes) y de espesor comprendido entre 6 y 10 cm.

5.2.4. Evolución de las características en el tiempo. Un estudio ha permitido caracterizar los rendimientos acústicos de los recubrimientos drenantes luego de 4 a 5 años de implantación en segmentos de autopistas. La muestra corresponde a 7 planchas que habían sido objeto de una campaña de mediciones en 1990/91/92 sobre las cuales se repitieron mediciones en 1994/95.

Se calculó un “valor de referencia” a partir del método de Guía del Ruido a título de comparación (valor GDB). Los resultados de la campaña de 1994/95 son los siguientes:

Cuadro 6. Niveles sonoros en recubrimientos antiguos.

Revestimiento	Edad	Plancha No	Lamax promedio	Ganancia / GDB
HBDr 0/10/A36	4 Años	2	74.3	9.8
HBDr 0/12 ^a 31	4 Años	4	75.8	8.3
HBDr 0/12 ^a 31	4 Años	7	76.7	7.4
HBMD 0/10A26	4 Años	1	79.9	4.2
HBMD 0/10A5	4 Años	6	82.1	2
HBMD 0/10A36	5 Años	3	82.3	1.8
HBUD 0/10 ^a 31	4 Años	5	83.1	1
Referencia GDB		8	84.1	0

Se constata que los recubrimientos drenantes, incluso en el tiempo, siguen siendo de lejos los revestimientos de mayor rendimiento desde el punto de vista de su emisión sonora. Su resistencia en el tiempo parece por lo tanto notable tanto desde el punto de vista del valor del Lamax (75 dB (A) en promedio a 120 km/h) como de la diferencia relativa con las otras técnicas de carreteras (3-4 dB (A)).

Los mismos resultados se encuentran con otros indicadores tales como el Lamax de los trenes de carreteras (TC).

El análisis espectral muestra claramente el fenómeno de reducción del ruido, con una ausencia de pico en las frecuencias medias, debido a la ausencia del fenómeno de air pumping, que se señala en las frecuencias comprendidas entre 800 y 2000 Hz.

El estudio de los espectros acústicos permite además concluir sobre el excelente estado acústico de los revestimientos drenantes (no hay colmatado) al cabo de varios años de servicio.

El mismo estudio ha permitido comparar los resultados de las mediciones de 1995 con los obtenidos en 1992. El criterio de comparación elegido es el Lamax, VL a 120 km/h. La comparación de los resultados puede expresarse según el Cuadro 7.

La clasificación de los mejores rendimientos acústicos en 1992 es (en No de planchas) 2,7,4,3,6,5,1; la clasificación en 1995 se convierte en 2,4,7,1,6,3,5. Se observa por lo tanto que cualquier que sea la fecha en la cual se ha efectuado la campaña, hay una conservación de la cantidad de clases:

- Una clase acústica “superior” constituida por HBDr.
- Una clase acústica “intermedia” constituida por otros revestimientos.

El estudio comparado de las planchas 3, 5 y 6 revestimientos no drenantes hace aparecer un crecimiento de los niveles en aproximadamente 2 dB (A) en promedio. Por lo tanto habría una degradación de los rendimientos acústicos de estas planchas.

Cuadro 7. Comparación de los niveles sonoros de recubrimientos recientes y antiguos.

Revestimient o	Edad	Plancha No	LA máx promedio 1992	LA máx promedio 1995	Diferencia 1995/1992
HBMD 0/10/A36	4 Años	1	81.1	79.9	-1.2
HBDr 0/12 ^a 31	4 Años	2	76.2	74.3	-1.9
HBMD 0/12 ^a 31	5 Años	3	79.9	82.3	2.4
HBDr 0/10 ^a 26	4 Años	4	78.8	75.8	-3
BUD. 0/10 ^a 5	4 Años	5	80.7	83.1	2.4
HBMD 0/10 ^a 36	4 Años	6	80.5	82.1	1.6
HBDr 0/10 ^a 31	4 Años	7	78.7	76.7	-2

Por el contrario, el estudio de las planchas 2, 4 y 7 revestimientos drenantes hace aparecer una baja de los niveles sonoros en aproximadamente, podría explicarse por el estado del revestimiento y su implantación, y por la facultad de auto limpieza de estos revestimientos.

El análisis espectral de los resultados muestra que algunos picos que estaban presentes en 1992 (hacia 630 Hz y 1600 Hz) han desaparecido en

1995. Podemos interrogarnos sobre la presencia de tales picos para un revestimiento que entonces era reciente (defectos de implantación, colmatado precoz). Por el contrario, la desaparición de estos picos podría explicarse por la limpieza de la plancha por el paso de los vehículos a velocidades elevadas. Este descolmatado permitiría el revestimiento alcanzar su eficacia máxima en los alrededores de 120 km/h.

Estos resultados muestran por lo tanto que en vías que soportan un tráfico fluido, rápido, con una proporción importante de camiones de carga, los recubrimientos conservan, e incluso mejoran, sus rendimientos iniciales, por un fenómeno de descolmatado “natural”. Por el contrario, en medio urbano, parecería que el colmatado de los recubrimientos se hace rápidamente. Este fenómeno se puede observar visualmente (taponado de los vacíos del recubrimiento) o mediante la medición de la permeabilidad del revestimiento.

Para los medios urbanos, parece que la solución que implanta recubrimientos con muy contenido de vacío permitiría limitar la obstrucción de la porosidad y facilitar el descolmatado. Estos recubrimientos podrían reforzar su permeabilidad mediante conglomerantes específicos a base de elastómeros, polímeros o mezclas de betún y de polvo de caucho.

5.2.5. Impactos sobre la molestia sentida por los vecinos. Los resultados expresados más arriba muestran la reducción del ruido obtenida al paso de un vehículo. Pero este indicador no refleja de manera fiable la molestia percibida en el entorno por los vecinos. Se han realizado mediciones en diferentes sitios para cuantificar las ganancias de niveles acústicos obtenidas después de la implantación de un revestimiento drenante. El indicador utilizado es el nivel de presión equivalente (L_{eq}) sobre un período de

observación definido (8 h-20h por ejemplo para el período diurno). Los resultados obtenidos sobre cinco se ven en el Cuadro 8.

Aunque se llega a atenuaciones del orden de 6 a 8 dB (A) con el indicador del L_{pmax} para un vehículo aislado, las atenuaciones del nivel del ruido del ruido en el entorno son más bajas. Estos resultados muestran que no basta con caracterizar los rendimientos de los recubrimientos drenantes a algunos metros de la calzada para extrapolar lo que ocurre en el entorno. El impacto sobre los fenómenos de propagación del ruido.

Paralelamente a las mediciones acústicas efectuadas en estos sitios, se han llevado a cabo encuestas entre los vecinos para verificar si estos habían sentido una mejoría de su entorno después de la implantación de los revestimientos. De manera general, los resultados de las encuestas muestran que cuando las reducciones son del orden de 1 a 3 dB(A), no parecen ser sentidas como un progreso determinante por los vecinos.

Cuadro 8. Comparación de los niveles sonoros en el medio ambiente antes y después de la implantación de recubrimientos drenantes.

Atenuaciones antes / después en dB(A)	Sitio nº1	Sitio nº2	Sitio nº3	Sitio nº4	Sitio nº5
Día: Leq (8h – 20h)	2.9	2.8	2.1	3.7	4
Tarde: Leq (20h – 24h)	3.9	4.2	1.7	3.1	1.7
Noche: Leq (0h – 5h)	3.7	4.4	0.4	2.9	1
Madrugada: Leq (5h – 8h)	2.4	3.1	1.6	2.9	2.2

5.3 MEJORÍA DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS.

5.3.1 Principales resultados obtenidos. En los recubrimientos tradicionales, sólo se considera el chorreo en el revestimiento superficial. Los HBDr, gracias a su porosidad importante, eliminan el agua en la superficie, lo que mejora la comodidad de conducción.

Los parámetros que determinan la permeabilidad de los recubrimientos nuevos están aún mal definidos. Parece que para un HBDr 0/10, son determinantes esencialmente el porcentaje de arenas y el espesor (DELANNE in).

Sin embargo, una fuerte granularidad sería favorable a la permeabilidad y a su mantenimiento. Estos parámetros son sin embargo desfavorables para las emisiones sonoras.

El parámetro determinante es por supuesto el del contenido de vacío: sin embargo sólo son los vacíos comunicantes los responsables de la buena permeabilidad.

Las mediciones efectuadas con el permeámetro proporcionan valores de permeabilidad del orden de 1 cm/s para la velocidad de precolación. Algunas formulaciones permiten alcanzar velocidades de precolación del orden de 3 a 5 cm/s según el espesor de la capa de recubrimiento (4 a 8 cm).

Sin embargo, estos valores de permeabilidad evolucionan con el tiempo, en función del entorno de la vía y del tipo de tráfico que soporta.

En una calle de París, se ha constatado una caída de permeabilidad de 0,08 cm/s mes en trece meses; parece que este fenómeno no es lineal; el colmatado, después de una aparición rápida, parece estabilizarse, lo que justifica el interés de una porosidad elevada originalmente.

Para otros dos sitios, se ha constatado que las velocidades de precolación, superiores a 1,3 cm/s originalmente, caían a 0,4 cm/s después de un año y 0,2 cm/s después de dos años.

Las causas del colmatado sería de varios tipos:

- Suciedad, taponamiento de los poros por el polvo proveniente de las actividades del entorno o de los vegetales.

- Desplazamiento de la película de betún superficial presente en los granulados después de su implantación.
- Desechos de los vehículos, más importantes cuando circulan a baja velocidad o en condiciones de tráfico pulsado.
- Postcompactado, en particular en las zonas de parada.

Las comparaciones de la evolución de la permeabilidad entre vía rápida y vía lenta muestran una diferenciación entre estos dos tipos de vías; las vías lentas, que soportan más cargas rodantes, pero de baja velocidad, se colmatan más rápidamente.

Cuadro 9. Evolución de la permeabilidad de un recubrimiento drenante.

Fecha	Julio de 1992	Diciembre de 1992	Julio de 1993	Diciembre de 1993
Permeabilidad (cm/s)	2.8	2	1.6	1.5

Cuadro 10. Velocidades promedio de precolación (en cm/s).

	Vía lenta	Vía rápida
Nov. 1992	1.98	2.59
Junio 1993	1.57	2.37

5.3.2. Comparación de una calzada drenante con una calzada clásica. Se han llevado a cabo experimentaciones con el fin de comparar, en sitios similares, los comportamientos hidráulicos de las calzadas porosas a los de las calzadas clásicas y las consecuencias sobre la composición de las aguas de chorreo, se han llevado a cabo dos experimentaciones, una en la ciudad, y la otra en una autopista en ampo raso.

En autopista, los resultados han sido los siguientes:

Cuadro 11. Comparación de las concentraciones de las aguas de chorreo.

	Calzada drenante	Calzada clásica
DBO5 (mg/l)	7.8	5.8
DCO (mg/l)	59	64
MES (mg/l)	57.4	60.6
NTK (mg/l)	2.3	1.4
Hidrocarburos (mg/l)	1.7	3.2
Plomo (µg/l)	< 1.1	< 1.8
Cobre (µg/l)	6	15.6
Cadmio (µg/l)	< 0.11	< 0.1
Zinc (µg/l)	63	189

Se notará que en concentraciones, las diferencias entre las dos estructuras no son significativas, excepto para los hidrocarburos y el cinc. Sin embargo, la experiencia también ha mostrado que en términos de flujos hídricos, la calzada drenante conduce a una deducción del 20% de los volúmenes chorreados. Este fenómeno tiene desde entonces una incidencia cierta en los flujos de contaminantes desechados en la red de saneamiento, como lo muestra el siguiente cuadro.

Cuadro 12. Comparación de los flujos de contaminación.

	Calzada drenante	Calzada clásica
Volumen (m ³)	310	390
DB05 (g)	2087	1999
DCO	18336	24962
MES (g)	17791	23668
MES orga (g)	6575	8943
Hidrocarburos (g)	487	1182
NTK (g)	707	563
Plomo (mg)	< 338	< 691
Cobre (mg)	1861	6091
Cadmio (mg)	< 34	< 39
Zinc (mg)	19653	73673

Se puede notar por lo tanto para los hidrocarburos, rendimientos globales de intercepción del orden del 60%; para la DCO, los MES totales y los MES orgánicos, las deducciones son del orden del 25% aproximadamente.

En el sitio urbano, los resultados han mostrado también allí deducciones importantes de contaminación:

Cuadro 13. Deducción de los flujos de contaminación gracias a los recubrimientos drenantes.

	Deducción de contaminación en %
DBO5	63
DCO	57
MES	60
Hidrocarburos	43
Plomo	87
Zinc	47

Estas dos experimentaciones han permitido mostrar que la calzada drenante induce una deducción del 20% de los volúmenes chorreados; la reducción de los caudales de punta va del 29 al 75%, e incluso puede alcanzar 97%; esta reducción de los caudales aparece tanto más elevada cuanto más importante es la intensidad de la lluvia.

5.3.3. Asociación a las estructuras depósito. Las técnicas que implantan los recubrimientos drenantes han sido asociadas a estructuras depósito, cuyo funcionamiento ha sido diseñado para tratar principalmente los problemas hidráulicos. Se trata de construir bajo la calzada, una estructura que posee una fuerte proporción de vacío que permite acumular el agua antes de desecharla en el medio exterior con un caudal de escape limitado, o bien de infiltrarla en el suelo.

Se encuentran tres tipos principales, en función de las cargas que debe soportar la calzada:

- Un revestimiento impermeable que corona una capa depósito que recibe las aguas pluviales por un tragadero.
- Un revestimiento poroso sobre una capa de base impermeable; las aguas pluviales se infiltran lateralmente hacia la capa depósito.
- Todas las capas son porosas, y las aguas pluviales se infiltran directamente sin chorrear en la estructura depósito.

Las capas depósito pueden estar constituidas ya sea por estructuras alveolares, o bien por materiales granulados cuya granulometría elegida permite alcanzar porosidades importantes (gravas 20/80 por ejemplo).

Además de su comportamiento hidráulico particular, que permite limitar los caudales en el exutorio, e incluso infiltrar directamente las aguas pluviales, estos dispositivos presentan también un interés para el control de la contaminación vehiculada por las aguas pluviales.

Varias experimentaciones han permitido cuantificar la deducción de contaminación permitida por estos dispositivos. A continuación se presentan algunos resultados obtenidos:

Cuadro 14. Comparación de los valores de los parámetros de calidad de las aguas pluviales medidas en dos sitios.

	Estructura depósito	Estanque de referencia
Ph	7.5	7.5
DCO (mg/l)	< 22.1	< 23.4
MES (mg/l)	11.9	33.2
MVS (%)	32.1	37.3
Pb (µg/l)	5.4	26.3
Zn (µg/l)	46.3	165
Cu (µg/l)	14.6	11.3
Cd (µg/l)	0.49	1.48
Hidrocarburos (mg/l)	< 0.02	< 0.02

Cuadro 15. Dedución de contaminación obtenida en un estacionamiento.

	Estructura depósito	Estructura clásica	% deducción
DCO	28 (mg/l)	133 (mg/l)	79
MES	165 (mg/l)	256 (mg/l)	36
Pb	10 (µg/l)	69 (µg/l)	86

Tomando en cuenta los coeficientes de chorreo obtenidos, el balance en términos de flujos contaminantes se vuelve aún más favorable, con rendimientos de descontaminación de:

- DCO:89%
- MES: 50%
- Pd: 93%

Podemos preguntarnos qué ocurre con la contaminación retenida en estas estructuras. Un estudio ha mostrado que los micro contaminantes metálicos son principalmente retenidos en la superficie de los recubrimientos drenantes. También se ha observado un ligero aumento de los contenidos de metales al nivel de la base de la estructura depósito, así como en las primeras capas de suelo bajo la estructura depósito. El espesor de la parte contaminada no rebasa 15 cm máximo para el plomo. El suelo in situ no parece contaminado por los metales pesados, incluso después de varios años de funcionamiento.

5.3.4. Pruebas de descolmatado. Hemos visto que las calzadas porosas permitían retener una parte de la contaminación vehiculada por las aguas pluviales, y que por otra parte (ambos fenómenos estando en parte vinculados) las características de permeabilidad se degradaban en el tiempo para algunos sitios. Es por esta razón que se han llevado a cabo pruebas han tenido dos objetivos; conocer la composición de los materiales atrapados por las estructuras drenantes, y seguir las características de permeabilidad tras las operaciones de descolmatado.

Los procedimientos de descolmatado consisten en proyectar un chorro de agua bajo presión (50 a 250 bar aproximadamente), y luego en hacer

intervenir una aspiradora que pueda efectuar un segundo aporte, permitiendo remover las partículas despegadas mediante el chorro de agua antes de aspirarlas. Estas técnicas se justifican por el hecho de que los contaminantes en los recubrimientos drenantes son retenidos en los dos primeros centímetros del revestimiento.

En materia de contaminación, los resultados muestran que la granulometría de los colmatantes es esencialmente arenosa; los porcentajes de las fracciones 20-200 μ m y 200-2000 μ m son respectivamente de 43% y 35%. Los contenidos de metales pesados en la fracción inferior a 2 mm se presenta a continuación.

Cuadro 16. Contenidos de metales pesados de los sedimentos de descolmatado (en mg/kg MS).

	Cu	Pb	Cd	Zn
Desvió urbano	232	1024	2.74	775
Periférico	388	1737	1.58	860
Estacionamiento	32	104	0.57	125
Calle	81	182	0.25	385

De estos resultados se desprende que el nivel de contaminación de metales pesados es dependiente de la intensidad del tráfico en la calzada. El análisis

granulométrico muestra que las concentraciones de metales pesados más elevadas se encuentran en la fracción fina, inferior a 40 μm .

En lo concerniente a la eficacia de las operaciones de descolmatado sobre la permeabilidad de los recubrimientos, las experiencias son bastante controvertidas.

En particular parece que las ganancias obtenidas en materia de permeabilidad sólo pueden medirse varios meses después de la operación de descolmatado. En efecto, se tiene que esperar a que el soporte haya regresado a un estado comparable al de las mediciones iniciales, y no aún saturado con agua cargada de los colmatantes restantes.

Parecería que las operaciones de descolmatado sólo fueren realmente eficaces sobre calzadas que aún no han sido permeabilizadas (velocidad de precolación superior o igual a 0.6 cm/ s). Por debajo, el revestimiento corre el riesgo de colmatarse rápidamente otra vez.

Sin embargo, una experiencia ha mostrado que una calzada cuya velocidad de precolación media, después de 6 años de puesta en servicio, había caído a 0.06 cm/ s, recuperó una velocidad de precolación de 0.8 cm/ s después del descolmatado.

6. RECICLAJE EN FRÍO-EN EL SITIO-DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS USANDO MATERIALES BITUMINOSOS.

6.1. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN.

6.1.1. Introducción. Este sistema de rehabilitación de pavimentos que es aplicable a aquellos que presentan un alto deterioro, donde otras soluciones son antitécnicas y antieconómicas, también es conocido bajo el nombre de “recuperación Total”, por abarcar el reciclaje del espesor total de la carpeta asfáltica existente.

Asimismo se denomina “en frío” ya que no interviene el consumo de energía calorífica en ninguna de sus etapas, como sería en el caso del “Reciclado con asfalto espumoso”, donde el proceso es similar pero en cambio de utilizar emulsión asfáltica como estabilizante, se emplea asfalto sólido que requiere calor para su liquefacción y aplicación.

Se denomina “en el sitio” ya que todo el proceso se ejecuta sin generar transporte de materiales, por reutilizar los existentes en el sitio.

6.1.2. Descripción del método. El método consiste en disgregar una carpeta asfáltica deteriorada con parte de las capas granulares subyacentes, a una gradación próxima a la original de las capas mencionadas y adicionarle una emulsión asfáltica para estabilizar esta mezcla de materiales disgregados, generalmente de rompimiento lento CRL.

6.1.3. Ventajas del método. Esta técnica de rehabilitación está soportada en los siguientes beneficios que efectivamente ofrece:

- Permite la reutilización de agregados y ligantes.
- Permite la conservación del medio ambiente.
- Disminuye el acarreo o transporte de materiales.
- Permite el mejoramiento estructural de pavimentos deteriorados.
- Permite la recuperación de condiciones geométricas perdidas por la vía, bien por exceso de formaciones o exceso de bacheo de conservación que desmejoran las condiciones de comodidad al rodamiento.
- Permite la conservación de la energía.
- En zonas urbanas permite conservar los niveles de pavimentos existentes, evitando que el acceso a la inspección de los servicios públicos, áreas peatonales y sistemas de drenaje queden enterrados.

6.1.4. El proceso constructivo. Generalmente se efectúa mediante máquinas que simultáneamente pueden ejecutar las tareas de disgregación de los materiales, adicionar agua para facilitar la dispersión de la emulsión asfáltica, aplicar la emulsión y mezclarla con los materiales. La profundidad del corte total (pavimento + porción de capa granulada) que estos equipos recicladores pueden efectuar varía máximo hasta 30 ó 50 cm dependiendo del tipo de máquina, espesores usuales en estabilizaciones de suelos o materiales granulares, más no frecuentes en el caso que nos ocupa, por las limitaciones de orden tecnológico que más adelante se mencionarán.

El proceso constructivo se completa mediante el enrase o perfilado final de la superficie reciclaje por medio de una motoniveladora, para asfáltica estabilizada, que se cubre posteriormente con una carpeta de rodadura, comúnmente un concreto asfáltico mezcla en caliente.

En algunas oportunidades, como una variable al método, dado el gran espesor de las capas de pavimento asfáltico, el reciclaje se efectúa sin penetrar en las capas granulares subyacentes y se limita a reciclar parte de la capa asfáltica existente.

6.1.5. Diseño de la mezcla. El diseño básicamente, independientemente el método que se emplee, consiste en determinar el contenido óptimo de betún asfáltico que se requiere agregar al material disgregado para lograr la máxima resistencia y la menor pérdida de ella, por efectos de saturación, para soportar la aplicación de un determinado número de ejes equivalentes N.

La máxima resistencia para un contenido de asfalto adicional determinado, se obtiene mediante la dispersión completa de la emulsión asfáltica en el material reciclado, para lo cual se requiere una humedad denominado preenvuelta, que generalmente es la suma de la humedad natural de los agregados reciclados más un agua adicional, si la primera de ellas no supera esta humedad requerida, antes de la aplicación de la emulsión asfáltica, la cual aporta una nueva cantidad de agua para llegar a una humedad total de la mezcla.

Una vez obtenida la humedad de preenvuelta, para un contenido específico de asfalto o emulsión, se determina la humedad óptima de compactación, que es a la cual se desarrollará la máxima resistencia después que la mezcla halla sido compactada a la densidad máxima y perdido su humedad hasta niveles del 2%, período el cual se denomina de curado o maduración. En Colombia el método más utilizado para el diseño de mezclas es el Marshall Modificado de la Universidad de Illinois, cuyas principales propiedades para la evaluación son:

- Numero de golpes por cara50
- Estabilidad mínima en agua, a 22.2°C, libras.....500
- Porcentaje de pérdida de estabilidad después de saturación e inmersión al vacío, máximo.....50
- Flujo 1/100 pulgadas.....8-18
- Porcentaje de cobertura de agregados, mínimo50
- Vacíos con aire.....3-18

Le sigue en popularidad el método del Instituto del Asfalto, contenido en el Manual MS-21, el cual es un método empírico de proporción de agregados.

De reciente introducción y normalización por parte del Instituto Nacional de Vías de Colombia, es el ensayo mecánico de Inmersión-Compresión, el cual establece los siguientes criterios como guías para la selección del contenido óptimo de ligante en la mezcla reciclada.

- Resistencia de probetas curadas en seco>=20 kg/cm²
- Resistencia de probetas curadas en húmedo>= 15 kg/cm²
- Resistencia conservada.....>=50%

6.1.6. Diseño estructural. El método más común utilizado para el diseño de pavimentos flexibles que incluyen capas de bases asfálticas estabilizadas con emulsiones, producto del reciclaje de capas de pavimentos flexibles existentes, es el basado en teorías racionales que permiten la utilización de las propiedades fundamentales de los materiales, diferentes condiciones de carga y de medio ambiente.

Sin embargo la utilización de este método racional está limitada por el escaso equipamiento de laboratorio con que se cuenta de materiales y mezclas empleadas en la construcción de los pavimentos.

Por esta razón las propiedades fundamentales para la aplicación de estos métodos, como la determinación de módulos dinámicos de los materiales de subrasante, capas granulares y estabilizadas quedan limitadas a referencias bibliográficas.

En el caso de bases reciclada, en frío, en el sitio y con emulsiones asfálticas se han venido utilizando para efectos de diseño, módulos dinámicos del orden de 50000 kg/cm^2 para temperaturas de 30°C , con base a los criterios recomendados por la Shell para mezclas tipo (S2-F2-70).

También, para subsanar la falta de información sobre valores verdaderos de módulos dinámicos es utilizado el método de diseño de espesores del Instituto del Asfalto de Norteamérica, contenido en el Manual MS-21, sobre reciclaje de mezclas en frío.

El menos utilizado, pero también aplicado por técnicos de las firmas productoras de emulsión asfálticas y algunas fábricas vendedoras de equipo es el método de la AASHTO, dándole a este tipo de capas recicladas una

gran variedad de coeficientes estructurales, derivadas de diferentes estudios efectuados, como los de las universidades de:

- Pennsylvania0.30
- Purdue.....0.25-0.40
- Texas A&M.....0.22-0.49
- ARRA..... 0.14-0.44
(Asociaciones Recicladores y Recuperadores Asfalto).

6.1.7. Especificaciones y control de calidad. La mayoría de nuestras especificaciones tienden a enfocar principalmente su atención sobre las propiedades de los materiales a reutilizar o reciclar y las características de las mezclas recicladas, más que a los métodos de construcción.

Sin embargo esta situación o vacío ha sido subsanada parcialmente con las nuevas Especificaciones de Construcción del Instituto Nacional de Vías de 1996, las cuales ya hacen énfasis en la relación íntima que debe existir entre el diseño del laboratorio y los trabajos de campo.

El método más utilizado para el control de la mezcla en el campo es la ejecución de densidades en el terreno de la mezcla compactada, la cual en unos casos está referida a un porcentaje de la máxima teórica, en otros a la máxima de laboratorio y en otros a la máxima obtenida en el campo, sin existir un consenso al respecto.

Sin embargo, las Especificaciones de Construcción-1996- del Instituto Nacional de Vías, determinan que:

- “La densidad media del tramo (D_m) deberá ser como mínimo el noventa y cinco por ciento de la media obtenida al compactar en el laboratorio las probetas de referencia según la técnica del ensayo Proctor Modificado (D_e)”.
- “A su vez, la densidad obtenida en cada medida individual (D_i), deberá ser igual o superior al noventa y siete por ciento de la densidad media del tramo (D_m)”.
- Las densidades individuales se realizarán cuando menos un por cada 250 m^2 y los tramos por aprobar se definirán sobre la base de un mínimo de seis densidades.

También las nuevas Especificaciones de INV-1996 involucran el concepto de resistencia de las mezclas mediante el ensayo inmersión- compresión, que determina:

- “La resistencia media de dos probetas sometidas al curado seco (R_m) deberá ser, como mínimo, igual al 90% de la resistencia seca de la mezcla definitiva de trabajo (R_t), un criterio similar se aplicará para las probeta sometidas al curado húmedo.
- “A su vez la resistencia conservada promedio (R_{cm}) deberá ser, como mínimo el 50%, sin que al respecto se admita ninguna tolerancia”.

6.2. CONDICIONES DE LA EXPERIENCIA EXITOSA Y NO EXITOSA.

El comportamiento de los proyectos viales, tanto de carreteras principales, como secundarias y vías urbanas, ha sido variable desde buenos a malos. Los proyectos que han ofrecido generalmente un buen comportamiento se han caracterizado por la presencia de factores tales como:

- Tráfico liviano a medio.
- Construcción durante épocas no lluviosas.
- Existencia de buena calidad de materiales de subrasante.
- Reciclado de materiales de pavimentos asfálticos y bases granulares en proporciones de 50% cada una.
- Buena calidad de los materiales granulares de la base (NP,#200<7%, bien triturados, buena dureza).
- Diseños condiciones de drenaje y subdrenaje.
- Compactación del material reciclado a la humedad óptima y obtención de la máxima densidad.
- Buen disgregación de los materiales reciclados.
- Existencia de homogeneidad en los materiales a reciclar a lo largo del proyecto.
- Cubrimiento de la base estabilizada producto del reciclaje, con una capa de rodadura, solamente hasta que se haya obtenido un buen curado.

6.3. PROBLEMAS ENFRENTADOS Y SOLUCIONES ADOPTADAS.

6.3.1 De diseño de mezclas. Generalmente la toma de muestras en el campo es insuficiente en número y no se logra detectar el cambio en las características de los materiales a reciclar a lo largo de la vía a recuperar, lo cual lleva a aplicar diseños no valederos en los sectores que se presenten dichos cambios.

El resultado de la disgregación de los materiales que se efectúa en laboratorio es diferente a la resultante en el campo durante el proceso constructivo, la cual depende del tipo de equipo que se utilice y de los métodos operativos.

Para dar solución a estos problemas se han adoptado como medidas correctas la toma de muestras cada kilómetro de vía para determinar la homogeneidad de la calidad y espesores de los materiales a reciclar y a menor espaciamiento sí es necesario, para efectuar una sectorización detallada en cuanto a calidad y espesores de las capas a reciclar, y para cada uno de los sectores determinados efectuar un diseño específico que sea posible replicar en el campo durante el proceso industrial.

Asimismo en cuanto a la disgregación de los materiales se insiste en el campo que el grado de disgregación sea el máximo y con materiales provenientes de dicho proceso industrial se ajusten los diseños de laboratorio.

6.3.2. De diseños estructurales. Cuando se utilizan los métodos racionales para el dimensionamiento de los espesores de las capas, a falta de equipamientos suficiente para la determinación de los módulos dinámicos de las diferentes capas constitutivas de la estructura y subrasante y se han adoptado los resultantes de investigaciones de otros países, se ha encontrado que la mayor desviación o fuente de error está precisamente en el módulo que se le asigna a esta capa reciclada y estabilizada con emulsión, ya que parece conducir a valores muy bajos con relación a las observaciones de terreno, donde en general tiene una apariencia muy rígida y poco flexible, que al quedar apoyada sobre otras capas granulares o subrasantes con bajos módulos de elasticidad fallan a corto plazo, por fatiga.

Cuando se utiliza el método de la AASHTO, la incertidumbre de los valores a asignar a los coeficientes estructurales, y en especial al de esta base asfáltica resultante del reciclado, es grande y conduce a diseños pobres o sobrediseños, en otros casos.

Pero independientemente del método de diseño que se emplee, y de las dificultades que se puedan presentar en su aplicación ya anotadas, proyectos donde se ha empleado este método de rehabilitación que están sometidas a un tráfico pesado, y las capas inferiores ofrecen baja rigidez, la presencia de fallas no se ha hecho esperar mucho tiempo, lo cual estaría indicando una relativa alta rigidez de la capa reciclada con relación a las subyacentes.

Como medidas para solucionar este problema de rigidez relativa se han concentrado los esfuerzos a producir emulsiones a partir de asfaltos de penetraciones del orden de 200-250 y utilizar rejuvenecedores para restaurar en alguna medida las características del asfalto viejo contenido en los agregados de la capa de pavimento reciclada, medidas tendientes a la obtención de mezclas más flexibles; es así que la compañía estatal de petróleos y productora de los asfaltos ECOPETROL recientemente ha puesto en el mercado una emulsión con rejuvenecedor para ser utilizada en este tipo de trabajos.

6.3.3. De construcción. Los principales problemas detectados durante la construcción han sido:

- Pobre disgregación de los materiales, bien debido a la potencia y tipo del equipo utilizado o bien por fallas en su operación o procedimientos de construcción.

Para subsanar este problema se efectúan tramos de prueba antes de iniciar los trabajos a fin de determinar el número de pasadas que debe efectuar el equipo, su velocidad de avance y profundidad de corte, para lograr una buena disgregación y gradación uniforme de los materiales. Cada tipo de equipo tiene sus características propias, tanto desde el

punto de vista mecánico, como de operación que inciden en el producto final.

- Pobre dispersión de la emulsión dentro de la masa de material reciclado. Para solucionar este problema se hace énfasis en obtener en el campo la humedad de preenvuelta (humedad a la cual deben estar los materiales antes de la aplicación de la emulsión para lograr su máxima dispersión antes que se suceda su rotura), y dependiendo de las características del equipo utilizado, generalmente la aplicación de la emulsión y mezclado debe efectuarse en una segunda pasada del equipo, después de la correspondiente a la de disgregado de los materiales y obtención de la humedad de preenvuelta.
- Pobre compactación debido a exceso o carencia de humedad, que impide lograr las densidades máximas de compactación a las cuales se obtienen las resistencias mínimas requeridas para soportar el tráfico inicial y las finales para soportar el tráfico de diseño.

Este problema se ha solucionado mediante un control estricto de la humedad de compactación que debe ser la óptima indicada por el diseño, para lo cual es necesario muchas veces airear la mezcla antes de su compactación, ya que generalmente la humedad de preenvuelta es superior a la óptima.

- Pobre curando de la mezcla (pérdida de humedad desde la óptima de compactación hasta niveles del 2%-3%), antes de colocar la carpeta de concreto asfáltico sobre la base construida.

Dependiendo del clima, topografía del terreno y condiciones de tráfico hay dos soluciones:

- Una vez disgregado el material a la profundidad requerida, si ésta supera los 15 cm (como máximo) su estabilización con emulsión y compactación debe efectuarse por capas, para permitir que la primera capa que se construya tenga un buen grado de curado, antes de colocar la siguiente.
- Dejar expuesta al tráfico la capa reciclada todo el tiempo necesario para su curación, la cual depende de las condiciones climáticas, sistema que muchas veces es demorado y ante la acción del tráfico pesado la capa reciclada comienza a deteriorarse, razón por la cual es necesario protegerla con riegos ligeros de arena-emulsión.

6.4. LECCIONES APRENDIDAS.

6.4.1. De diseño de mezclas.

- El método Marshall modificado, para mezclas en frío, fue desarrollado para vías de bajo volumen de tráfico y sus criterios de evaluación de resultados son bajos para su utilización en vías de tráfico pesado.
- Se debe recurrir a otros tipos de ensayos adicionales que permite una mejor evaluación de las mezclas, como determinación de módulos de resiliencia, fatiga, resistencia al a tensión y resistencia a la compresión.
- Utilizar muestras de materiales cuya disgregación en el laboratorio sean lo más parecidas a las producidas en el campo en el proceso industrial optimizado.
- Desarrollar curvas de resistencia para diferentes estados de compactación y curado para determinar aquel contenido de asfalto óptimo para las condiciones reales de trabajo.

6.4.2 De diseño estructural.

- Que la rigidez de la capa de base asfáltica reciclada no exceda 4 a 5 veces la de la capa subyacente.
- Que los módulos de elasticidad o coeficientes estructurales de la AASHTO varía ampliamente dependiendo de factores tales como: gradación, tipo de emulsión utilizada, grado de trituración de los áridos, grado de oxidación del asfalto del pavimento reciclado, de la proporción en que intervienen los materiales de las capas de pavimento asfáltico y base o sub-base que se fresan o disgregan conjuntamente para ser reutilizadas, de sí se usan o no rejuvenecedores y de la temperatura de trabajo entre los otros.
- Que si desea emplear el método de diseño del Instituto del Asfalto, deben tenerse en cuenta otros principios generales de diseño, como los anotados anteriormente, que no son contemplados explícitamente en dicho método.
- Que la calidad de la subrasante varía generalmente a lo largo del proyecto y es necesario zonificarla, para obtener diseños de espesores acordes a ella.

6.4.3. De construcción.

- La gran dificultad que se presenta en la aplicación de este sistema en zonas de alta pluviosidad o en épocas de lluvias ya que la obtención de humedades requeridas para la elaboración y compactación de las mezclas se hace difícil obtenerlas.
- La dificultad que se presenta en el curado de la mezcla reciclada y estabilizada con emulsión en zonas húmedas y de alta y frecuente pluviosidad.

- La dificultad y demora que se presenta en el curado cuando las capas reciclada son mayores a los 15 cm.
- La dificultad y sobrecostos que se generan al construir por capas este tipo de base estabilizada, con el objetivo de lograr un buen curado, cuando el espesor total es mayor a 15 cm ante la presencia de alto tráfico y topografías montañosas.
- La buena calidad de mezclado que se obtiene cuando el proceso se efectúa en dos pasadas del equipo reciclador: una fresando o disgregando el material y otra aplicando y mezclando la emulsión.
- Para una misma velocidad de avance del equipo fresador, a mayor profundidad de corte se obtiene menor grado de disgregación de los materiales.
- Para una misma profundidad de fresado, a mayor velocidad de avance del equipo se obtiene menor grado de disgregación de los materiales.

7. ASFALTO DE ALTA PERFORMANCE PARA CARRETERAS UNA OPCIÓN DE AMPLIO GRADO PARA PAVIMENTACIÓN.

7.1 INTRODUCCIÓN.

El incremento constante de las exigencias a que son sometidos los caminos y carreteras con vistas al MERCOSUR, donde se han registrado en los últimos años fundamentales transformaciones, han motivado a los entes intervinientes en los proyectos a la búsqueda de alternativas que conduzcan a una mayor performance en al vida útil de los pavimentos asfálticos.

Hasta el momento se dispone de dos alternativas fundamentales, los asfaltos de línea tradicional provenientes de destilación directa de refinerías y los aditivados con polímeros, que presentan notables diferentes en sus características de durabilidad, pero también en sus relaciones costos-beneficios para su aplicación.

En el presente, se expone el desarrollo de un tipo de asfalto de amplio grado que cubre una mayor gama de aplicación si lo observamos desde la clasificación SEP, especialmente en cuanto se refiere a su notable estabilidad mecánica, con mejoras en mayor o menor grado de otras propiedades como son las de fatiga, agrietamiento por frío, adhesividad en mezclas, guardando al mismo tiempo una leve diferencia en su transporte, almacenamiento y trabajabilidad en obra, respecto de los asfaltos normales, dado que el mismo esta concebido en una transformación físico-química de las mismas bases asfálticas sin agregado alguno, que le confiere ciertos cambios en las propiedades reológicas, en especial a las temperaturas de trabajo de los pavimentos.

Entendiéndose que la presente puede cubrir un nicho en las necesidades de construcción de caminos y que no pretende el reemplazo de los materiales premium, sino que su aplicación deberá ser estudiada para exigencias medias o superiores, donde los materiales disponibles de líneas normales no han dado el resultado requerido, siempre atendiendo a los cálculos previos referentes a la relación costo-beneficio.

La principal característica del producto es que se trata de un asfalto «POLICONDENSADO», como se ha dado en llamarlo, por ser estas las reacciones principales que le dan origen en base a un proceso en particular, donde el uso de un reactor de última generación y ciertas reacciones químicas internas, producen un marcado cambio en las propiedades reológicas del producto final.

Cabe señalar que la experiencia en la elaboración de este tipo de asfalto data de más de 10 años, aunque los mismos fueron empleados en otros usos industriales y de construcción, pero que atendieron a un objetivo similar, el de disminuir la susceptibilidad térmica. Una amplia investigación y desarrollo han posibilitado adaptar el proceso productivo para un asfalto de aplicación en carreteras, mediante una amplia gama de ensayos que se muestran en el presente, los cuales han sido corroborados en otros laboratorios, tanto de la República Argentina como en la República Federativa del Brasil, coincidiéndose en una gran similitud de resultados, siendo el trabajo sumamente satisfactorio ya que los productos ensayados han tenido su origen en dos plantas diferenciadas en ambos países y partiendo de bases de muy diferentes crudos de origen, lo cual ha demostrado la consistencia en la calidad obtenida debido a una idéntica tecnología para su elaboración.

7.2 PARTE EXPERIMENTAL.

El trabajo se basa en un ensayo comparativo entre un asfalto Alto Índice de amplio grado con un asfalto de referencia convencional comprendidos en una faja de penetración entre 70 y 90.

Para su caracterización se efectuaron una serie de ensayos que pueden observarse en la tabla 20.

Tabla 20. Características de los asfaltos.

Ligante	Asfalto de referencia	Asfalto Alto Índice
Penetración a 25°C (100g – 5s), 0.1mm	89	71
Punto de Ablandamiento (A y E),°C	47	56.6
Índice de Penetración (Pfeiffer)	-0.5	+1.2
Ensayo de Oliensis	Negativo	Negativo
Viscosidad a 60°C, poises	2.070	9.900
Viscosidad a 135°C, centipoises	496	1180
Ensayos sobre el residuo de pérdida en película delgada (TFOT) ASTM D-1754		
Perdida de peso, %	0.0	0.0
Penetración retenida, %	71.9	74.6
Punto de ablandamiento (A yE)	52.4	60.0
Viscosidad a 60°C, poises	3.370	15.470
Índice de envejecimiento $\frac{V_{60envej.}}{V_{60orig}}$	1.63	1.56

7.2.1. Consistencia. Con el viscosímetro rotacional Brookfield se efectuaron determinación de viscosidad a distintas temperaturas y velocidades de rotación sobre el Asfalto de Referencia 70-100 y el Asfalto de Alto Índice. Del análisis de los resultados puede verificarse que el Asfalto de Alto Índice presentó un flúir complejo hasta temperaturas de 100°C, a partir de la cual comienza a comportarse como un fluido newtoniano. El Asfalto de Referencia presentó toda la faja de temperatura un flúir de tipo newtoniano.

7.2.2. Temperatura de mezclado y compactación. Con los valores obtenidos de viscosidad absoluta a diferentes temperaturas pudo obtenerse, usando gráficos adecuados, los parámetros de trabajo tanto para el mezclado como para la compactación en obra como puede observarse en la tabla 21.

Tabla 21. Temperatura de mezclado y compactación.

LIGANTE	Asfalto de referencia 70-100	Asfalto Alto Índice
Temperatura de mezclado, (2 poises)	150	172
Temperatura de compactación en obra, °C (2 a 20 poises)	82 a 110	95 a 127

7.2.3. Susceptibilidad térmica. Esta propiedad esta íntimamente vinculada al comportamiento de los asfaltos en servicio, por lo tanto las gráficas correspondientes se determinó que el Alto Índice presenta un índice de Penetración de 1.2 contra -0.5 del asfalto de referencia.

7.2.4. Módulo de Rigidez (Stiffness). De la manera usual y conocida se determinó esta propiedad obteniéndose los valores que figuran en la tabla 22.

Tabla 22. Módulo de rigidez.

LIGANTE	Asfalto de referencia	Asfalto Alto Índice
Modulo de Rigidez 0°C y 10 Hz, N/m ²	2 x 10 ⁻⁸	9 x 10 ⁻⁷
Modulo de Rigidez 60°C y 10 ⁴ Seg, N/m ²	1 x 10 ⁻¹	5 x 10 ⁻¹

7.2.5. Clasificación SEP de los ligantes asfálticos. En el sistema SUPERPAVE, desarrollo por el Strategic Highway Research Program (SHRP), se presenta una nueva especificación de ligantes asfálticos cuya singularidad reside en que la misma esta basada en el desempeño (performance). Se especifican ligantes en base al clima y en la temperatura prevista en el pavimento. Las propiedades físicas exigidas se mantienen sin cambios, pero cambia la temperatura para la cual el ligante debe cumplir esas propiedades. De acuerdo a los valores de ensayos resultantes de las distintas etapas del proceso para la determinación de Grado de Performance (Performance Grade - PG), según la especificación AASHTO MP – 1, el Asfalto de Referencia 70-100 ha quedado clasificado como PG 64-28, en tanto que para el Asfalto de Alto Índice su Grado de Performance resultó PG 76-28 (Tabla 23).

Tabla 23. Clasificación de los ligantes según SHRP.

Ligante	Asfalto de Referencia	Asfalto Alto Índice
Sobre el asfalto original		
Punto de inflamación, °C AASHTO T-48 (min.: 230°C)	326	308
Viscosidad a 135°C, Pa.s ASTM D-4402 (max.: 3 Pa.s)	0.496	1.180
Factor de ahuellamiento (s/asfalto original)		
Ensayo de corte dinámico, AASHTO TP5 G*/senδ, kPa (min.: 1.00 kPa)	1.33	1.05
Temperatura, °C	64	76
Sobre el Residuo del RTFO (AASHTO T 240)		
Perdida de masa,% (max.: 1.00%)	0.0	0.0
Factor de ahuellamiento (s/RTFO)		
Ensayo de corte dinámico, AASHTO TP5 G*/senδ, kPa (min.: 2.20 kPa)	3.01	2.67
Temperatura, °C	64	76
Sobre Residuo de Envejecimiento en PAV (100°C) (110°)		
Factor de Fisuramiento por fatiga (DSR)		
Ensayo de corte dinámico, AASHTO TP5 G*/senδ, kPa (max.: 5000 kPa)	3780	2180
Temperatura, °C	19	25
Factor de fisuración por contracción		
Reómetro de flexión (BBR), AASHTO TP1 Modulo de Rigidez, Mpa (Stiffness max.: 300Mpa)	259	172
Valor – m (mínimo:0.300)	0.340	0.309
Temperatura @ 60 segundos, °C	-28	-28
GRADO DE PERFORMANCE	PG 64 - 28	PG 76 - 28

7.3 PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS.

7.3.1 Dosificación de concreto asfáltico. Con el objeto de evaluar el comportamiento físico – mecánico de las mezclas asfálticas elaboradas con Asfaltos de Alto Índice, se dosificó un concreto asfáltico siguiendo los lineamientos del método Marshall. Se procuró que el mismo encuadrara en los escalonamientos granulométricos del Asphalt Institute para mezclas densas sometidas a tránsito pesado. Sin embargo, también se tuvo en cuenta los límites impuestos por la nueva metodología Superpave, de manera tal que la curva granulométrica obtenida se ubicara dentro de los puntos de control establecidos por Superpave y a la vez evitara pasar por la zona de restricción establecida.

La zona restringida es utilizada en Superpave para evitar mezclas bituminosas que posean una alta proporción de arena fina en relación con la arena total, y granulometrías que sigan completamente la línea de potencia 0.45 que normalmente no tienen contenidos adecuados de huecos en los áridos. Mediante este sistema se aseguró que la estructura de áridos presenten un fuerte esqueleto mineral de partículas gruesas y suficientes huecos que permitan un mayor contenido de ligante, con la finalidad de incrementar la durabilidad de la mezcla.

El concreto asfáltico se compuso con agregado pétreo granito grueso 6-20, arena de trituración granítica 0-6, arena silíceo del río Paraná y como filler, cal hidráulica hidratada, resultando el siguiente dosaje de áridos:

Agregado pétreo 6-20:	48,5%
Arena de trituración 0-6:	39,5%
Arena silíceo (Río Paraná):	10,0%

Cal hidráulica:

2,0%

7.3.2 Ensayo Marshall. Se elaboraron series de probetas Marshall con distintos porcentajes de ligantes asfálticos según la norma ASTM D – 1559, aplicando al mezclado y la compactación las temperaturas óptimas determinadas por el BTDC para obtener las viscosidades de 2 y 3 poises respectivamente. La energía de compactación fue de 75 golpes de pisón por cara. De la determinación de las propiedades físico – mecánicas de las mezclas se concluyo que el dosaje óptimo de asfalto de acuerdo al método Marshall resultó de 4,5% (Tabla 24).

Tabla 24. Propiedades físico-mecánicas del concreto asfáltico.

Ligante	Asfalto de Referencia	Asfalto de alto índice
Densidad Marshall, gr/cm ³	2.39	2.39
Densidad máxima medida (Rice), gr/cm ³	2.48	2.48
Vacíos %	3.6	3.6
Vacíos del agregado Mineral %	14.3	14.3
Relación Betún Vacíos %	75	75
Estabilidad Marshall kg	1100	1300
Fluencia mm	3.1	3.2
Relación Estabilidad / Fluencia, kg/cm	3548	4062
Estab. Residual (24h en agua a 60°C) %	93.2	93.7
Estab. Residual (48h en agua a 60°C) %	90.5	91.6
Resistencia a la tracción indirecta (RTI)		
RTI a 25°C Kg/cm ²	5.7	6.8
RTI (24h en agua a 60°C) RTI a 25°C, Kg/cm ²	5.2	6.3
Resist. A la tracción indirecta remanente, %	91.2	92.6

7.3.3. Wheel Tracking Test realizado en Argentina. Este ensayo tiene como finalidad evaluar la resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosa. El equipo consiste en una rueda de 207 mm de diámetro por 47 mm de ancho de goma maciza, cargada con 525 newtons (53,6 kg), la que se desplaza con movimiento alternativa en un recorrido de 25 cm sobre una probeta de la mezcla en estudios de 305 X 305 X 50 mm a razón de 25 ciclos por minuto (50 pasadas de rueda por minuto).

El tiempo de ensayo es de 60 minutos o hasta que se alcancen 15 mm de profundidad de ahuellamiento, los resultados del mismo [Wheel Tracking Rate (WTR) o Velocidad de Deformación] se expresa en mm/ hora, siendo definida como la razón asintótica de incremento de la profundidad de la huella con el tiempo, determinar sobre el último cuarto de la curva deformación/ tiempo, donde la misma es lineal.

El estudio se efectuó sobre mezclas del concreto asfáltico dosificado, elaboradas con Asfalto de Referencia 70-100 y Asfalto de Alto Índice, moldeadas a la densidad Marshall mediante compactador vibratorio. La temperatura de ensayo fue de 60°C y el tiempo de ensayo de 60 minutos (Tabla 25).

Tabla 25. Wheel Tracking Test.

LIGANTE	Asfalto de referencia	Asfalto Alto Índice
Velocidad de Deformación (WTR), mm/hora	0.187	0.080
Relación de Deformación (RD), mm/minuto	0.0467	0.020
Estabilidad Dinámica a 60°C, pasadas/mm	1071	2500

7.3.4. Ensayo de Abrasión sobre Mezclas Bituminosas (California Test 360).

A probetas de concreto asfáltico elaboradas con Asfalto de Referencia y Asfalto de Alto Índice se les efectuó el ensayo de abrasión California Test 360 (1978) en el cual las mismas son sometidas a la acción de 8 esferas de acero de 10 mm de diámetro y 4,5 g de peso en un agitador mecánico de 1.200 ciclos por minuto y una carrera de 25,4mm. El ensayo se efectuó bajo la acción de agua a temperaturas de 4°C y 40°C (Tabla 26).

Tabla 26. Ensayo de abrasión (California Test 360).

LIGANTE	Temp. De ensayo	Asfalto de referencia	Asfalto Alto Índice
Pérdida por abrasión, g/m ²	4°C	900	888
Pérdida por Abrasión, g/m ²	40°C	680	626

7.4. DETERMINACIÓN DE LA VIDA DE FATIGA.

El mismo se ejecutó por tracción indirecta con cargas repetidas de dos mezclas asfálticas, una de ALTO ÍNDICE y la otra de Referencia.

Las probetas a ser sometidas a este ensayo han sido seleccionadas de manera que se encuentren sus respectivas densidades próximas al conjunto del promedio de las mismas, siguiendo lo establecido por la Norma VN – 12 – 67 y ensayadas en las siguientes condiciones.

Temperatura: 25°C. tiempo de aplicación de cargas: 0,20 seg. Que corresponde a una frecuencia de 2,5 Hz. Nivel de tensiones: Variables.

La metodología de ensayos es similar a la descrita en la Norma ASTM D – 4123 «Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures».

7.5. PRUEBA DE APLICACIÓN EN RUTAS.

7.5.1. En Ruta 79 Provincia de San Luis – Argentina. A los efectos de comprobar el comportamiento del Asfalto ALTO ÍNDICE en las operaciones de transporte, mezclado con áridos, transporte del hormigón asfáltico, aplicación en ruta y su compactado, se procedió de común acuerdo con la empresa CHEDIACK S.A. en la Ruta Provincial 79 de la Provincia de San Luis (Fotografía 1), entre las progresivas del Km 30.600 hasta las del Km 31.075 por una total de 495 m. En un espesor de carpeta de 2,5 cm, quedando en el medio un tramo de unos 150m con un espesor de 4 cm. En la misma se emplearan un total de 218 tn de mezcla asfáltica.

La mezcla se realizó con los siguientes componentes:

Piedra partida basáltica	6-16 mm
Arena de trituración	0-6 mm
Fino de trituración	Malla 200
Arena fina del Río Quines	
Asfalto ALTO ÍNDICE	5,2%

El asfalto de envío desde la planta de Berisso hasta San Luis a una temperatura de 200°C, permaneció almacenado durante 6 días en tanque de obra, no registrándose ningún tipo de problema.

El trabajo se llevo a cabo a una temperatura que fue recomendada correspondiendo a equiviscosidad de 165°C, o sea para 2 Poises, unos 15°C más alto que para un 70-100 normal, no registrándose ningún inconveniente.

El transporte en volcadores, como así la alimentación a la maquina distribuidora – terminadora se efectúo sin inconveniente alguno, no produciéndose apelmazamiento o sectores de atascamiento del material, observándose que el concreto asfáltico fluía con total normalidad en todo lo ancho de la calzada.

El trabajo de las maquinas compactadas se desarrollo con toda normalidad no produciéndose corridas a los costados, pues la mezcla demostró una adecuada cohesión para la compactación.

7.5.2. En Autopistas Ezeiza Cañuelas – Camino Colector. Conjuntamente con la empresa J.J Chediak S.A. comitente de Huarte S.A. de procedió a la aplicación de una carpeta de rodamiento formulada con asfalto Alto Índice, de un ancho de 6,10 metros y un espesor de 5cm, ubicado sobre una base superior de 7 cm de espesor y una base inferior de 6 cm de espesor, ambas formulas con asfalto normal tipo 70-100 en una longitud sobre ambas manos de 435 m.

7.5.3. Evaluación de estado de pavimento Ruta 79. Luego de 6 meses de su aplicación se realizó una evaluación superficial del estado del pavimento después de haber soportado un transito de unos 1.000 vehículos por día, en un 70% pesados y transcurrido un verano con temperaturas sumamente altas, sumando a lluvias muy fuertes.

El estudio fue realizado por una prestigiosa consultora de la Argentina utilizándose equipamientos de ultima generación, consistiendo el mismo en determinaciones de:

Rugosidad

Ahuellamiento

Fisuración

Desprendimientos

Índice de estado y servicidad

Coefficiente de fricción y macrotextura

De todas las evaluaciones realizadas tanto del tramo con asfalto Alto Índice como con los 300 metros anteriores y posteriores con asfalto convencional.

Se concluye que los parámetros medidos, en general no presentan diferentes significativas, salvo el ahuellamiento donde ya se comienza a notar una sustancial diferencia.

8. INFLUENCIA DEL CONTROL DE CALIDAD EN LAS OBRAS.

8.1. INTRODUCCIÓN.

El sistema de concesión de rutas por peajes, a través de las obligaciones que emanan desde sus pliegos, a obligado a los diferentes concesiones, entre otras cosas, a optimizar al extremo sus inversiones en obras. En otras palabras, esto significa que, una vez decidida la ejecución de una obra, debe asegurarse que su comportamiento se asemeje lo más posible a aquel mediante el cual ha sido considerada dentro de un cronograma de inversiones, de modo de no producir desfasajes en el mismo (típico caso de aquellas obras en donde se hacen necesarios prematuramente, reparaciones importantes o bien excesivo mantenimiento inicial).

Esto trajo aparejado dos consecuencias que destacamos como muy importantes, y a su vez, muy bien recibidas por todo el medio técnico- vial argentino: el desarrollo tecnológico (incorporación de nuevas técnicas) y la necesidad de incrementar el control de calidad.

En este último punto se basa el presente relato.

Bien vale entonces efectuar un enfoque previo sobre el significado de lo que entendemos por calidad.

Con demasiada frecuencia, el termino «calidad» se emplea injustamente para denotar lujo y caracteres extras de un objeto, trabajo o servicio, y lleva implícito una carga de onerosidad.

Sin embargo, el término calidad, debe entenderse como «el conjunto de cualidades de un producto o servicio que hacen que el mismo satisfaga íntegramente las necesidades por las cuales alguien lo desea». Otras definiciones que persiguen el mismo significado, pero desde un punto de vista técnico son: «dar al cliente o al siguiente persona en el proceso lo que requiere, y hacer esto de tal modo que cada tarea se realice correctamente desde la primera vez», o bien «la idoneidad para un propósito definido, que es fijado por el cliente o el comitente a través de ciertas especificaciones».

Es bajo este concepto, que en general se ha dejado de lado cada vez más el control del «producto terminado» para abocarse el control de «todos los pasos que componen un proceso productivo» como metodología de aseguramiento de la calidad final. Esta afirmación amplia, que involucra a todos los que, aún mínimamente, tienen un grado de participación en el proceso, desde los máximos niveles gerenciales hasta el último operario de una empresa, e incluso a los proveedores (en el amplio significado de la palabra) de la misma.

De hecho, esto requiere una infraestructura especial, como lo es la «ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL» de la empresa, acorde al objetivo fijado, lo cual, si bien se destaca su importancia, no es motivo de este trabajo y se halla en el campo de la Administración de Empresas.

En particular, decimos que una obra, no puede ser tratada ni planificada independiente de las otras etapas que conforman su ciclo de vida, desde la concepción (idea), su ejecución, su uso y mantenimiento hasta el fin de su vida útil, y en todas esas etapas debe estar presente el control. En este aspecto, la calidad final de una obra, es el resultado de la suma de las calidades de las partes o etapas que le componen, no solo sus materiales,

sino también el proyecto (cálculos y especificaciones), la metodología de ejecución, los métodos de inspección, su documentación, etc.

Resumiendo, podemos afirmar que:

- Un buen proyecto puede ser deficientemente ejecutado.
- Una buena ejecución, no puede mejorar un proyecto deficiente.
- Materiales de abaja calidad, echan por tierra un buen proyecto, aún cuando este esté bien ejecutado.
- Un mal mantenimiento, puede malograr un buen proyecto bien ejecutado y con materiales de buena calidad.

La obtención de la calidad implica ciertos costos, que de manera resumida pueden encuadrarse en los siguientes grupos: Costo de prevención (capacitación del personal, puesta en funcionamiento de un sistema de calidad, obtención de documentación), costos de inspección y seguimiento, costo de productos defectuosos y costos de las fallas durante el uso. Estos dos últimos son más precisamente «costos de la no calidad».

Las preguntas son:

¿Cuál es la diferencia entre controlar y no hacerlo?.

¿qué, cuándo, dónde y cómo debo controlar?.

Estos cuestionamientos, los vamos a responder en términos comparativos de la evolución del Índice de estado o bien de los parámetros individuales que intervienen en su determinación, sufrida por obras de similares características, con diferentes niveles de control.

Actualmente, se realizan en forma habitual y rutinaria, un sinnúmero de ensayos o determinaciones que anteriormente no se hacían. – Lo que ha sucedido, en términos generales, es que cada vez es mayor la necesidad de predecir con más exactitud el comportamiento futuro de las obra, y por lo

tanto se ha tenido que profundizar sobre distintos aspectos.-Tanto es así, que actualmente, se están implementando diversas especificaciones presentes en normas de otros países, cuando no, se solicita el cumplimiento de determinadas características o cualidades, en base a la propia experiencia, ya que algunos aspectos pueden no ser contemplados en las reglamentaciones conocidas.

A continuación, se analizarán obras ejecutadas en distinta época, realizadas con diferentes técnicas, haciendo hincapié en los grados progresivos de implementación de diversos tipos de controles, como así también las causas que los mantuvieron, y la comparación de IE y sus respectivos parámetros (estado antes y después de la obra y evoluciones a través del tiempo).

Se analizará una serie de obras, agrupadas según la técnica aplicada.

Es este caso, serán obras de: TEXTURIZADO, CARPETA DE CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO EN CALIENTE Y CARPETA DE CONCRETO ASFÁLTICO CONVENCIONAL.

8.2. ANÁLISIS COMPARATIVO.

8.2.1. Obras de texturizado. Teniendo en cuenta que este tipo de trabajo, acompañamientos de obras de lechadas, tiene como objetivo, la eliminación de las deformaciones transversales y la restitución de la superficie de rodamiento, veremos los resultados obtenidos en cuatro tramos intervenidos, en términos de AHUELLAMIENTO Y RUGOSIDAD:

TRAMO 1: En este caso, la falta de experiencia en el manejo de equipos y la carencia de normas y especificaciones que condicionaran este tipo de trabajos, impidió que se obtuvieran los resultados esperados.

Se desprende de ello que se ha conseguido una leve mejora en cuanto a las huellas, a costa del grave deterioro de la deformación longitudinal.

TRAMO 2: Este tramo fue ejecutado en forma simultánea con el anterior, y por lo tanto, tuvo las mismas falencias.

TRAMO 3: En función de la mala experiencia recogida tras la ejecución del texturizado en los tramos mencionados anteriormente, se procedió a implementar una serie de medidas tendientes a revertir la situación.

Primeramente se procedió a relevar el estado del ahuellamiento en todo el tramo, a efectos de racionalizar el trabajo. Una vez definidos los sectores a intervenir, se efectuó una nivelación previa, y mediante la utilización de un software desarrollo a tal fin se definieron los espesores de corte y las pendientes a aplicar en cada perfil, compatibilizándolos, fraccionando el análisis en cámaras cerradas de longitudes predeterminadas.

Este avance en el campo de los estudios previos, se complementó con la implementación en los equipos, de sistemas automáticos de control transversal y correctores longitudinales de longitud mínima establecida.

Dado que con esta medidas se esperaba superar los inconvenientes sufridos en los tramos anteriores, y en virtud de que la superficie texturizada quedaba a la espera de la aplicación de una lechada o microaglomerado, se trató de mejorar la calidad de esa superficie, acondicionando el tambor fresado, cada vez que, de manera visual, se detectaban irregularidades.

Se verificó, de manera indirecta, el cumplimiento del proyecto de texturizado, comparando la cantidad de RAP generada, respecto de la prevista.

TRAMO 4: En el tramo anterior se trabajó con la hipótesis de huella remanente igual a cero. Siguiendo la política de optimización de resultados, en este tramo, se pensó en el momento de proyecto, de trabajar a huellas remanentes controladas (inferiores a determinado valor).

El hecho de trabajar bajo esta hipótesis, trajo aparejada la necesidad de un mayor control a fin de asegurar el estricto cumplimiento del proyecto, al haberse reducido al mínimo los márgenes de error.

La verificación del cumplimiento del proyecto, se complementó con la nivelación y medición de eventuales huellas remanentes inmediatamente atrás del equipo texturizador.

Evitando sucesivamente detenciones o bruscas variaciones de velocidad del equipo colaboraron en la obtención del objetivo propuesto.

Para la ejecución de este trabajo, se contó por vez primera con un Pliego de especificaciones técnicas, desarrollado por Servicios Viales, en el cual se contemplan los relevamientos previos, el procesamiento de los datos, la metodología constructiva, las características que deben reunir los equipos a utilizar, los controles durante la ejecución, y las condiciones de recepción de los trabajos. En particular sobre este último aspecto, se destacan las exigencias en cuanto a: CALIDAD Y UNIFORMIDAD DE LA TEXTURA PROVOCADA, PERFILES TRANSVERSALES, RUGOSIDAD, LINEALIDAD DE ESTRIAS, CALIDAD DE FRESADO GENERADO Y LIMPIEZA DE SUPERFICIE.

En cuanto al control de la regularidad superficial, se pasó de la mera observación visual a la implementación del ensayo de «Parche de Arena», para la determinación de la macrotextura.

La evolución de los controles gradualmente implementados, se resume en la Tabla 27.

8.2.2. Carpeta de concreto asfáltico reciclado en caliente. A diferencia del tipo de obra considerado en el punto 8.2.1, en este caso interviene un proceso de elaboración y colocación de un producto destinado a mejorar las condiciones estructurales y de servicialidad de un determinado tramo. En virtud de ello, el análisis comparativo se realizará en términos de Índice de Estado (pre-existente, la alcanzado y evolución) y de las variaciones porcentuales de diversas características de la mezcla obtenida.

TRAMO 1: Esta fue la primer obra de reciclado en caliente ejecutada por Servicios Viales.

Al igual que en el TRAMO 1 de texturizado, la falta de experiencia, carencia de normas, especificaciones y elementos de control, hicieron que el tramo intervenido no modificara sustancialmente su Índice de Estado. Además las variaciones de los parámetros considerados en la caracterización del a mezcla asfáltica, se encuentran en los valores más altos, en el conjunto de obras analizadas.

Los estudios previos fueron muy escasos, e incluso muy por debajo del nivel mínimo exigido actualmente, agravado esto por la poca importancia que en su momento se les asignó.

En este caso, no se ejecutó bacheo previo y, al haberse empleado un tren de reciclado, no se pudo realizar un sellado de las fisuras pre-existentes que se desarrollaban a profundidades superiores al espesor reciclado.

La fresa y la terminadora, carecían de controles automáticos.

Los controles de proceso fueron escasos y sólo se obtuvieron datos de producto terminado, incluso algunos no de manera inmediata. Por lo tanto las posibilidades de corrección, eran limitadas.

Tabla 27. Evolución de los controles gradualmente implementados

TEXTURIZADO – Planilla de Evolución de Controles				
	Obra 1	Obra 2	Obra 3	Obra 4
TOPOGRAFÍA	No se aplicó	No se aplicó	Nivelación Previa. Perfiles C/25/50m. Proyecto de texturizado: -Resolución en cámaras de 250/500 m. -Corrección de gálibo por variación de pendiente y espesores de corte.	Nivelación previa Perfiles c/25/50/m. Proyecto texturizado -Resolución en cámaras de 250/500m. - Corrección de gálibo por Variación de pendiente y Espesores de corte.

			-Software. Medición ahuellamiento previo. Previsión RAP a obtener. Cierre volumétrico de RAP	-Software. Medición ahuellamiento previo. Previsión RAP a obtener. Nivelación posterior. Medición ahuellamiento posterior. Cierre volumétrico de RAP
Especificaciones	No	No	Instructivos	P.G.E.T.O. (SV)
EQUIPOS CON CONTROLES AUTOMÁTICOS	En espesor de corte. Variación manual de pendientes. Lecturas en nivel de agua.	En espesor de corte. Variación manual de pendientes . Lecturas en nivel de agua.	En espesor de corte y corrección longitudinal con patín (long: 6 m. Min). Control transversal automático. Lectura digital.	En espesor de corte y corrección longitudinal con patín (long: 6 m. Min). Control transversal automático. Lectura digital.
CONTROL DE MACROTEXTU	No se aplicó	No se aplicó	Ajuste de tambor	Ajuste de tambor

RA			fresador: Paso, altura, alineación de puntas. Velocidad de avance constante	fresador: Paso, altura, alineación de puntas. Velocidad de avance constante. Control con A.A.V. (parche de arena)
----	--	--	---	--

TRAMO 2: A pesar de emplearse una planta ambuloperante, se ejecutan previamente, trabajos de topografía que tienden a controlar la dosificaciones de los agregados de la mezcla (previsión del fresado a generar), y los parámetros geométricos (espesores y pendiente en la fresa y en la terminadora). Además se implementa la ejecución de bacheos previos, detectados mediante regla de Benkelman.

Los materiales ingresados permanecen con escasos controles y comienza a hacerse uso de asesoría externa.

En esta caso, se sistematizan los controles básicos de proceso, obteniéndose resultados con mayor agilidad.

A partir de esta obra, se cuenta con un laboratorio al pie de la obra, y un laboratorio central, los cuales, si bien equipados básicamente, permiten la realización de un doble control. A diferencia del tramo analizado anteriormente (en el cual la obra ejecutada no modificó el IE), en este, se

experimento un importante aumento relativo del IE el cual decayó abruptamente al cabo de un año es servicio.

Las variaciones en los resultados de ensayos se mantuvieron en el orden de las del tramo anterior.

TRAMO 3: se hizo un uso intensivo de asesoría técnica especializada desde la etapa del proyecto, (para lo cual se realizaron diversos estudios previos a nivel de caracterización de la mezcla de la carpeta a reciclar, capas componentes de la estructura, estudio deflectométrico, sondeos con DCP, estado superficial) abarcando la ejecución misma de la obra.

Se desestima por completo la utilización del tren de reciclado, y se implementa el uso de la planta fija. Esto permite el acopio diferencial del RAP, según sus características (granulometría, % C.A y viscosidad) y por consiguiente, una manejo racional en las dosificaciones, complementado con el uso de un agente rejuvenecedor.

Se sistematiza el control en el ingreso de materiales.

Surgen las primeras recomendaciones a cumplir por las mezclas, los materiales y los procesos constructivos.

En el bacheo previo, se controlan las capas granelares mediante el empleo del DCP, y la densidad de las capas asfálticas. Se da un tratamiento de sellado a las fisuras, en base a un instructivo. Se emplea el patín largo en la terminadora, para la corrección del perfil longitudinal.

Como resultado de esta intervención, se obtuvo una modificación del valor de IE a mejor valor absoluto, y una pendiente suavizada en la evolución al cabo de 2 años en servicio.

Los valores de variación porcentual de los resultados de ensayos se vieron sensiblemente reducidos, respecto de los tramos anteriores.

TRAMO 4: En este tramo, se mantuvo el servicio de la asesoría técnica plena, con un mayor seguimiento de las distintas etapas del proceso.

Se estudia en detalle las características de los materiales, en particular el Rap, que se administra con mayor precisión, imponiéndose a partir de esta obra límites mas estrictos para aceptarlos como reciclable.

Se amplía la cantidad de ensayos sobre el concreto asfáltico, lo que obliga a la sofisticación del equipamiento del laboratorio, tanto al pie de la obra, como en el laboratorio central. Se aplica estrictamente el doble control.

La elaboración de la mezcla en planta fija con características particulares para este tipo de trabajos, que asegura el secado de los materiales en forma indirecta evita mayores alteraciones en la viscosidad del asfalto del RAP.

En el proceso constructivo se implementa sistemas de control automático transversal, con lectura digital, y las correcciones del tambor fresador contribuyen a la obtención de una superficie mas uniforme.

Como se puede observar en el gráfico comparativo, se mejoran significativamente los valores relativos del I.E. alcanzándose un mejor valor absoluto que se mantuvo incluso después de dos años en servicio.

Las variaciones porcentuales de los parámetros de control de la mezcla se ven sensiblemente reducidos.

TRAMO 5: Vistas las experiencias recogidas, a partir de este tramo se establecen específicamente en particular para este tipo de trabajos (que se integran a la 2ª versión del P. G. E. T. SV), que contemplan todas las etapas de la obra desde los estudios previos indispensables hasta la recepción de los trabajos, inclusive todo el proceso constructivo.

A partir de los instructivos aplicados en obras anteriores, los trabajos de tratamiento de fisuras con la técnica de puenteado es reforzado con exigencias específicas para los materiales y equipos a emplear.

Se amplían los controles en la recepción de los materiales que permiten modificaciones en las dosificaciones a fin de mantenerse la mezcla de referencia que se aplica a partir de este tramo.

El I.E alcanza un valor superior respecto de los anteriores y mantiene una mejor performance luego de dos años en servicios.

Los parámetros de control de la calidad de la mezcla se ven reducidos al mínimo.

En la tabla 28 se resume esquemáticamente la evolución de los niveles de control aplicados gradualmente para esta técnica.

Tabla 28. Reciclado, planilla de evolución de control.

	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5
FRESADO	Evolución del Sistema de Control similar de Texturizado- Ver tabla 1				
Método Constructivo	Planta Móvil	Planta Móvil	Planta fija	Planta fija	Planta fija
BACHEO PREVIO	No se ejecutó	Detección de baches mediante de regla Benkelman paso de camión cargado	Detección de baches mediante de regla Benkelman. Control de capas granulares con DCP. Control densidad en capas asfálticas.	Detección de baches mediante de regla Benkelman paso de camión cargado. Control densidad en capas asfálticas. Mejoramiento base de asiento.	Detección de baches mediante de regla Benkelman paso de camión cargado. Control densidad en capas asfálticas. Mejoramiento base de asiento.
SELLADO DE FISURAS	No se ejecutó.	No se ejecutó.	Con emulsión + cal.	Con C.A. + cal.	Con C.A.M.P. Equipo sellador lanza termoneumática
CONTROL ELECTRÓNICO	No	No	P/espesor de capa + corrección longitudinal	P/espesor de capa + corrección longitudinal	P/espesor de capa + corrección longitudinal

			mediante patín largo (long min = 6m). Variación de pendiente manual. Lectura mediante nivel de agua.	mediante patín largo (long min = 6m). Control transversal automático. Lectura digital.	mediante patín largo (long min = 6m). Control transversal automático. Lectura digital.
ESPECIFICACIONES	Sin especificaciones.	Sin especificaciones.	Especificaciones complementarias.	Especificaciones complementarias.	Especificaciones complementarias. Pliego de Esp. Téc.Grales p/Obras-SV (2º versión)
LABORATORIO	Ingreso materiales: ARIDOS, muy escaso. C.A.: viscosidad. P.A. – Penetración.	Ingreso materiales: ARIDOS, muy escaso. C.A.: viscosidad. P.A. – Penetración.	Ingreso materiales: ÁRIDOS.: Granulom (sistemático) C.A.: visc. P.A. – Penet. (sistemático) R.A.P.: Viscosidad	Ingreso materiales: ARIDOS.: Granulom (sistemático) C.A.: visc. P.A. – Penet. (sistemático) R.A.P.: Viscosidad	Ingreso materiales (100% sistemático) ARIDOS.: Granulom Desgaste-Adherencia C.A.: visc. P.A. – Penet.

	<p>Mezcla= 1 muestra c/300 tn.</p> <p>Recuperación (%C.A. – granul – viscosidad).</p> <p>Marshall.</p> <p>Camino: densidades c/250m.</p>	<p>Mezcla= 1 muestra c/300 tn.</p> <p>Recuperación (%C.A. – granul – viscosidad).</p> <p>Marshall.</p> <p>Camino: densidades c/250m.</p>	<p>Acopio diferencial % de asfalto (verificaciones).</p> <p>Mezcla= 1 muestra c/225tn.</p> <p>Recuperación (%C.A. – granul – viscosidad).</p> <p>Marshall.</p> <p>Camino: densidades c/250m.</p>	<p>Acopio diferencial % de asfalto (sistemático). Granulometría (sistemático)</p> <p>Mezcla= 1 muestra c/280 tn</p> <p>Recuperación (%C.A. – granul – viscosidad – trampa de agua).</p> <p>Marshall – Rice</p> <p>Estabilidad residual</p> <p>Camino: densidades c/250m.</p>	<p>R.A.P.: Viscosidad Acopio diferencial % de asfalto. Granulometría</p> <p>Mezcla= 1 muestra c/280 tn.</p> <p>Fórmula de Obra. Recuperación (%C.A. – granul – viscosidad - trampa de agua).</p> <p>Marshall– Rice</p> <p>Estabilidad residual</p> <p>Camino: densidades c/250m.</p>
CONSULTORIA	No	Escasa	Estudio previo:	Estudio previo:	Estudio previo:

			Muestreo (Grankul- %CA-Visc. Determinación capas componentes. Deflexiones – DCP tránsito Modelización estructural. Relevamiento de fisuras exist. Instructivo p/tratamiento de fisuras. Instructivo p/tratamiento de baches. Seguimiento de obra	Muestreo (Grankul- %CA-Visc. Determinación capas componentes. Deflexiones – DCP tránsito Modelización estructural. Relevamiento de fisuras exist. Instructivo p/tratamiento de fisuras. Instructivo p/tratamiento de baches. Seguimiento de obra	Muestreo (Grankul- %CA-Visc. Determinación capas componentes. Deflexiones – DCP tránsito Modelización estructural. Relevamiento de fisuras exist. Instructivo p/tratamiento de fisuras (sellado por puenteado + CAMP + lanza) Instructivo p/tratamiento de baches. Seguimiento de obra (sistemático).
--	--	--	--	--	--

8.2.3. Carpeta de concreto asfáltico convencional. Con el mismo concepto enunciado en la técnica desarrollada en el punto 8.2.2, también aquí el análisis comparativo se realizará en función de los valores de I.E (preexistente, alcanzado y su evolución) y de las variaciones porcentuales de las características de la mezcla asfáltica.

Es importante destacar, que a partir de un momento determinado, Servicios Viales ha optado para la ejecución de los trabajos una fuerte política de tercerización. En este caso, todas las obras analizadas han sido subcontratadas a terceros. La evolución en cuanto a las exigencias previstas para los trabajos en los pliegos, apuntan a inducir en cada una de las empresas contratadas el desarrollo de un sistema de AUTOCONTROL, aunque en una primera lectura se pueda desprender un carácter punitivo.

Debemos destacar que Servicios Viales ha tercerizado la ejecución de los trabajos, pero se ha reservado para sí la imposición de las especificaciones que rigen los trabajos y el método de control.

Al momento de decidir la ejecución de la obra en el primer tramo considerado, (TRAMO 1), se observó que el conjunto de normativas vigentes, no cubría el total de las exigencias que, en ese entonces se consideraban necesarias. Esto generó la creación de un conjunto de especificaciones, que complementándose con aquellas se resumieron en lo que fue la primera versión del P. G. E. T. O de SV.

Durante el desarrollo de esta obra, se vislumbran nuevas necesidades de imposición de exigencias y controles. Sumando a esto, surgen (para la obra del TRAMO 2) otro tipo de tareas que deben especificarse, dando lugar entonces a la segunda versión del mencionado Pliego.

En la obra del TRAMO 3, a pesar de iniciarse los trabajos con las exigencias de la 2º versión del Pliego, se impusieron al comienzo una importante cantidad de especificaciones complementarias, muchas de las cuales recogían experiencias y normativas internacionales. Junto con ellas, durante el desarrollo de la obra fueron surgiendo diversas instrucciones y recomendaciones. Todo esto, al momento de lanzarse la construcción del TRAMO 4, integraron lo que fue la 3º versión del Pliego.

En la obra del TRAMO 5, en ejecución a la fecha, se vienen dando nuevas necesidades que van acompañadas de la correspondiente generación de una nueva especificación complementaria y que, seguramente desembocará en una actualización de la última versión del Pliego.

La utilización de asesoría técnica especializada, fue cada vez mayor, cuanto mayores eran nuestros requerimientos, a fin de reducir a la mínima expresión el campo de las indeterminaciones y las imprevisiones.

Actualmente, esto se traduce en un proceso altamente interrelacionado y retroalimentado, en el cual se complementan los conocimientos técnicos, con la detección y resolución de problemas que a diario se dan durante la ejecución misma de los trabajos.

En tal sentido, podemos decir que, el asesoramiento técnico especializado, tuvo participación desde la ejecución de las obras en los tramos 1, 2 y 3, destacándose una creciente rigurosidad en cuanto a los estudios previos para elaborar el proyecto, en la generación de nuevas exigencias que guíen los procesos constructivos y en el seguimiento posterior de la obra en servicio.

A partir de la ejecución del TRAMO 4, se intensifican aún más los trabajos de estudios previos, aumentando la frecuencia de los relevamientos sobre calzada y estructura subyacente (incluso incorporan nuevas técnicas).

En el TRAMO 5, los estudios previos alcanzaron no sólo la calzada, sino también el resto de la zona de camino (banquinas, zona marginal, identificación de zonas anegables, relevamiento de napa freática, etc.).

En lo que se refiere a trabajos previos, podemos mencionar lo siguiente:

Para sellado de fisuras, en los cinco tramos se utilizó C. A. M. P., pero se fue mejorando la performance de los equipos utilizados, llegando a los más especificados.

En cuanto al bacheo, si bien en los cinco casos, se controlaron las capas granulares con el DCP, fue ganando lugar paulatinamente la necesidad de correlacionar este parámetro, con la densidad lograda, y el VSR.

Las capas ligadas se controlaron por densidad en todos los casos.

La recuperación de gálibo mediante fresado, tuvo la misma evolución se detalla en las obras de texturizado, observándose en el caso del TRAMO 5, los trabajos previos de topografía permitieron combinar esta técnica (fresado) con la de relleno de huella.

En los trabajos de ensanche, presentes en los TRAMOS 2, 3 y 5, fue muy notoria la evolución experimentada en cuanto a sondeos previos, controles y seguimiento, desde extremo en el TRAMO 2 (con escasa rigurosidad) hasta la situación actual en el TRAMO 5.

En el control de calidad de mezclas, materiales y carpeta, se experimentó una evolución continua e importante, durante todo el período de análisis, cuyo último escalón se detalla a continuación:

- Recepción de materiales: para todos los materiales intervinientes, se exige la presentación de una muestra de referencia, con sus respectivos protocolos de ensayos del fabricante y/o proveedor, verificaciones realizadas en organismos técnicos reconocidos, y sobre cuyos valores, se establecen los entornos de aceptación.

En el caso de los agregados, se efectúan controles de granulometría, forma, desgaste, adherencia, polvo adherido, equivalente arena, sistemáticamente. En el caso particular del agregado grueso, se exige su provisión en 2 cortes.

La recepción en obra del cemento asfáltico se realiza por penetración y punto de ablandamiento con inmediata verificación de viscosidad, ductilidad y envejecimiento en horno de película delgada.

Al C. A. M. P., se le efectúan ensayos de recuperación elástica, punto de ablandamiento y carga mineral.

Para los riesgos de liga, se utiliza de manera excluyente emulsión asfáltica, a la cual se le determina previo a su uso, el residuo asfáltico, sobre el asfalto base, viscosidad y punto de ablandamiento, mientras que la efectividad de la liga es verificada mediante un ensayo de tracción directa cuya especificación se basa en una exigencia de una entidad privada extranjera.

- Control de la mezcla: De la misma manera que en el caso de los materiales, se exige una presentación de la fórmula de la mezcla a utilizar, en donde consten los resultados de los ensayos que den estricto

cumplimiento al las especificaciones del Pliego. Sobre esa fórmula de obra y valores característicos, se fijan entornos de aprobación.

A partir de la obra del TRAMO 3, se comenzaron a utilizar los criterios granulométricos del S. H. T. P.

Los ensayos de rutina sobre la mezcla asfáltica, son los siguientes: Determinación del contenido de asfalto, y granulometría, (utilización de trampa de agua y centrífuga para uso medicinal), sobre el asfalto recuperado: viscosidad, punto de ablandamiento, penetración, ductilidad, ensayo Marshall completo con determinación de estabilidades residuales en probetas moldeadas al 100% y al 98% de la densidad Marshall, ensayo de densidad absoluta y determinación de vacíos en la mezcla y VAM, y verificación de la relación filler-betún. En el momento preciso de la elaboración en planta, se verifica que no se sobrepasen los límites de temperatura, no solo en los materiales intervinientes y en la mezcla, sino el gradiente entre agregados y ligante, a efectos de disminuir el choque térmico, que puede alterar prematuramente el asfalto.

- En la capa de repavimentación: Se determina densidades logradas y el cumplimiento del esquema de compactación previamente adoptado.

También y de manera sistemática, se realizan mediciones de macro y microtextura (círculo de arena y péndulo del TRRL), macrotextura remanente (directamente relacionado a búsqueda de alternativas para atacar la problemática de la adherencia neumático - calzada), verificación de módulo dinámico y mediciones parciales de rugosidad longitudinal.

- En los trabajos previos (en particular ensanches): Para definir el tipo de intervención en cada tramo de ensanches a ejecutar, se ejecuta un cateo

previo cada 500 metros, a fin de determinar constantes físicas y humedad natural de los suelos, y en los caos que es necesario, punto de fijación de cal, proctor, VSR e hinchamiento.

En la etapa constructiva, a la base de asiento y a la subrasante (suelo - cal) se le efectúan determinaciones del grado de densificación del VSR, densidad máxima, humedad óptima, hinchamiento, y certificación de las constantes físicas del suelo interviniente en la mezcla, para finalizar con la determinación de las densidades logradas.

Tabla 29. Concreto asfáltico convencional. Planilla de evolución de control.

CONVEN.	Tramo1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5
TRABAJOS PREVIOS					
BACHEO	Detección: Camión cargado. Base de asiento: DCP. Estabilizado Granular: DCP. Concreto Asfáltico: Densidad de la capa. Perímetro definido con punta plana. Terminación	Detección: Camión cargado. Base de asiento: DCP. Estabilizado Granular: DCP. Concreto Asfáltico: Densidad de la capa. Perímetro definido con punta. Terminación	Detección: Benkelman y Camión cargado. Base de asiento: DCP. Estabilizado Granular: DCP- densidad. Concreto Asfáltico: Densidad de la capa. Perímetro definido por fresado.	Detección: Benkelman y Camión cargado. Base de asiento: DCP. Estabilizado Granular: DCP- densidad CBR Concreto Asfáltico: Densidad de la capa. Perímetro definido con punta plana.	Detección: Benkelman y Camión cargado. Base de asiento: DCP. Estabilizado Granular: DCP – densidad CBR Concreto Asfáltico: Densidad de la capa. Perímetro definido por

	superficie.	superficie.	Terminación superficie.	Terminación superficie.	fresado. Terminación superficie.
TRATAMIENTOS DE FISURAS	Con C. A. M. P.	Con C. A. M. P.	Con C. A. M. P. Equipo sellador. Lanza termoneumática	Con C. A. M. P. Equipo sellador. Lanza termoneumática	Con C. A. M. P. Equipo sellador. Lanza termoneumática
RECUPERACIÓN DE CÁLIDOS	Fresado	Fresado	Fresado	Fresado	Fresado Rellenmo de huellas.
ENSANCHES			Eliminación de bordes parcial. Junta escalonada – parcial Base de asiento: - DCP Subrasante Suelo Cal. - DCP		Eliminación de bordes. Junta escalonada. Cateos c/500m. -Clasificación de suelos. -Fijación de cal. -Proctor-CBR-hincham. Base de asiento: -Densidad-humedad. -I.P. c/500m. Subrasante Suelo Cal.

		Base suelo aena – cal: Densidades c/200 m. Base Concreto asfalt. - Densidades c/100m.	Densidad Base suelo aena – cal: Densidades c/100 m. Resistencia compresión Base Concreto asfalt. - Densidades c/100m.		-Proctor-CBR-hincham -Densidad – humedad. I.P. c/500m. Base Estabilizado: -Muestra de refer.- entonos - Granulometrías - Proctor - CBR - Hincham – Densidad - humedad. - I. P de suelo cal. Base concreto asfált. - Densidades c/100m.
REPAVIMEN T.	TOPOGRAFÍA: -Revelamiento Previo -Proyecto espesores y pend. -Control posterior.				TOPOGRAFÍA: -Revelamiento Previo. -Proyecto espesores y pend. -Control posterior.
EQUIPOS	Terminadora:	Terminadora:	Terminadora:	Terminadora:	Terminadora:

	Controles electrónicos en espesor de capa y corrección longitudinal con patín (6 m. Mín.) Control transversal Automát.. Avance y alimentación ctte. Precompactación. Compactación: aplanadora vibrante frecuencia e intensidad variabl. Tramo de prueba.	Controles electrónicos en espesor de capa y corrección longitudinal con patín (6 m. Mín.) Control transversal Automát.. Avance y alimentación ctte. Precompactación. Compactación: aplanadora vibrante frecuencia e intensidad variabl. Tramo de prueba.	Controles electrónicos en espesor de capa y corrección longitudinal con patín (6 m. Mín.) Control transversal Automát.. Avance y alimentación ctte. Precompactación. Compactación: aplanadora vibrante frecuencia e intensidad variabl. Tramo de prueba.	Controles electrónicos en espesor de capa y corrección longitudinal con patín (6 m. Mín.) Control transversal Automát.. Avance y alimentación ctte. Precompactación. Compactación: aplanadora vibrante frecuencia e intensidad variabl. Tramo de prueba.	Controles electrónicos en espesor de capa y corrección longitudinal con patín (6 m. Mín.) Control transversal Automát.. Avance y alimentación ctte. Precompactación. Compactación: aplanadora vibrante frecuencia e intensidad variabl. Tramo de prueba.
ESPECIFICA C.	P.G.E.T. – SV (1° vers.) Especif. Complem.	P.G.E.T. – SV (2° vers.) Especif. Complem.	P.G.E.T. – SV (2° vers.) Especif. Complem.	P.G.E.T. – SV (3° vers.) Especif. Complem.	P.G.E.T. – SV (3° vers.) Especif. Complem.
LABORATORIO	Ingreso de materiales	Ingreso de materiales: (100%	Ingreso de materiales: (100%	Ingreso de materiales: (100%	Ingreso de materiales: (100%

	<p>ARIDOS:</p> <p>- Granulometrías</p> <p>Cto. Asfáltico:</p> <p>Viscosidad</p> <p>-P.A.</p> <p>-Penetración</p> <p>C.A.M.P.:</p> <p>Recuperac.</p> <p>Elast. – P.A.</p> <p>Emulsión:</p> <p>Residuo Asfáltico %</p> <p>Mezcla: 1 muestra c/170 tn Fórmula de</p>	<p>sistemático)</p> <p>ARIDOS:</p> <p>- Granulometrías</p> <p>-Desgaste</p> <p>Cto. Asfáltico:</p> <p>Viscosidad</p> <p>-P.A.</p> <p>-Penetración</p> <p>Película delgada.</p> <p>C.A.M.P.:</p> <p>Recuperac.</p> <p>Elast. – P.A.</p> <p>Emulsión:</p> <p>Residuo Asfáltico %</p> <p>Mezcla: 1</p>	<p>sistemático)</p> <p>ARIDOS:</p> <p>- Granulometrías</p> <p>-forma –</p> <p>Desgaste –</p> <p>aherencia –</p> <p>Fracc. Gruesa en dos cortes. –</p> <p>Equiv. arena</p> <p>Cto. Asfáltico:</p> <p>Viscosidad</p> <p>-P.A.</p> <p>-Penetración</p> <p>-Ductividad</p> <p>Película delgada.</p> <p>C.A.M.P.:</p> <p>Recuperac.</p> <p>Elast. – P.A.</p> <p>Emulsión: (Asfalto base)</p> <p>Residuo</p>	<p>sistemático)</p> <p>ARIDOS:</p> <p>- Muestra de refer. – entornos</p> <p>- Granulometrías</p> <p>- forma –</p> <p>Desgaste –</p> <p>aherencia –</p> <p>Fracc. Gruesa en dos cortes. –</p> <p>Equiv. arena</p> <p>Cto. Asfáltico:</p> <p>Viscosidad</p> <p>-P.A.</p> <p>-Penetración</p> <p>-Ductividad</p> <p>Película delgada.</p> <p>C.A.M.P.:</p> <p>Recuperac.</p> <p>Elast. – P.A.</p> <p>resudio carga mineral.</p>	<p>sistemático)</p> <p>ARIDOS:</p> <p>- Muestra de refer. – entornos</p> <p>- Granulometrías</p> <p>- forma</p> <p>-Desgaste</p> <p>aherencia</p> <p>-Fracc. Gruesa en dos cortes.</p> <p>-Equiv. Arena.</p> <p>- Relac. Vía seca/vía húmeda</p> <p>- Polvo adherente</p> <p>Cto. Asfáltico:</p> <p>Viscosidad</p> <p>-P.A.</p> <p>-Penetración</p> <p>-Ductividad</p> <p>Película delgada.</p> <p>C.A.M.P.:</p> <p>Recuperac.</p> <p>Elast. – P.A.</p> <p>resudio carga mineral.</p>
--	---	---	--	--	---

	<p>Obra:</p> <p>Recuperación:</p> <p>% C.A. – granulom.- relac.</p> <p>Filler/betun VAM- viscosidad- Trampa de agua- Marsall – Rice Estabilidad residual a 100% densidad</p> <p>Camino: - densidades (98% min) – macrotextura (AAV) -rugosidad</p>	<p>muestra c/170 tn Fórmula de Obra:</p> <p>Recuperación:</p> <p>% C.A. – granulom.- relac.</p> <p>Filler/betun VAM- viscosidad- Trampa de agua- Marsall – Rice Estabilidad residual a 100% densidad</p> <p>Camino: - densidades (98% min) – macrotextura (AAV) -rugosidad</p>	<p>Asfáltico % Viscosidad – P.A.</p> <p>Mezcla: 1 muestra c/170 tn Fórmula de Obra:</p> <p>Dosificación SHPR – entornos Recuperación: % C.A. – granulom.- relac.</p> <p>Filler/betun VAM- viscosidad- Trampa de agua- Marsall – Rice Estabilidad residual a 100%y 98% desidad</p> <p>Camino: - densidades (98% min) – macrotextura</p>	<p>Emulsión: (Asfalto base) Residuo Asfáltico % Viscosidad – P.A. riego: Ens. Tracción.</p> <p>Mezcla: 1 muestra c/170 tn Fórmula de Obra:</p> <p>Dosificación SHPR – entornos Recuperación: % C.A. – granulom. VAM- viscosidad- Trampa de agua- Marsall – Rice Estabilidad residual a 100% y 98% desidad</p> <p>Camino: - densidades (98% min) –</p>	<p>Emulsión: (Asfalto base) Residuo Asfáltico % Viscosidad – P.A. Riego: Ens. Tracción. Mezcla: 1 muestra c/170 tn Fórmula de Obra:</p> <p>Dosificación SHPR – entornos Recuperación: % C.A. – granulom.- relac.</p> <p>Filler/betun VAM- viscosidad- Trampa de agua- Marsall – Rice Estabilidad residual a 100% y 98% desidad</p>
--	--	--	--	---	--

			(AAV) – microtextura (TRRL) -rugosidad	macrotextura (AAV) – microtextura (TRRL) -verif. módulo -rugosidad	Camino: - densidades (98% min) – macrotextura (AAV) – microtextura (TRRL) -verif. módulo -rugosidad -macrotextura Reman. (6 meses)
CONSULTO RIA	Análisis de antecedentes: Estructura existente Tránsito Estado superf.calzada I.E. – evolución Estudios realizados: -Sobre calzada Sistematico Deflex. (Benkelman - KUAB) Movimiento	Análisis de antecedentes: Estructura existente Tránsito Estado superf.calzada I.E. – evolución Estudios realizados: -Sobre calzada Sistematico Deflex. (Benkelman)	Análisis de antecedentes: Estructura existente Tránsito Estado superf.calzada I.E. – evolución Estudios realizados: -Sobre calzada Sistematico Deflex. (Benkelman - KUAB)	Análisis de antecedentes: Estructura existente Tránsito Estado superf.calzada I.E. – evolución Estudios realizados: -Sobre calzada Sistematico – tramos test. Deflex. (Benkelman) Movimiento	Análisis de antecedentes: Estructura existente Tránsito Estado superf.calzada I.E. – evolución Estudios realizados: -Sobre calzada Sistematico – tramos test. Deflex. (Benkelman)

	<p>relativo losas</p> <p>Perforaciones con caladora DCP</p> <p>Caracterización capas ligadas</p> <p>Modelización estructural.</p> <p>Calculo de esfuerzo estimación de vida útil.</p> <p>Dimensionamiento.</p> <p>Preparación de la superficie.</p>	<p>Perforaciones con caladora DCP</p> <p>Caracterización capas ligadas</p> <p>Modelización estructural.</p> <p>Calculo de esfuerzo estimación de vida útil.</p> <p>Dimensionamiento.</p> <p>Preparación de la superficie.</p>	<p>Perforaciones con caladora DCP</p> <p>Caracterización capas ligadas</p> <p>Modelización estructural.</p> <p>Calculo de esfuerzo estimación de vida útil.</p> <p>Dimensionamiento.</p> <p>Preparación de la superficie.</p> <p>Seguimiento.</p>	<p>relativo losas</p> <p>Perforaciones con caladora DCP</p> <p>relev. De fisuras (SHRP)</p> <p>Caracterización capas ligadas Ahuellamiento</p> <p>Modelización estructural.</p> <p>Calculo de esfuerzo estimación de vida útil.</p> <p>Dimensionamiento.</p> <p>Preparación de la superficie.</p> <p>Seguimiento.</p>	<p>Perforaciones con caladora DCP</p> <p>relev. De fisuras (SHRP)</p> <p>Caracterización capas ligadas Ahullamiento - Sobre banquetas (sistemático)</p> <p>clasificación de suelos</p> <p>Humedad natural Fijación de Cal -C.B.R.</p> <p>Modelización estructural.</p> <p>Calculo de esfuerzo estimación de vida útil.</p> <p>Dimensionamiento.</p> <p>Preparación de la superficie.</p> <p>Seguimiento.</p>
--	---	---	---	---	--

- Instancias de control: Durante la ejecución de los tramos 1, 2 y 3, se sistematizó un doble control con laboratorio al pie de obra y en laboratorio central de la empresa (ambos debieron incrementar paulatinamente su equipamiento, a fin de poder realizar todas las determinaciones requeridas).

A partir del TRAMO 4, se implementó un sistema de auditorias técnicas a frecuencias prefijadas, en carácter de tercera instancia de control, para lo cual se cuenta actualmente con un laboratorio móvil. La tabla 29 resume esquemáticamente la evolución de los niveles de control.

9. EXPERIENCIAS DEL EMPLEO DE EMULSIONES ASFÁLTICAS, MEJORADAS CON POLÍMEROS SBR.

9.1 INTRODUCCIÓN.

Debido a los efectos del Tráfico y del Medio Ambiente, todo pavimento requiere de Mantenimiento. Las obras de mantenimiento preservan la superficie del pavimento, previenen el desgaste acelerado, así como mantienen la estabilidad de las capas granulares del pavimento.

Las actividades empleadas para mantener la Condición Presente y extender la vida de servicio del pavimento, son consideradas como Mantenimiento Preventivo, el cual incluye la colocación de capas de sello, tratamiento de fisuras, mantenimiento de las obras de drenaje etc.

El Mantenimiento Correcto, pueden ser aquellas actividades empleadas para reparar un pavimento deterioro y mantener una condición aceptable de Transitabilidad. El Mantenimiento Correcto, puede incluir obras de bacheos superficiales y/ o profundos, Tratamientos Superficiales, Slurry Seal y la colocación de sobre capas delgadas de por lo menos una pulgada como mínimo, consideradas también como Obras de Rehabilitación.

9.2 MATERIALES ASFÁLTICOS EMPLEADOS EN OBRAS DE MANTENIMIENTO.

Varios materiales asfálticos y mezclas asfálticas, pueden ser empleadas en actividades de mantenimiento de pavimentos tales como:

9.2.1. Cemento Asfáltico. El Cemento Asfáltico es un material bituminoso semisólido, de diferentes grados de dureza, medidos por el Grado de Penetración, empleados en mezclas asfálticas en caliente, capas de liga, tratamiento de fisuras, etc. Combinado con aditivos, y/ o modificaciones Tipo Polímeros, mejora sus características reológicas.

9.2.2. Asfalto líquido Cutback. El asfalto cutt back, es asfalto al estado líquido, obtenido de la mezcla en refinería de cemento asfáltico y diferentes solventes de petróleo, siendo clasificados según el Tiempo de Curado: Rápido (RC), el cual contiene nafta como solvente, de Curado Medio (MC), con un solvente similar al Kerosene y de curado Lento (SC) con destilados pesados.

Según el contenido de solventes cada Tipo se clasifica en cuatro Grados, controlados por la viscosidad, siendo los más utilizados el RC-250, en mezclas asfálticas, el MC-30 y MC-70 en capas de Imprimación.

9.2.3. Emulsión Asfáltico Catiónica. Las Emulsiones Asfálticas Catiónicas constituyen dispersiones de partículas diminutas (1 a 5 micrones), de asfalto dentro del agua, mantenidas en suspensión mediante un agente emulsificante.

Una vez aplicada se produce la fase de «Rotura», el agua se elimina por evaporación, dejando donde sea necesario, cierta cantidad de asfalto, de la calidad y característica originales.

Las emulsiones asfálticas son empleadas en todas las aplicaciones de Obras de mantenimiento, tanto preventivo, como correctivo, tales como: mezclas

asfálticas en frío, con características físico-mecánicas de mezclas asfálticas en caliente, en Revestimientos (Sellos, tratamientos Superficiales, etc.), Imprimación, Capas de Liga, Slurry Seal, Tratamiento de grietas y fisuras, etc.

Las emulsiones asfálticas, pueden ser modificadas con aditivos Tipo Polímero, mejorando las características del asfalto residual, eliminando la variabilidad de calidad de los asfaltos, por el efecto cambiante, del origen de los crudos.

9.3 ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO EFECTUADA EN CARRETERAS.

Como alternativa al empleo del asfalto cutt back RC-250 y cementos asfálticos, en Obras de Mantenimiento de las carreteras, de diferentes condiciones de clima y ubicación geográfica, se ha empleado las Emulsiones Asfálticas Catiónicas, de Rotura Rápida, Media y Lenta, mejoradas con Polímero S. B. R.

El Latex Estireno- Butadieno S. B. R., incorporado como aditivo modificador en una emulsión asfáltica, se combina para producir una mezcla viscoelástica, con mayor elasticidad y cohesión entre las partículas del asfalto y del polímero, gran adhesión entre el asfalto y los agregados, siendo compatible con la mayoría de los asfaltos.

9.3.1. Generalidades sobre los modificadores de asfalto. La técnica de la modificación de los bitúmenes, con diferentes polímeros, así como las emulsiones asfálticas modificadas y la aplicación de estos ligantes en las diferentes obras de pavimentación y mantenimiento, actualmente constituye

un aspecto de la Técnica Vial moderna, que está siendo utilizada en gran escala en muchos países europeos y americanos.

Las propiedades que imparten los polímeros, cuando se incorporan a los bitúmenes, depende de los siguientes factores:

- Tipo y composición del polímero incorporado.
- Características y estructura coloidal del asfalto de base.
- Proporción relativa de asfalto y polímero.
- Procedimiento de incorporación (sistema de dispersión).
- Temperatura y tiempo de mezclado.

En general los asfaltos modificados con polímeros, mejoran en relación a los asfaltos convencionales, en las siguientes propiedades.

- Disminuye la Susceptibilidad Térmica.
- Disminuye la exudación del asfalto.
- Mejora la Cohesión.
- Mejor impermeabilización.
- Mayor Durabilidad.
- Mayor resistencia a la acción del agua.

9.3.2. Emulsiones Asfálticas modificadas con Polímero S. B. R. El Polímero S. B. R., clasificado como Elastómero, (Estireno- Butadieno), empleado en el mejoramiento de las emulsiones asfálticas, fue Tipo Latex, de alto peso molecular, manufacturado por proceso de polimerización en emulsión, de un pH comprendido entre 11 a 12 y un contenido de sólidos, mínimo de 70%.

Las emulsiones asfálticas modificadas con polímeros S. B. R., tienen características apropiadas para prevenir la fatiga y la aparición prematura de fisuras, por contracciones térmicas.

En Zonas donde existen cambios bruscos de temperatura (zonas de altura), en climas extremadamente secos o, en climas Húmedos (lluviosos), los pavimentos son seriamente afectados, produciéndose deterioros prematuros. En esos casos las experiencias habidas del empleo de las emulsiones asfálticas catiónicas mejoradas con Polímero S. B. R., en obras de mantenimiento, han sido satisfactorias.

Comportamiento del Asfalto Emulsionado mejorando con Polímeros S. B. R.

Además de las mejoras de las propiedades del asfalto residual, descritas en el ítem 9.3.1, se puede enumerar las siguientes:

- Mejora la Trabajabilidad y la compactación.
- Mayor resistencia al envejecimiento.
- Permite un mayor espesor de la película de asfalto, en la superficie de los agregados.
- Mayor resistencia al derrame de los combustibles.
- Permite un mejor y duradero sellado de grietas y fisuras.
- En las obras secundarias de rehabilitación (bacheos superficiales y/ o profundos), las emulsiones asfálticas mejoradas con polímero S. B. R. empleadas en mezclas en frío, presentan mayor Durabilidad.
- Buenas condiciones de almacenamiento a temperaturas mayores de 5° C.
- No requiere de equipos especiales.

9.4. PROCEDIMIENTOS EMPLEADOS EN LAS OBRAS DE MANTENIMIENTO.

Los procedimientos empleados en obras de mantenimiento, tanto preventivo, como correctivo, han sido ejecutados según tecnologías recomendadas por el Instituto del Asfalto y las Especificaciones Técnicas: de la A. S. T. M. Y de la AASHTO, entre otras, en las carreteras siguientes:

- CARRETERA CENTRAL TRAMO: COCRACHACA – MATUCANA.(PERU)
- CARRETERA PATIVILCA – HUARAZ.(PERU)
- CARRETERA PUNO – JULIACA – DESAGUADERO (4,000 m. s. n. m.).(PERU)
- CARRETERA AREQUIPA – MATARANI.(PERU)

9.4.1. Sello asfáltico con emulsión asfáltica modificada. Esta actividad consistió, en la aplicación de una Emulsión Asfáltica Catiónica, de Rotura Rápida, modificada con polímero SBR, seguido de una ligera cobertura de Agregado Finos, a una superficie asfáltica, previamente preparada, con la finalidad de prevenir la intrusión de humedad y aire, cuando la superficie del pavimento existente, comienza a fisurarse.

Dosificación de Materiales. Las cantidades de materiales por m², serán de acuerdo a los siguientes rangos:

- Emulsión Asfálticas: 0.68 a 0.9 litros.
- Agregados Fino: 5.5 a 8.0 Kilos.

Granulometría de la arena.

Tabla 30. Granulometría de la arena.

Tamaño de Malla	Porcentaje que pasa
3/8"	100
Nº 4	85-100
Nº 8	10-40
Nº 16	0-10
Nº 50	0-5

Los agregados finos, serán limpios no contendrán terrones, ni partículas adheridas de arcilla, cumplirán con los requisitos de calidad, según las Especificaciones de la ASTM o de la AASSHTO.

Proceso Constructivo. El proceso constructivo y los equipos son similares, al procedimiento, empleado con asfalto líquido RC-250, debiendo realizarse la distribución de los agregados, casi inmediatamente, cuando se emplea emulsión asfáltica, como material bituminoso.

La aplicación de la emulsión, no deberá efectuarse, cuando la temperatura del pavimento es superior a 25° C recomendándose para estos casos, el humedecido del pavimento, antes de la aplicación de la emulsión.

9.4.2. Tratamiento de fisuras y grietas. El tratamiento de fisuras, consistió en la limpieza y relleno de las fisuras y grietas, con emulsión asfáltica Catiónica de rotura media, modificada con un polímero SBR.

El material de relleno para las grietas, consistió de un mortero asfáltico, compuesto por una mezcla de arena fina, con Emulsión Asfáltica de Rotura Media, modificada con polímero. El contenido de emulsión, varía normalmente entre un rango de 6 a 15%, debido humedecer la arena de modo de controlar el tiempo de rotura y que permita obtener un buen revestimiento del agregado fino.

Método de ejecución. Consistirá en la limpieza con agua y aire comprimido de las fisuras y grietas existente en el pavimento.

- Para el caso de fisuras, cuyo espesor de abertura es menor de 3 mm se roceará la emulsión en la fisura retirando el exceso, luego se esparcirá arena fina y se rodillará en forma manual.
- En el caso de fisuras, cuyo espesor de la abertura es de (3 a 6 mm), se verterá en la fisura preparada, una ligera cantidad de emulsión de rotura media, empleando un vertedor y escoba de goma en forma de «V», posteriormente «arena eólica», será forzada a ingresar con paletas, recubriendo por último con arena, el área donde se distribuye la emulsión y posteriormente se rodillará en forma manual.
- El relleno de grietas, se ejecutará introduciendo el mortero de (arena-emulsión), lo más profundamente posible en forma manual, se compactará con pisones manuales, dejando una superficie ligeramente superior a los bordes, posteriormente se compactará con rodillo neumático y se retirarán los excedentes, debiendo quedar una superficie plana.

9.4.3. Mezclas de arena-emulsión. La preparación de mezclas de Arena – Emulsión para obras de mantenimiento, empleando emulsiones asfálticas catiónicas, modificadas con polímeros S. B. R., es una operación relativamente simple, requiere únicamente de un mezclador y de un sistema de medidas, para medir correctamente la cantidad de arena y de emulsión.

Si se requiere de pequeñas cantidades, el mezclado puede efectuarse manualmente, en el lugar de la obra.

La arena empleada, cumplirá con los requerimientos de calidad, según las Normas Estándar de la ASTM, de la AASHTO o, del Instituto del Asfalto. Se consideraron los siguientes Huesos Granulométricos.

La cantidad de emulsión requerida, según la granulometría, varía entre el rango de 6 a 10%, según dosificación determinada en Laboratorio, asimismo la cantidad de agua para el humedecimiento de la arena, será dosificada (entre 8 y 10%), a fin de determinar el tiempo de rotura de la emulsión, que permita una colocación adecuada de la mezcla.

Toda superficie en las cuales se coloca las mezclas de arena – emulsión, será imprimada con la emulsión a utilizar, diluida con agua (potable), en un 50%.

Tabla 31. Usos granulométricos de la arena.

MALLAS (PULGADAS)	PORCENTAJE TOTAL QUE PASA		
	POBREMENTE GRADADA	BIEN GRADADA	ARENA LIMOSA
½	100	100	100
Nº4	75 - 100	75 - 100	75 - 100
Nº50	-	15 - 30	-
Nº100	-	-	15 - 75
Nº200	0 - 12	5 - 12	12 - 20
Equivalente de arena %	30 min	30 min	30 min
Ind. plástico	NP	NP	NP

Mastic Asfáltica en frío. En el caso de un mastic asfáltico, se empleará una arena fina, en proporciones adecuadas, según el rango del porcentaje de emulsión indicado, de modo de obtener una mezcla de consistencia plástica y fluida, fácilmente manejable, que pueda ser vertida y compactada con paleta, hasta una superficie nivelada.

El tamaño máximo de la arena fina, será el que pasa la malla Nº 40, y deberá cumplir con los requerimientos de Equivalente de Arena (mínimo 30%) e Índice de Plasticidad (No plástico).

9.4.4. Mezclas asfálticas para obras de mantenimiento. La preparación de mezclas asfálticas para obras de mantenimiento, empleando emulsiones asfálticas Catiónica de Rotura Media, mejorada con polímeros es una operación relativamente simple, requiere únicamente un mezclador y de un

sistema de medidas para medir correctamente la cantidad de agregados y de emulsión.

Si solamente se requiere de pequeñas cantidades, el mezclado puede efectuarse manualmente, en el lugar de la obra.

Los agregados empleados en estas mezclas, cumplirán con los requerimientos de calidad, según las Normas Estándar de la A:S.T.M. o, de la AASHTO. Se consideró el siguiente Huso granulométrico:

La cantidad de emulsión asfáltica requerida, para la granulometría especificada, normalmente estará en el rango de 5 a 10%, del peso total de la mezcla y será utilizada, tan pronto como sea posible. No será colocada con excesiva cantidad de agua, producida del humedecimiento excesivo de los agregados.

Tabla 32. Usos granulométricos de los agregados.

Tamaño de malla	Porcentaje que pasa
$\frac{3}{4}$	100
$\frac{1}{2}$	90 – 100
$\frac{3}{8}$	-
Nº4	44 – 74
Nº8	28 – 58
Nº50	5 – 21
Nº200	2 - 10

9.4.5 Estabilización de suelos (mejoramiento de capas granulares). La estabilización de suelos con emulsiones asfálticas catiónicas, mejoradas con polímeros S.B.R., tiene como finalidad el utilizar suelos mas o menos plásticos, con un cierto porcentaje de vacíos, que permiten la introducción de una cantidad adecuada de emulsión asfáltica catiónicas, de modo de asegurar una máxima cohesión y la suficiente estabilidad, para soportar el tráfico vehicular.

Requerimientos de los suelos. Los requerimientos de los suelos a estabilizar, con las emulsiones asfálticas mencionadas, son los siguientes:

- Índice de Plasticidad, A.S.T.M. D-424: ,máximo 6.0
- Equivalente de Arena, A.S.T.M. D-2419: Mínimo 30

Proceso Constructivo. Para obtener una distribución del bitúmen contenido en la emulsión, es necesario que la emulsión no se rompa durante el proceso de mezclado. Para obtener este resultado, es necesario adicione una cierta cantidad de agua (potable) a la emulsión denominada Agua de mezcla.

- El Agua de Mezcla se puede adicionar al suelo, o a la emulsión.
- En ningún caso, la emulsión se pondrá en contacto con el suelo completamente seco.
- El tenor de agua total (Humedad Natural del suelo +agua de emulsión+ agua de mezcla) no deberá ser inferior, a aquella correspondiente a la Optima Humedad del Próctor Modificado, del suelo a estabilizar.

Ejecución (Tratamiento in situ)

1. Escarificar el suelo en un espesor de 5 a 10 centímetros.
2. Diluir la emulsión a un tenor de bitúmen de 30%, como mínimo.
3. Incorporar la emulsión diluida mediante el proceso de riego, de modo de obtener una penetración por gravedad de la emulsión, en el suelo a tratar.
4. El dosaje de la emulsión diluida varía entre 8 a 14 litros/ m², la cual se regará en una o dos aplicaciones, según el caso lo requiera.
5. Efectuar la operación de mezclado.
6. Compactar con rodillo neumático después de la rotura de la emulsión.
7. Compactar con rodillo cilíndrico tandem. Previo arenado de la superficie (arena gruesa).
8. El grado de compactación como mínimo, deberá ser el 90% de la máxima densidad seca del próctor modificado.
9. El espesor promedio de la capa estabilizada, es del orden de 5.0 cm. Después de la compactación.

10. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE SOLUCIONES EN PAVIMENTOS Y LA SEÑALIZACIÓN VIAL ATENDIENDO A LA SEGURIDAD Y LA COMODIDAD DEL TRANSITO.

10.1. INTRODUCCIÓN

Anualmente los accidentes de tránsito en su tramo de carretera principal, ocasionan numerosos daños humanos, traducidos estos en muertes, lesiones duraderas y no duraderas, las cuales sin contar los daños materiales producen una afectación económica que muchas veces no se cuantifica; pero sin embargo, los autores, basados en la experiencia internacional, plantean que tiene una mayor relevancia en el aspecto económico, por su efecto instantáneo y en el tiempo.

En el presente trabajo se propone mostrar lo planteado anteriormente, así como la importancia de introducir esta valoración de los accidentes en las evaluaciones de proyectos e intervenciones en carreteras.

10.2. DESARROLLO DEL TRABAJO

Primeramente analizaremos cuáles son los costos que a la sociedad le implica víctima fatal o no.

10.2.1. Costo de una víctima

- Costo de la maternidad (nacimiento).
- Formación escolar hasta el nivel medio superior.

- Pérdidas por lo que deja de producir.
- Daños sociales y secuelas.
- Atención médica.

A continuación se reseñan los costos de una infraestructura de carretera de dos carriles:

Costo de una mejor en una carretera principal.

El análisis se realiza a partir de los trabajos necesarios en el área pavimentada que sirve a la circulación con vistas a incrementar la seguridad y comodidad de la misma. El tramo de carretera considerado será de 1 km para facilitar cálculos y comparaciones.

El costo de construcción es de 235.000 pesos/km para soportar una IMD de 4.500 veh/día. Costo de pavimento flexible (súbase, base, capa intermedia y de superficie de hormigón asfáltico caliente) a un valor del 40% del total planteado, o sea, $235.000 \times 0.40 = 94.000$ pesos/km. Del valor del pavimento el 70% corresponde a las carpetas asfálticas, por lo tanto, éstas cuestan 65.800 pesos/km.

Se aplicará mantenimiento corriente anual a todo el ancho pavimentado de la sección transversal de la carretera, éste tiene un costo de 9.000 pesos/km/año. El mantenimiento medio se aplicará cada 6 años, para fundamentalmente rehabilitar la superficie y reponer así sus características antideslizantes, el costo de 54.000 pesos/km/6años.

En los 6 primeros años se invierte en mantenimiento vial 91.000 pesos y teniendo en cuenta el costo de construcción se tendrá un total de 326.000 pesos. Si en este período la inversión en mantenimiento no se ejecuta, la

administración de la carretera tiene un ahorro aparente de 91.000 pesos. De haberse ejecutado la inversión por mantenimiento se logra que la seguridad y comodidad del tránsito se preserven y se conserva el patrimonio vial.

Puede considerarse que por las características resbaladizas del pavimento y otros detalles de la sección transversal se decida aplicar un sistema de evaluación y diagnóstico de carreteras (SEDC) a finales del sexto año.

El resultado diagnóstico aconseja reponer las características antideslizantes del pavimento, ejecutando un tratamiento superficial; pero esta medida no se ejecutó, el costo de la evaluación y rehabilitación se consideró de 42.000 pesos.

En el inicio del séptimo año se reporta un accidente del tránsito relevante y las investigaciones determinan que las características superficiales del pavimento son las causas principales del acontecimiento. El vehículo patinó y salió violentamente de la vía al ser aplicados los frenos por el conductor. El mismo ocasiona:

- Un fallecido de 23 años de edad, graduado de técnico medio superior.
 - Un lesionado grave, 43 días hospitalizado, tres meses de tratamiento médico y siete meses de reposo laboral.
 - Un lesionado leve, siete días hospitalizado, un mes de reposo laboral.
- La destrucción parcial del vehículo, otros daños y secuelas.

10.2.2. Costo global de accidente

- Un fallecido, 45 años sin aportar beneficios a la sociedad y el costo de su formación social durante sus 23 años de vida.

$23 \cdot 12 \cdot 100/\text{mes} = 27.000$ pesos.

45 · 12 · 1500 /mes = 810.000 pesos

- Un lesionado grave

43 · 145/día = 6.235 pesos

90 · 27/día = 2.430 pesos

7 · 1500/mes = 1,500 pesos

- Un lesionado leve

7 · 70/día = 490 pesos

1 · 1500/mes = 1,500 pesos

Costo de los daños **700 pesos**

Sub-total **858.855 pesos**

Considerando un 15% del costo de otras secuelas y afectaciones colaterales:

128.828.25 pesos

Se consideró un 0.5% por gastos de maternidad

4.294.28 pesos

El total es de **991.977,53 pesos**

De haber sido ejecutados los trabajos de conservación de la carretera se pudo haber evitado el accidente o disminuido sus consecuencias. Se pudo haber salvado (beneficios) la cantidad de 713.977,53 pesos, pero la realidad es otra, ya que no se ejecutaron los mantenimientos ni las medidas propuestas por la inspección técnica, por lo tanto, los costos son los de construcción de la infraestructura y la inspección técnica en total 236.000 pesos, cuando si se hubiese hecho lo recomendado, este valor sería de 278.000 pesos y la relación beneficio / costo nos da el siguiente valor:

$$\frac{713977.53}{278000.00} = 2.57$$

En estos beneficios y costos (no actualizados) vemos que faltan otros beneficios debido a la disminución de los costos de operación, como por ejemplo: La disminución que se produce por la mejora en la rugosidad del pavimento en los costos de operación que puede llegar a ser casi la mitad del valor sin mejora.

11. REDUCCIÓN DEL RUIDO DEL TRAFICO URBANO MEDIANTE PAVIMENTACIONES ASFÁLTICAS FINAS.

11.1. INTRODUCCIÓN

El ruido se ha convertido en un agente contaminante destacado, sobre todo en ambiente urbano: el incremento de la densidad de población, la mecanización de la mayor parte de las actividades y la utilización creciente de vehículos a motor para el transporte de personas y mercancías son las principales causas. Precisamente debido a este aumento de energía acústica en nuestras ciudades, se están empezado a tomar medidas en la actualidad para controlarlo.

Del mismo modo que en las vías interurbanas la investigación del ruido generado por el tráfico ha sido muy amplio, en ámbito urbano no ocurre lo mismo. Los estudios del ruido del tráfico en las ciudades han sido escasos y puntuales. La casuística, además, es bastante diferente, puesto que el ruido de rodadura tiene menor influencia al ser las velocidades de circulación inferiores, a la vez que posee un mayor peso específico el de la mecánica de los vehículos, y también se dan disposiciones constructivas y de mantenimiento mucho más complejas que en carreteras interurbanas.

Es importante reseñar el gran impacto social que puede tener la reducción de algunos decibelios en el entorno medioambiental de las vías urbanas, porque aunque en valor absoluto se logren reducciones de ruido inferiores a las que se obtendrían en carreteras, un número mucho más elevado de personas ven mejoradas sus condiciones de vida.

En este marco se sitúa el origen de la investigación experimental que aquí se presenta. El Ayuntamiento de Valencia pretende acometer un plan de reducción del ruido del tráfico en la ciudad, por lo que encargó al Departamento de Transportes de la Universidad Politécnica de Valencia el desarrollo investigador correspondiente.

Es bien sabido que el origen del ruido del tráfico es variado (motor, transmisiones, escape, rodadura, etc.). En este caso, el estudio se centra sobre uno de los elementos que intervienen en una de estas fuentes, en concreto sobre el pavimento, y su influencia en el ruido de rodadura.

Enfocado en este sentido, el objetivo del presente estudio experimental es doble:

- En un principio, realizar una investigación bibliográfica y establecer el estado del arte sobre el fenómeno del ruido de rodadura en lo que se refiere a la naturaleza del pavimento, determinando los mecanismos de generación, así como los parámetros del pavimento que influyen sobre él, y las soluciones que se están adoptando hoy en día a nivel mundial.
- Tras extraer las conclusiones de la anterior investigación, seleccionar y diseñar un tramo experimental real y extender en el mismo distintos tipos de pavimentos que se consideren a priori que pueden presentar un buen comportamiento fonoabsorbente, para estudiar sus comportamientos con tráfico urbano real.

11.2. ESTADO DEL ARTE

Cuando se estudia un pavimento desde el punto de vista acústico se pueden distinguir dos fenómenos opuestos: la generación y la absorción de ruido.

Estos dos fenómenos son independientes entre sí, y deben ser estudiados separadamente.

Hay tres fenómenos que contribuyen a la generación de ruido con la rodadura de los vehículos (Bar y Delanne, 1993):

- **Ruido de impacto:** es producido por el golpeteo continuo de la goma del neumático contra las irregularidades de la carretera. Predomina en las fajas frecuencias. En este sentido, el tamaño máximo del árido es importante, de modo que el ruido generado es directamente proporcional a este parámetro.
- **Bombeo de aire o air pumping:** es debido a los ciclos compresión-descompresión del aire, que se manifiestan en la interfaz entre el neumático y la calzada. A su vez, el ruido es reflejado un gran número de veces entre la superficie del neumático y la de la calzada antes de propagarse en el entorno. A este efecto se le conoce como «efecto diedro».
- **Ruido de adhesión o slip and stick:** cuando el neumático entra en contacto con la calzada, éste se deforma y se crea una adhesión entre la goma y la superficie de los áridos. Al salir del contacto, la goma se despega de la calzada, produciéndose una sucesión de adherencias – rupturas de adherencia que son las que dan origen a este tipo de ruido.

El segundo fenómeno que se ha de estudiar es el de absorción de ruido. Este fenómeno no se da en todos los pavimentos, sino en aquellos que han sido especialmente diseñados para ello. En estos pavimentos hay distintos parámetros que influyen en la absorción de sonido (Béréngier et al, 1990):

- **% de huecos:** a mayor porcentaje de huecos, mayor absorción acústica. Este parámetro se encuentra limitado por la resistencia estructural de la mezcla, ya que a mayor cantidad de huecos, menos resiste el pavimento.
- **Espesor:** aumentar el espesor implica una reducción global de las emisiones de ruido del tráfico, además que desplaza el pico de absorción acústica hacia las bajas frecuencias. Su efecto no es significativo para pequeñas variaciones de espesor, inferiores a 2 ó 3 cm. Los pavimentos óptimos desde el punto de vista acústico suelen tener de 6 a 10 cm de espesor, aunque considerando además el aspecto económico no es conveniente superar los 8 cm.
- **Resistencia al flujo del aire:** es la resistencia que ofrece una muestra con porosidad al paso de un flujo de aire a través de ella. Se mide en $\text{Ns}\cdot\text{m}^{-1}$. Interesan valores intermedios, ni muy altos, ni muy bajos. Este parámetro se correlaciona directamente con la disipación de la energía sonora como consecuencia de las fuerzas de fricción en el interior de la mezcla.
- **Factor de forma:** es un número adimensional que indica la relación que existe entre los cuadrados de la velocidad del sonido propagándose en el aire y en el interior de la mezcla. Este parámetro, junto con el espesor, determinará el rango de frecuencias en el cual se dará el máximo de absorción.

Una vez conocidos cuáles son los mecanismos por los cuales se rige el ruido de rodadura, se vienen desarrollando distintos tipos de pavimento que sean funcionales desde el punto de vista acústico, sin descuidar el resto de factores exigibles a los pavimentos para su utilización como su facilidad de puesta en obra, su resistencia estructural, su mantenimiento, su coste, etc.

Ante este fenómeno, las soluciones que se están utilizando mundialmente en la actualidad son las siguientes:

- Pavimentos porosos
- Microaglomerados discontinuos
- Pavimentos bicapa
- Superestructuras porosas
- Pavimentos eufónicos

Pavimentos porosos: es el tipo de pavimento fonoabsorbente más extendido. Tiene un espesor intermedio (de 3 a 6 cm). Está formado por una mezcla bituminosa porosa (con ligante modificado) que absorbe parte del sonido. Su porcentaje de huecos debe ser superior al 20%. Acústicamente, funcionan preferentemente a medias y altas frecuencias. Sus coeficientes de absorción aproximados a bajas (0-700·Hz), medias (700-1250 Hz) y altas (1250-2000 Hz) frecuencias son 0,2, 0,45 y 0,60, respectivamente. En la actualidad es la solución más utilizada internacionalmente. Además de su comportamiento acústico presenta otras cualidades que le convierten en un pavimento que proporciona una rodadura cómoda y segura (drenabilidad, adherencia, etc.). Estos pavimentos presentan el inconveniente de la colmatación de sus poros, lo que puede llevar a que pierdan sus principales propiedades, como la drenante o la acústica. Por ello, se debe proceder periódicamente a la limpieza o descolmatación de sus huecos, lo que implica un encarecimiento del mantenimiento.

Microaglomerados discontinuos finos: se obtienen extendiendo una capa fina de unos 2 cm de espesor y de 6-8 mm de tamaño máximo de árido, e incluso

tamaños inferiores, sobre un pavimento o capa cualquiera, que presente buena regularidad superficial. Su granulometría discontinua proporciona un porcentaje de huecos que difícilmente sobrepasa el 10%. Su coeficiente de absorción es pequeño, aunque su importancia radica en el hecho de que debido al pequeño tamaño de grano y a su textura superficial, su emisión acústica es inferior que la de una mezcla continua. Su coste de ejecución es moderado, inferior al de los porosos. Presentan una cierta limitación en cuanto al mantenimiento de su textura superficial con el tiempo, ya que tiende a cerrarse en parte (Ruiz, 1995).

Pavimentos bicapa: ante la experiencia de que un grano pequeño proporciona una mejora acústica, y para no perjudicar las propiedades drenantes, se ha estudiado un pavimento poroso de dos capas, de modo que la capa superior de unos 2-3 cm es de grano pequeño para minimizar la generación de ruido, y la capa inferior, de unos 3-5 cm es de grano más grueso, para aprovechar las propiedades fonoabsorbentes de los pavimentos porosos. Su comportamiento acústico es muy bueno (von Meier et al, 1994), mejor que el de los monocapa, aunque por lo demás presenta las mismas virtudes y defectos que los pavimentos porosos. Tan sólo añadir lo que se conoce como efecto membrana (Bar y Delanne, 1993), por el que las partículas que colmatan el pavimento se acumulan con mayor facilidad en la interfaz que hay entre las dos capas, produciéndose una colmatación más rápida, e inutilizando así la sección del pavimento que se encuentra debajo. Además, su puesta en obra es más laboriosa y costosa que si se tratara de un pavimento monocapa.

Estructuras porosas: las estructuras porosas son un pavimento poroso pero de un espesor elevado, alrededor de los 50 cm. Sus propiedades

características drenantes y acústicas se ven potenciadas, alcanzando coeficientes de absorción de 0,2,0,5 y 0,65 para bajas, medias y altas frecuencias, respectivamente. Proporcionan una absorción acústica elevada, por una parte. Y por otra, poseen una elevada capacidad de almacenar agua, lo cual le otorga la función de efecto laminador, como un embalse a pequeña escala (Bar y Delanne, 1993). Según parece, es ésta la característica determinante a la hora de escoger esta solución. Su naturaleza prácticamente los hace inviables en ámbitos urbanos.

Pavimentos eufónicos: están formados por una capa de rodadura de mezcla porosa (que proporciona propiedades drenantes y fonoabsorbentes) de 4 a 6 cm de espesor colocada encima de una capa de hormigón, en cuyo interior se alojan resonadores repartidos por toda la superficie del pavimento. Los resonadores son unos dispositivos que están diseñados para absorber sonido de una determinada frecuencia. En este caso, se ocuparían de absorber las frecuencias más bajas. De este modo, la capa porosa absorbería las medias y altas frecuencias y los resonadores las bajas. Los coeficientes de absorción son de 0,6, 0,4 y 0,7, respectivamente (Camomilla et al, 1994). Sus resultados acústicos son óptimos, con la desventaja de su elevado coste inicial, similar al de las estructuras porosas. De todos modos, es un pavimento poco estudiado en la actualidad.

11.3 DEFINICIÓN DE LOS PAVIMENTOS EXPERIMENTALES

Una vez se llegó a este punto, se comenzó a decidir cuáles eran los pavimentos que « a priori »podían dar un buen comportamiento fonoabsorbente en medio urbano. Para ello, se intentó combinar de algún modo los siguientes parámetros: tipo de mezcla, espesor de las capas, % de

huecos y granulometría. Además, un factor importante a la hora de estudiar las mezclas definitivas fue la posibilidad comercial de las mismas, es decir, que las plantas asfálticas pudieran fabricar la mezcla con normalidad sin requerir ningún método ajeno a su funcionamiento normal. Por ello, se hicieron averiguaciones sobre qué canteras podrían facilitar granulometrías tan finas como las que se buscaban, y cuáles eran esas granulometrías.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones se optó por los pavimentos recogidos en la tabla 33, con expresión de su denominación, el tamaño máximo del árido y el espesor de la capa correspondiente. Destacar que también se ensayó una mezcla de la que estaba compuesta el pavimento original preexistente, pero nueva, recién extendida.

Tabla 33. Pavimentos experimentales.

TIPO DE PAVIMENTO	DENOMINACIÓN	TAMAÑO MAX. DEL ARIDO (mm)	ESPEJOR CAPA (cm)
POROSOS	PA – 5	5	1.5
	PA – 5	5	2.5
	PA – 8	8	2.0
	PA – 8	8	4.0
	PA – 10	10	3.0
	PA – 10	10	5.0
BICAPA (POROSO)	PA – 10 + PA – 5	10 – 5	3.0 + 1.5
MICROAGLOMERA DOS DISCONTINUOS	SMA – 5 (b + f)	5	1.5
	SMA – 8 (b + f)	8	2.0
	SMA – 11 (b + f)	11	2.5
SEMIDENSO	S – 12	12	5.0

El betún utilizado en las mezclas porosas fue un betún modificado tipo 3 a, mientras que en el resto se empleó betún convencional 60/70. Las mezclas porosas se dosificaron con una dotación de betún entre el 4,5% y el 5,0%; en cambio los microaglomerados precisaron una dotación del 6,6-6,7%. Los microaglomerados se dosificaron con la adición de fibras de celulosa al 0,3%.

Los huecos alcanzados fueron claramente superiores en las mezclas porosas (20-25%) en relación con los de los microaglomerados (6-11%). Los espesores medios de las capas realmente ejecutadas difirieron algo sobre los previstos, especialmente en las capas muy finas de 1,5 cm, donde se lograron espesores medios de 1,9 cm.

11.4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para la elección de un tramo de vía urbana sobre el que realizar el estudio experimental se consideraron una serie de aspectos que se jugaron importantes para el buen resultado del estudio, como que la calle fuera de sentido único y de una longitud mínima de unos 50-70 m, con edificios a ambos lados, de tráfico intenso, alejado de cruces, de obras y de cualquier otro elemento perturbador, no demasiado ancha, y de bajo impacto social.

Considerando todos estos factores, se eligió como tramo experimental del estudio a la calle Centelles de la ciudad de Valencia, entre las calles Sueca y Cuba, por entender que éste es el tramo que mejor cumplía los requisitos arriba mencionados.

Asimismo, también se estudió la secuencia en que se debían colocar las anteriores mezclas con la idea de abaratar costes. El procedimiento que se ha seguido es el de ir extendiendo unas mezclas sobre otras (sin que por

ello se vea afectado su comportamiento acústico) hasta que se alcanzara un cierto espesor (unos 10 cm como máximo) para no tener problemas con los bordillos de las aceras. Así, se van extendiendo pavimentos uno encima del otro hasta que se llega a esta cota, momento en el que se procede al fresado de todas las capas, comenzando de nuevo el proceso con mezclas distintas.

De cada uno de estos pavimentos se midieron una serie de magnitudes durante una semana completa, que sirvieran para evaluar los resultados acústicos. Las magnitudes se detallan a continuación:

- Mediante espiras embebidas en el pavimento justo inmediatamente antes del tramo experimental, se obtuvieron datos del tráfico, concretamente los valores de intensidad y velocidad media en intervalos de quince minutos y por carril, Posteriormente se procesaron estos datos obteniendo valores de hora, día y semana, con sus velocidades medias ponderadas correspondientes, así como las IMD resultantes. Toda esta información fue chequeada y verificada mediante un circuito cerrado de televisión. Si por algún motivo se detectó algún intervalo desechable, los datos correspondiente se sustituyeron por los de otro intervalo equivalente.
- En cuanto a los datos acústicos, se instalaron cuatro sonómetros: tres que medían los niveles de ruido en intervalos de un minuto en el tramo experimental, y en las manzanas anterior y posterior al mismo, y uno situado en el tramo experimental que media espectros de frecuencias. Así, se obtuvieron los niveles acústicos equivalentes de cada quince minutos, los niveles equivalentes diarios, semanales, diurnos y nocturnos, y los distintos percentiles; también los espectros de frecuencias en intervalos de quince minutos.

11.5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tal y como estaba previsto, se ensayaron todos los pavimentos según el orden constructivo previamente establecido. De todos ellos, y también inicialmente del pavimento original, se realizó el seguimiento comentado, cuyo parámetros son:

- **Pavimento:** Mezcla que se ha extendido, y el número de orden que le corresponde.
- **Tramo:** Como se ha comentado anteriormente, en el estudio se han tomado datos no solo del tramo experimental, sino también de los tramos situados en las manzanas anterior y posterior.
- **VOL tot:** Número total de vehículos que han circulado durante toda la semana (vh).
- **IMD lab:** Intensidad Media Diaria de los cinco días laborables de la semana (vh/día).
- **IMD sem:** Intensidad Media Diaria de la semana (vh/día).
- **Vm lab:** Valor medio de las velocidades medias ponderadas de los cinco días laborables (km/h).
- **Vm sem:** Valor análogo al anterior pero de los siete días de la semana (km/h).
- **Lq semanal:** Nivel sonoro equivalente de toda la semana $l(dB(A))$.
- **Ld semanal:** Nivel sonoro equivalente diurno de toda la semana, es decir, el nivel sonoro equivalente de todos los intervalos de 8 a 22 horas de los días de la semana $(dB(A))$.
- **Ln semanal:** Nivel sonoro equivalente nocturno de toda la semana, es decir, el nivel sonoro equivalente de todos los intervalos de 22 a 8 horas de los días de la semana $(dB(A))$.
- **Reducción:** Disminución del nivel sonoro equivalente semanal con respecto al pavimento original $(dB(A))$.

11.6. ANÁLISIS

Para analizar los resultados obtenidos aparece el problema de las diferentes condiciones del tráfico que circuló sobre el tramo experimental en la semana de seguimiento correspondiente a cada tipo de pavimento. Esto se resolvió mediante el adecuado estudio estadístico, deduciendo el modelo de regresión lineal siguiente:

$$Leq_{15} = 62,116 + 3,41777 \log (I_{15}) - 1,52647 \log (V_{15}) - C_{PAV}.$$

donde:

- Leq_{15} : nivel acústico equivalente de un cuarto de hora
- I_{15} : volumen de vehículos en un cuarto de hora
- V_{15} : velocidad media de los vehículos en un cuarto de hora
- C_{PAV} : constante correspondiente a cada pavimento.

El modelo se desarrolló eliminando los datos anómalos, logrando un coeficiente de correlación R^2 de 81,54% que se considera adecuado teniendo en cuenta las variables externas de difícil control. Este modelo se aplicó con diferentes condiciones de tráfico a los diversos pavimentos, pudiendo así comparar sus resultados acústicos en igualdad de solicitudes.

Además se llevó a cabo un análisis complementario sobre los siguientes aspectos:

- Comportamiento a largo plazo: necesidad de descolmatación periódica de las mezclas porosas y la evolución de la textura superficial de los microaglomerados discontinuos.

- Disposiciones constructivas: los pavimentos porosos precisan de los adecuados dispositivos de evacuación de las aguas infiltradas, lo cual puede complicar o encarecer su utilización urbana, mientras que los microaglomerados no presentan este problema. Al emplear pavimentaciones finas se hace imprescindible una adecuada regularización.
- Comportamiento estructural: las mezclas finas son más críticas en este aspecto, lo que supone un estudio más profundo de su diseño.

Para completar la evaluación de la investigación se realizó un análisis económico de todas las soluciones, imputando los costes de ejecución de las capas de pavimento y los costes de las actuaciones complementarias que puedan ser necesarias en cada caso (fresado, regularización, dispositivos de drenaje y descolmatación).

12. PREVENCIÓN DE RIESGOS EN PAVIMENTACIÓN ASFÁLTICA.

12.1. INTRODUCCIÓN

Prevención es Pre – ver, Pre – decir, para Pre – actuar. Sumados estos conceptos, en ese mismo orden, configuran la PREVENCIÓN: una manera sistemática y racional de emprender toda actividad humana, asegurando «un trabajo bien hecho... Y a la primera».

Hoy en día, las nuevas tecnologías incorporan nuevos riesgos, se incorporan nuevos elementos que exigen mayor productividad y, competitividad.

Los accidentes tienen costos, y en muchas oportunidades, muy altos y constituyen un claro y significativo derroche de recursos y signos inequívocos de fallas de gestión.

Intentando una definición, esta vez de Prevención de Riesgos, podría decirse que es la acción que, usando políticas y técnicas trata de mejorar, anticipar y evitar Condiciones y Acciones que puedan lesionar y/o enfermar al trabajador, pudiendo causar daños a la propiedad y a la buena marcha de la empresa.

Contribuyen efectivamente a una Prevención efectiva, entre otros:

- Los que definen las políticas y estrategias de la empresa.
- Los que planifican las operaciones.
- Los que diseñan las instalaciones y los medios a emplear.
- Los que adquieren los elementos a usar.
- Los que seleccionan y contratan al personal.

- Los que ejecutan y supervisan las operaciones.

W.Edwards Deming, autor de la filosofía de la calidad señala: El camino hacia una mayor productividad, se logra a través de un mejoramiento continuo de la calidad. Mejorar la calidad, a través de los procesos mejorados resulta de una reducción de pérdidas, de repetición de trabajos, de retrasos y deshechos acumulados. Essta reducción, kpermite que tanto la productividad como la calidad, mejoren».

Por su parte la calidad exige:

- Tener en cuenta en forma prioritaria el factor humano.
- Asegurar la comunicación como flujo continuo y transparente, tantyo externa como interna y a todos los niveles.
- Estimular el trabajo en equipo y con él, una participación motivadora.
- Atenerse a la lealtad como lema dentro de la empresa.
- Considerar la equidad como norma de conducta interna.
- Sostener una línea de innovación permanente.
- Procurar la simplificación de las estructuras.

La Calidad y la Seguridad, es más que el resultado de un trabajo bien hecho. Donde el hombre es el principal protagonista, y donde ambas características tienen mucho en común.

Tienen un fundamento común, ambas son componentes del trabajo.

Tienen responsabilidad común, son inherentes, irrenunciables e intransferible de cada persona, en cada trabajo, en cada nivel, independiente de la colaboración y asesoría que pueda recibir de parte de los respectivos especialistas.

Tienen causas comunes, las causas de los accidentes son las mismas que ocasionan problemas de calidad. Como también aumento en los costos de producción.

Tienen ideales comunes, tener en seguridad cero riesgo, cero daño y en calidad cero defecto.

Tienen referencias comunes. Los niveles deseados de seguridad y calidad se obtienen, cuando se satisfacen los estándares, requerimientos o expectativas.

Tienen instancias comunes, ambas deben procurarse en todas las instancias del proceso.

Tienen soluciones comunes, ambas se obtienen por medio de un sistema de gestión., basado en el Liderazgo, que promueve el buen desempeño, fomenta la participación y da rienda suelta a la iniciativa y a la creatividad.

Tienen un Principio común. Existe consenso entre los «filósofos» en el tema de la calidad y de la calidad total (Deming, Jurán, Crosby) en que:«El principio fundamental de la calidad, es la prevención».

Sin prevención, la calidad y la seguridad son impensables. Esta es la motivación del tema propuesto a este 10º Congreso Ibero-americano del Asfalto.

12.2. PREVENCIÓN DE RIESGOS EN PAVIMENTACIÓN ASFÁLTICA.

12.2.1. Riesgos generales asociados al asfalto. Los asfaltos son mezclas complejas de hidrocarburos y otros componentes, incluyendo azufre y nitrógeno. Por ser de muy alta viscosidad, el asfalto suele manejarse en caliente, y en ese estado es capaz de despedir vapores inflamables.

Los vapores (humos) del asfalto caliente contienen pequeñas cantidades de ácido sulfhídrico (H_2S). En consecuencia, debe evitarse la exposición a los vapores, porque su inhalación prolongada provoca náuseas y vértigos.

Debe minimizarse la respiración de vapores (o humos) por medio de ventilación adecuada, procurando trabajar al lado favorecido por el viento. Si esto no es posible, o se tuviera que penetrar en una atmósfera recargada de vapores de asfalto, deberán los operarios valerse de equipos de respiración autónoma.

El asfalto caliente da origen a quemaduras muy severas, porque queda adherido a la piel o a la ropa. Los trabajadores que trabajen con asfalto caliente deben usar ropa protectora con mangas y pantalones largos. El uso de zapatos de seguridad es obligatorio.

En operaciones donde hubiese riesgo de salpicadura de asfalto caliente (llenado de tambores, desacoplamiento de mangueras, etc.) se recomienda protección ocular y facial, uso de guantes y delantales impermeables.

El contacto prolongado o repetido con humos o polvos asfálticos podría ocasionar sarpullidos en la piel y otras erupciones, por lo que se hace necesario usar vestimenta que proteja al operario convenientemente.

Tratamientos de urgencia

Inhalación: Conducir al trabajador al aire libre, mantenerlo abrigado y en reposo. En casos graves o si la recuperación no se produce de inmediato, procurar atención médica de inmediato. En el intertanto, si hay pérdida de conocimiento, suministrar oxígeno. Si cesa la respiración, efectuar respiración artificial y / o resucitación cardiaca.

Contacto con la piel: No intentar remover el asfalto caliente de la piel. Remojar la parte afectada con un chorro de agua fría procurando bajar al máximo la temperatura en el menor tiempo posible. Si el asfalto rodease totalmente algún miembro, se debe ir quebrando la capa recubridora a medida que se enfría, para evitar que se produzca el efecto de torniquete al contraerse. Enviar al accidentado a un centro asistencial lo más pronto posible.

Contacto con los ojos: Lavar con agua copiosamente por lo menos durante 10 minutos. No tratar de remover asfalto de los ojos. Conseguir atención médica en forma urgente.

12.3. SELECCIÓN MATERIAL GRANULAR

12.3.1. Transporte de maquinaria, planta seleccionadora y chancadora al pozo. Etapa en la cual se trasladan las maquinarias, planta seleccionadora y chancadoras en el pozo de material de empréstito.

Riesgos identificables.

- Caída de distinto nivel de la maquinaria.

- Caída distinto nivel de operarios, al amarrar la maquinaria.
- Golpe con materiales y/o herramientas.
- Sobre esfuerzos.
- Atrapamientos.
- Accidente vial.

Medidas preventivas.

- Asegurar rampas de accesos.
- _nstrucciones precisas al operador.
- Despeje de elementos sueltos de la plataforma.
- Asegurar amarras de cables.
- Verificar estado de estorbos.
- Ingreso sólo de personal autorizado a zonas de maniobras.
- Verificar óptimo estado de frenos y mecanismo del vehículo.
- Instruir al chofer en manejo a la defensiva.
- Uso de elementos de protección personal.

12.3.2. Montaje de planta seleccionadora y chancadora. En esta etapa se arma la planta seleccionadora y chancadoras en el pozo de material de empréstito escogido.

Riesgos identificables.

- Caídas de un mismo nivel.
- Caídas de distinto nivel de la maquinaria.
- Aprisionamientos.
- Sobre esfuerzos.
- Irritación a la vista.

- Caídas de distinto nivel del trabajador.
- Atrapamientos.
- Golpeados con, golpeados contra.
- Quemaduras de soldaduras.
- Eléctricos.

Medidas preventivas.

- Uso obligatorio de elementos de protección personal.
- Verificar plataformas de trabajo.
- Coordinar montaje, sin dualidades de mando.
- Capacitar a los trabajadores en tema de levantamiento de pesos.
- Instalaciones eléctricas protegidas y señalizadas de acuerdo a normas.
- En la zona de montaje debe estar solamente personal autorizado.
- Asegurarse del buen estado de estrobos y amarras.
- Movimientos de maquinarias y grúas deben ser lentos por parte de los operadores.
- Contar con iluminación adecuada.

12.3.3. Roce y despeje de material inadecuado desde sector a explotar.

Analizados previamente los posibles pozos de empréstito para la extracción de material granular para la confección de las mezclas asfálticas, se procede a su despeje y limpieza del material inadecuado.

Riesgos identificables.

- Caídas de distinto nivel de la maquinaria.
- Atrapamiento.
- Atropellos.

- Exposición al ruido.
- Golpes con, golpes contra.
- Volcamientos.
- Colisiones.

Medidas preventivas.

- Tránsito de vehículos y maquinarias a velocidad prudente.
- Respeto del derecho a vías por parte de camiones y maquinarias.
- Uso obligatorio de elementos de seguridad: cascos, zapatos y chalecos reflectantes.
- Capacitación a banderilleros para dirigir las maniobras.

12.3.4. Acopio de material. Es el proceso de acumulación de material en el pozo de empréstito, su carga a camiones, transporte y descarga del material desde el pozo a través de camiones al acopio de la planta seleccionadora o directamente al buzón de la chancadora o seleccionadora.

Riesgos identificables.

- Accidentes viales.
- Atrapamientos.
- Exposición al ruido.
- Proyección de partículas.
- Golpeados con, golpeados contra.
- Exposición al polvo.
- Colisiones.
- Volcamientos.

Medidas preventivas.

- Capacitar al operador sobre plataformas de trabajo.
- Uso de elementos de protección personal.
- Vehículos con alarma de retroceso.
- Maquinaria sin aceites y grasas en sus pisos.
- Colocación de topes de seguridad.
- Mantenerse alejado de la maquinaria.
- Estado mecánico óptimo de maquinarias y camiones.

12.3.5. Carguío a camiones. Esta etapa consiste en cargar los camiones, con el material acopiado en el pozo para ser trasladado a un acopio en sector de la Planta Seleccionadora, o directamente en el buzón de dicha planta.

Riesgos identificables.

- Caída de material.
- Exposición al polvo.
- Atropellamiento.
- Colisión.
- Atrapamiento.

Medidas preventivas.

- Personal porta señales capacitados.
- Operadores de maquinaria calificados.
- Uso de elementos de protección personal.
- Maquinarias con bocina de retroceso.
- Mantenimiento adecuado de maquinarias.

12.3.6. Selección material granular. Proceso básico para la elaboración de mezclas asfálticas, para el cumplimiento de las especificaciones técnicas requeridas. Este proceso puede contemplar el transporte de maquinaria, planta seleccionadora y chancadora al pozo.

Riesgos identificables.

- Caída de distinto nivel de la maquinaria.
- Golpes con o golpes contra cables, materiales o herramientas.
- Atrapamientos.
- Caída de distinto nivel del trabajador, al amarrar la maquinaria.
- Sobre esfuerzos.
- Accidentes de tránsito.

Medidas preventivas.

- Señalización adecuada, en el área de trabajo.
- Maquinarias y herramientas en buen estado.
- Orden y Aseo en el lugar de trabajo.
- Uso obligatorio de elementos de protección personal.
- Personal calificado con documentación para conducir maquinaria.
- Iluminación adecuada.

12.3.7. Transporte y descarga del material chancado y/o selección del material. En esta etapa se reduce y/o se selecciona los diferentes tamaños de áridos, los que son transportados mediante correas transportadoras a diferentes acopios según sea el tamaño seleccionado.

Riesgos identificables.

- Caídas de trabajadores desde las cintas (operaciones de revisión y manutención).
- Caída de material desde las cintas.
- Contactos con la energía eléctrica.
- Atrapamiento.
- Exposición al polvo.
- Exposición al ruido.

Medidas preventivas.

- Dotar de carcasa de protección sobre tambor de arrastre para evitar atrapamientos.
- Uso obligatorio de casco y zapatos de seguridad.
- Uso de mascarilla de seguridad antipolvo.
- Reparación, Manutención y Despeje de Sobretamaño.
- Verificar que la energía eléctrica esté desconectada y colocar letrero en tablero advirtiendo «no activar».
- Aislar, cercar el área de trabajo.
- Restringir el paso sólo a personal autorizado en esta zona.
- Conectar a tierra las partes metálicas de las cintas transportadoras, para evitar riesgos eléctricos.
- Uso de fonos antiruido.
- Dispositivo de seguridad de corte de energía.
- Colocar barrera a la entrada del buzón, para que no entre ningún camión a descargar mientras se extrae el sobretamaño.
- Uso obligatorio de elementos de protección personal.
- Verificar el buen estado de la plataforma de trabajo.
- Uso de las herramientas adecuadas y que estén en óptimas condiciones.

12.4. TRANSPORTE DE PLANTA ASFALTO.

Etapa que consiste en trasladar la planta asfáltica, desde otra faena o del taller central de la Empresa, al lugar preestablecido para su instalación.

Riesgos identificables.

- Caída de distinto nivel de partes y/o piezas de la planta.
- Golpe con materiales y/o herramientas.
- Aprisionamiento.
- Caída a distinto nivel de operarios al amarrar piezas y partes sde la planta.
- Sobre esfuerzos.
- Accidente carretero.

Medidas preventivas.

- Asegurar rampas de accesos.
- Asegurar amarras de cables.
- Superficie de trabajos libre de aceites y/o grasas.
- Ingreso al sector de sólo personal autorizado.
- Revisar funcionamiento de frenos y estado mecánico del vehículo transportador.
- Instruir al chofer en manejo a la defensiva.
- Capacitar a los trabajadores que intervendrán en esta maniobra.
- Uso de elementos de protección personal.

12.5. MONTAJE DE PLANTA ASFALTO.

Esta etapa consiste en armar la planta de asfalto, en el lugar previamente escogido, considerando aspectos tales como: distancia media de transporte, pozos de empréstito, agua, luz, vientos predominantes, entorno, caminos de accesos.

Riesgos identificables.

- Caída a distinto nivel del trabajador.
- Caída de distinto nivel de piezas y partes de la planta asfáltica.
- Golpeado con elementos.
- Sobre esfuerzo.
- Exposición a rayos ultravioletas.
- Caída a un mismo nivel.
- Aprisionamiento.
- Golpeado contra.
- Quemaduras con soldaduras.
- Proyección de partículas.

Medidas preventivas.

- Uso de elementos de protección personal.
- Evitar dualidades de mandos.
- Verificar estado de estrobos y amarras.
- Charla sobre levantamientos de elementos.
- Verificar plataformas de trabajo.
- Ingreso sólo personal autorizado.
- Traslado de los elementos con movimientos lentos por parte de los operadores de maquinaria utilizada.

12.6. PUESTA EN MARCHA DE LA PLANTA.

En esta etapa debe comprobarse que toda la planta esté funcionando de acuerdo a lo planificado.

Riesgos identificables.

- Atrapamiento.
- Exposición al ruido.
- Riesgos eléctricos.
- Caída a distinto nivel.
- Exposición a polvo.
- Proyección de partículas.

Medidas preventivas.

- Capacitación a todos los operarios de la Planta, dando a conocer riesgos.
- Mantener operables equipos de extinción de incendios.
- Confección de un plan de emergencia y evacuación de la planta.
- Orden y limpieza.
- Involucrados en su operación.
- Capacitación en el uso de extintores.
- Uso de los elementos de protección personal: cascos de seguridad, zapatos de seguridad, trompas para polvos, antiparras.
- Ingreso de sólo personal autorizado.
- Protección de partes en movimientos.
- Instalaciones eléctricas de acuerdo a norma y operadas por personal autorizado.

12.7. ALIMENTACIÓN DE TOLVAS DOSIFICADORAS.

Etapa que corresponde a la alimentación de las tolvas dosificadoras, ya sea con camiones de volteo o directamente con cargador frontal.

Riesgos identificables.

- Atropellamiento del señalero.
- Aprisionamiento del señalero.
- Golpeado por proyección de partículas.
- Caída de distinto nivel de la maquinaria.
- Exposición a polvo.

Medidas preventivas.

- Bocina de retroceso en máquinas en perfecto estado de funcionamiento.
- Iluminación en perfecto estado en caso de faenas nocturnas.
- Asegurar buen estado de rampas de acceso.
- Mantener despejada el área de trabajo.
- Espejos retrovisores en buen estado.
- Uso de elementos de protección personal: zapatos de seguridad, cascos de seguridad, chalecos reflectantes, trompas antipolvo, protectores auditivos.
- Señalización en perfectas condiciones.
- Capacitación al señalero.

12.8. DOSIFICACIÓN DE LOS ARIDOS EN LAS TOLVAS.

Etapa correspondiente a la dosificación de los áridos que deben pasar por cada tolva, de acuerdo a las especificaciones técnicas de la mezcla.

Riesgos identificables.

- Caída a distinto nivel.
- Riesgos eléctricos.
- Atrapamientos.
- Riesgos de incendio.

Medidas preventivas.

- Colocación de barandas.
- Protección a partes en movimiento (poleas, correas).
- Protección de motor eléctrico contra caídas de líquido, mantenerlo en zonas secas, libre de polvos.
- Uso de elementos de protección personal.
- Uso de vestuario ceñido a pies, cintura y tobillos.
- Manipulación eléctrica sólo por personal autorizado.

12.9. TRANSPORTE DE LOS ARIDOS POR CORREAS TRANSPORTADORAS.

Esta etapa consiste en el transporte del árido ya dosificado, a través de correas transportadoras que lo llevan al tambor mezclador.

Riesgos identificables.

- Caída de materiales.
- Exposición a ruido.
- Caídas a distinto nivel.
- Exposición a polvo.
- Atrapamiento.
- Proyección de partículas.

Medidas preventivas.

- Uso de elementos de protección personal.
- Ingreso de sólo personal autorizado.
- Protección y revisión preventiva al sistema eléctrico por personal autorizado.
- Señalización adecuada.
- Protección adecuada de partes en movimiento.
- Delimitar zona de trabajo.

12.10. SECADO DEL ÁRIDO EN TAMBOR GIRATORIO.

Esta etapa contempla el secado del árido a temperaturas de 160°C, para luego ser mezclado con el asfalto. El árido dosificado, es transportado a través de una cinta transportadora que lo introduce al tambor giratorio

Riesgos identificables.

- Exposición a ruido.
- Exposición a calor y/o posibles quemaduras.

- Contacto con partes y piezas en movimiento.
- Caída de áridos de la cinta.

Medidas preventivas.

- Uso de protectores auditivos.
- No usar ropa suelta.
- Mantenimiento preventivo de las instalaciones.
- Instalación eléctrica y señalización de tableros de acuerdo a norma y a cargo de personal autorizado.

12.11. DESCARGA DEL ASFALTO A ESTANQUES.

Esta etapa contempla la descarga de los tipos de asfalto que sean necesarios para la faena, procedentes de los centros abastecedores, que llegan a la obra por medio de camiones estanques.

Riesgos identificables.

- Caída a distinto nivel del camión.
- Exposición al calor o quemaduras.
- Peligro de incendios.
- Caída a distinto nivel del trabajador.
- Exposición a gases tóxicos.

Medidas preventivas.

- Asegurar rampas de accesos.
- Operar sólo personal autorizado.

- Evitar inhalaciones de gases y vapores de asfalto.
- Tener a mano y operable equipo de extinción de incendios.
- Colocación de señalización y defensas de borde.
- Uso de elementos de protección personal: protector facial, guantes, zapatos de seguridad, casco de seguridad, chaleco reflectante.
- Trabajar con temperaturas bajo punto de inflamación.

12.12. MEZCLA DEL ARIDO CON ASFALTO.

En esta etapa se materializa la unión íntima del árido con el asfalto, a temperaturas aproximadas de 160°C, en un horno giratorio.

Riesgos identificables.

- Exposición a ruido.
- Peligro de incendio.
- Exposición a calor.
- Atrapamiento.

Medidas preventivas.

- Uso de protección auditiva.
- Capacitación al personal en el uso de extintores.
- Colocar barreras de protección en área de tambor.
- Ingreso sólo de personal autorizado.
- Mantener operables los equipos de combate de incendio.
- Protección de partes y piezas en movimiento.
- Protección de instalaciones eléctricas y tableros.

12.13. COLECTOR DE POLVO.

Se pretende en esta etapa minimizar el daño ecológico, producto de las partículas de polvo lanzadas al aire, como resultado del calentamiento de los áridos y la revoltura a continuación con el asfalto. Para evitar esta polución de polvo, las partículas en suspensión, antes de pasar a la chimenea, son bañadas por una cortina de agua, y de esta manera atrapadas y depositadas en unas piscinas decantadoras, para luego aprovechar el agua. El agua resultante de este proceso, sale a temperaturas aproximadas de 70-80 °C.

A este sistema de capacitación se le conoce por vía húmeda.

Riesgos identificables.

- Quemaduras con agua caliente.
- Instalación de polvo al limpiar mangas.
- Contaminación acústica.

Medidas preventivas.

- Cercar contorno de piscinas decantadoras.
- Uso de protectores respiratorios (trompas) con filtro para polvo.
- Señalizar el área.
- Uso de protectores auditivos.

12.14. CARGUIO Y TRANSPORTE DE LA MEZCLA ASFÁLTICA.

Esta etapa consiste en el cargar la mezcla asfáltica directamente del silo a camiones, accionados desde la sala de comandos.

Riesgos identificables.

- Colisión o choque.
- Caída de mezcla asfáltica.

Medidas preventivas.

- Planificación de la ubicación de la Planta.
- Iluminación óptima en caso de faenas nocturnas.
- No sobrepasar la capacidad del camión transportador.
- Vías de acceso con visibilidad y buena señalización.
- Personal autorizado y capacitado.

12.15. DESCARGA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA.

Esta Etapa consiste en la descarga del camión con mezcla asfáltica a la cancha, donde es recibida en el capacho de la «finisher» o colocadora de la mezcla.

Riesgos identificables.

- Caídas de mezcla asfáltica.
- Exposición a calor.
- Aprisionamiento.
- Quemaduras.
- Inhalación de gases tóxicos.

Medidas preventivas.

- Uso de elementos de protección personal.
- No inhalar los vapores y gases del asfalto.
- Alarma de retroceso en camiones cargadores.

12.16. EXTENDEDORA DE PRODUCTOS BITUMINOSOS.

Riesgos identificables.

- Caída de personas desde la máquina.
- Los derivados de los trabajos realizados bajo altas temperaturas, (suelo caliente, más radiación solar, más vapor).
- Quemaduras.
- Atropello durante las maniobras de acoplamiento de los camiones de transporte de aglomerado asfáltico con la extendedora.
- Caída de personas al mismo nivel.
- Los derivados de la inhalación de vapores de betún asfáltico, (nieblas de humos asfálticos).
- Sobre esfuerzos.

Medidas preventivas.

- No permitir la permanencia sobre la extendedora en marcha a otra persona que no sea su conductor, para evitar accidentes por caída.
- Los operarios de auxilio quedarán en posición en la cuneta por delante de la máquina durante las operaciones de llenado de la tolva, para evitar riesgos por atrapamiento y atropello durante las maniobras.

- Las maniobras de aproximación y vertido de productos asfálticos en la tolva deben estar a cargo de un especialista.
- Los bordes laterales de la extendedora, deberán estar señalizadas con bandas amarillas y negras alternativamente, para prevenir atrapamientos.

BIBLIOGRAFÍA

ALVARADO, Francisco y BRAVO, Roberto. Producción de mezclas asfálticas ecológicas Asfaltos Nacionales S.A. En: 9 CONGRESO IBEROAMERICANO DEL ASFALTO. Asunción, Paraguay. 1997.

BARDESI, Alberto. Reciclado en frío con emulsión. Diseño y aplicaciones. Madrid. Intevia, 1996.

CASTRO F., Pedro. Evaluación de concreto asfáltico reciclado, mezclado en caliente, como alternativa de rehabilitación de pavimentos en Nevada. En: 9 CONGRESO IBEROAMERICANO DEL ASFALTO. Asunción, Paraguay. 1997.

CUEVAS HERNANDEZ, Ricardo. Experiencia colombiana sobre el reciclaje en frío en el sitio, de pavimentos asfálticos usando materiales bituminosos. En: 9 CONGRESO IBEROAMERICANO DEL ASFALTO. Asunción, Paraguay. 1997.

DE RIVERA, Gustavo. Reciclado de pavimentos en frío empleando emulsiones asfálticas catiónicas. México, Alfaomega. 1997.

FERNANDEZ DEL CAMPO, J. A. Pavimentos bituminosos en frío. Barcelona, Editores técnicos asociados. 1983.

----- . Nuevo manual español de reciclado de firmes usando emulsión asfáltica. En: 9 CONGRESO IBEROAMERICANO DEL ASFALTO. Asunción, Paraguay. 1997.

FIELD, Barry C., y AZQUETA OYARZUN, Diego. Economía y Medio Ambiente. Bogotá, McGraw Hill. 1998.

HANTHEQUESTE C., Samuel, COLEN, Elomir y MARCON, Antonio F. Deformações resiliente e plásticas de misturas asfálticas recicladas empregadas na rodovia Presidente Dutra (Brasil). En: 9 CONGRESO IBEROAMERICANO DEL ASFALTO. Asunción, Paraguay. 1997.

MASCIARELLI, Eduardo, et al. La consideración de la vulnerabilidad a los Peligros Naturales en la evaluación de proyectos viales. En: 9 CONGRESO IBEROAMERICANO DEL ASFALTO. Asunción, Paraguay. 1997.

MENDEZ, J. M. Recuperación total de espesores en la carretera Buga – Tulúa. En: 2 CONGRESO IBEROAMERICANO DE EMULSIONES ASFÁLTICAS. Bucaramanga, Junio de 1993.

PEART, José E., y PANERO, Jorge R. Reciclado en caliente de mezclas asfálticas. Pistas experimentales. Nuevas Técnicas. En: 9 CONGRESO IBEROAMERICANO DEL ASFALTO. Asunción, Paraguay. 1997.

PERFETTI, Jorge, DOGLIOLI, Alberto P, y EBRECHT, Roberto. Reciclado en frío “in situ” en Argentina. En: 9 CONGRESO IBEROAMERICANO DEL ASFALTO. Asunción, Paraguay. 1997.

RAMOS, Celso R., et al. Experiencia de reciclagem de mistura asfáltica no Município do Rio de Janeiro. En: 9 CONGRESO IBEROAMERICANO DEL ASFALTO. Asunción, Paraguay. 1997.

ROJAS LIBREROS, Gentil. El impacto ambiental y social en los proyectos de construcción. Bogotá, tercer Mundo. 248 p.

ROULLEAU, Jean – Noel. La utilización de los recubrimientos drenantes: reducción de los impactos en el medio ambiente. En: 9 CONGRESO IBEROAMERICANO DEL ASFALTO. Asunción, Paraguay. 1997.

SIMPOSIO COLOMBIANO SOBRE INGENIERÍA DE PAVIMENTOS. Universidad Industrial de Santander. Noviembre 10 al 12 de 1993. 428 p.

TUCHUMANTEL J., Osvaldo. Considerações de Trechos experimentais após sete anos com misturas recicladas a frío. En: 9 CONGRESO IBEROAMERICANO DEL ASFALTO. Asunción, Paraguay. 1997.

ULLOA, J. Reciclaje en planta de carpetas asfálticas. En: 2 CONGRESO IBEROAMERICANO DE EMULSIONES ASFÁLTICAS. Bucaramanga, Junio de 1993.