



ESTADO DEL ARTE DE LA FATIGA AMBIENTAL EN LOS PAVIMENTOS



ING. FREDDY ALEJANDRO COVILLA MARTÍNEZ

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ
2007



ESTADO DEL ARTE DE LA FATIGA AMBIENTAL EN LOS PAVIMENTOS



ING. FREDDY ALEJANDRO COVILLA MARTÍNEZ

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
MAGÍSTER EN INGENIERÍA CIVIL

ASESOR

ING. JAIRO ALBERTO ESPEJO MOLANO M.sc.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ
2007



AGRADECIMIENTOS

A Dios por iluminarme cada día de mi vida.

A mis padres por enseñarme que todo es posible y que los límites están en la mente.

A mis hermanos Juan Carlos y Andrés por su apoyo incondicional.

A mi asesor el Ing. Jairo Espejo, por haberme guiado y depositado su confianza en mí.

A los profesores del Dpto. de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los

Andes que me orientaron.



TABLA DE CONTENIDO

TITULO	Pág.
CAPITULO 1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	8
1.1 Aspectos Generales	8
1.2 Objetivos Generales	9
1.3 Objetivos Específicos	10
1.4 Contenido	10
1.5 Justificación	11
1.6 Alcance	11
1.7 Metodología	12
CAPITULO 2. GENERALIDADES SOBRE EL DETERIORO DE LOS PAVIMENTOS	13
2.1 Antecedentes	14
2.2 Definiciones referentes al comportamiento de ligantes Asfálticos y daños ocasionados por los factores ambientales	15
2.3. Comportamiento del Asfalto a diferentes temperaturas	16
2.4. Comportamiento del pavimento frente a la presencia del agua.	19
2.4.1. Precipitación	21
2.4.2. Humedad Relativa	22
2.5. Comportamiento del pavimento frente a la Radiación solar.	23
2.6. Comportamiento del pavimento frente a la velocidad del viento	25
CAPITULO 3. DESARROLLO DE LA PROBLEMÁTICA	26
3.1. Casos puntuales en Latino América	26
3.1.1. Pavimentos de Altura	26
3.2. Desarrollos realizados en Norte América	28
3.2.1. Factores y efectos ambientales a tener en cuenta en el diseño de pavimentos	28
3.2.1.1. <i>Herramientas de modelación climática. Modelo</i>	



<i>Reforzado Climático Integrado</i>	30
3.2.2. Análisis del diseño de pavimentos flexibles	31
3.2.2.1. <i>La apreciación global del proceso de diseño de los pavimentos flexibles</i>	31
3.2.2.2. <i>Predicción del deterioro.</i>	33
3.2.2.3. <i>Datos de entrada para el diseño de pavimentos flexibles nuevos.</i>	33
3.2.2.4. <i>Clima</i>	34
3.2.2.5. <i>Datos de entrada del clima</i>	34
3.2.3. Variación de las propiedades de los materiales en los pavimentos asfálticos por variables ambientales	35
3.2.4. Coeficiente de drenaje de de la AASHTO para pavimentos flexibles	38
3.2.5 Comportamiento en las carpetas asfálticas influenciadas por las variables climáticas	41
3.2.6. Comportamiento de los diferentes tratamientos para el mantenimiento de los pavimentos asfálticos	45
3.3. Experiencias en Europa	46
3.3.1. Soluciones a vías en afirmado sometidas a inclemencias Climáticas	47
CAPITULO 4. OTRAS APLICACIONES PARA CONTRARRESTAR LOS EFECTOS AMBIENTALES EN PAVIMENTOS	50
4.1 Comportamiento de pavimentos de concreto hidráulico y software para su simulación	50
CAPITULO 5. CONCLUSIONES	52
CAPITULO 6. RECOMENDACIONES	54
CAPITULO 7. REFERENCIAS	56



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estado de la red vial por observación visual a Junio de 2004	9
Tabla 2. Coeficiente de drenaje recomendado para pavimentos flexibles con bases y subbases no tratadas	40
Tabla 3. Duración de las Condiciones climáticas por temporadas	40
Tabla 4. Calidad de drenaje de la subrasante.	41
Tabla 5. Características de la subrasante de las vías en afirmado a intervenir en Lituania	48
Tabla 6. Indicadores de los factores influénciales de la resistencia de las vías en afirmado dependiendo de la susceptibilidad al congelado de la subrasante	48



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Información sectorizada por departamentos de la red nacional a cargo de INVIA S	9
Figura 2. Factores ambientales que afectan la estructura de un pavimento	13
Figura 3. Curva de deterioro del pavimento	13
Figura 4. Comportamiento visco-elástico del asfalto	18
Figura 5. Respuesta Esfuerzo-Deformación de un material visco-elástico	19
Figura 6. Comportamiento del asfalto a diferentes temperaturas	19
Figura 7. Comportamiento del asfalto a diferentes temperaturas	19
Figura 8. Deformación (Et) Vs. Repetición de carga	21
Figura 9. Comportamiento del concreto asfáltico frente a la precipitación	22
Figura 10. Comportamiento del concreto asfáltico frente a la humedad del Medioambiente	23
Figura 11. Comparación de G^* a 2 y 6 meses de servicio comparado con resultados de muestras envejecidas	24
Figura 12. Efecto de los rayos Ultra Violetas en el concreto asfáltico	24
Figura 13. Transferencia de calor entre la superficie del pavimento y el aire en un día soleado	25



Figura 14. Proceso de diseño global para los pavimentos flexibles	32
Figura 15: Cambios de temperatura en el año, registrados por sensores en el pavimento	37
Figura 16: Aumentos en el modulo a causa del incremento de la temperatura	37
Figura 17: Proceso usado para cuantificar la relación entre los factores climáticos y las propiedades de los materiales del pavimento	38
Figura 18: Incremento de la rugosidad en zonas climáticas	44
Figura 19: Efectos del incremento de la rugosidad por el espesor de la carpeta	44



CAPITULO 1. DESCRIPCION DE LA INVESTIGACION

1.1. Aspectos Generales

El deterioro de los pavimentos esta dado tanto por las cargas repetitivas a las que se encuentra sometido, como por los diferentes factores ambientales que en el inciden, este ultimo es un tema que se ha venido desarrollando hace algún tiempo, la preocupación generada por la disminución de la vida útil de los pavimentos en lugares que están sometidos a condiciones climáticas variables o en algunos casos extremas y la necesidad de llegar a prolongar la durabilidad de los mismos, disminuyendo los altos costos de mantenimiento y rehabilitación de las vías, ha contribuido a que cada vez mas se realicen investigaciones para solucionar dicho problema.

Otro aspecto que juega un papel fundamental en la vida útil de los pavimentos es la proyección integral de estos, que se compone de diferentes etapas como lo son la concepción, el diseño, construcción, operación, mantenimiento o rehabilitación. Irónicamente en Colombia en ninguna de las etapas antes mencionadas, se tiene en cuenta la variable ambiental, la cual tiene una gran incidencia en la curva de deterioro de los pavimentos.

Por otra parte hay que tener en cuenta que el crecimiento económico y el desarrollo en general de un país siempre estará definido por el estado de su infraestructura vial, ya que al estar esta en buenas condiciones permitirá que el país pueda tener unos costos de operación del transporte mucho mas bajos, lo que influirá en el precio ultimo de sus productos, quedando de esa forma en un puesto mas competitivo que otros países del mismo nivel de desarrollo.

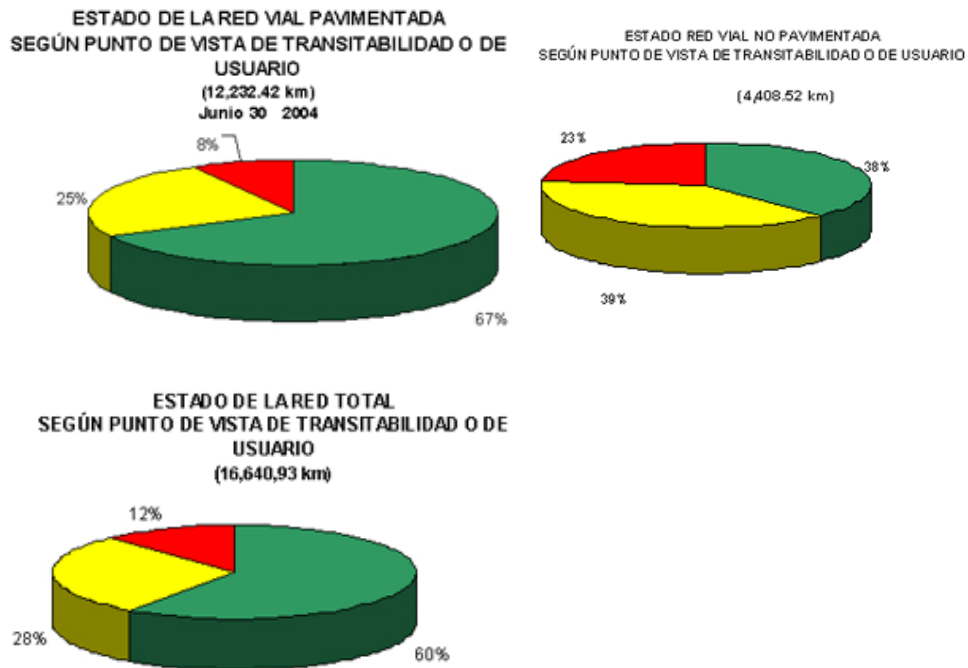


En Colombia la infraestructura vial esta constituida por:

Tabla 1: Estado de la red vial por observación visual a Junio de 2004¹

TOTAL RED NACIONAL	RED PAVIMENTADA			RED AFIRMADA			RED TOTAL		
	B	R	M	B	R	M	P	A	TOTAL
Longitud (km)	8.254,04	3.007,30	971,08	1.664,77	1.718,27	1.025,48	12.232,42	4.408,52	16.640,93
Porcentaje	67%	25 %	8%	38%	39%	23%	73.5%	26.5%	100.00%

Figura 1: Información sectorizada por departamentos de la red nacional a cargo de INVIAS e incluye únicamente la red vial principal².



1.2 Objetivos Generales

Realizar un estudio a nivel internacional del estado del arte de la fatiga ambiental de los pavimentos y un análisis comparativo en el contexto nacional e internacional.

¹ Instituto Nacional de Vías INVIAS. Distribución de la infraestructura vial en Colombia. <http://www.invias.gov.co> (ultima visita, 15 de noviembre de 2006)

² Ibid.



1.3. Objetivos Específicos

- Determinar las condiciones actuales del estado del arte de la fatiga ambiental de pavimentos.
- Determinar los factores ambientales que mas daño le causan a los pavimentos.
- Proponer los estudios que se deben realizar para tener en cuenta los factores ambientales al momento de diseñar.
- Analizar el impacto a nivel nacional que generaría la implementación de unas normas que disminuyan el envejecimiento de los pavimentos por causas de factores ambientales.
- Concientizar a los diseñadores del país a través de publicaciones de los resultados obtenidos en el presente estudio, de la necesidad de tener en cuenta, al momento de diseñar, los diferentes factores ambientales que tanto daño le causan al pavimento.

1.4. Contenido

La presente tesis esta conformada por seis (6) capítulos en los cuales se trataran los siguientes aspectos:

En el primero, se hará una descripción de la investigación, el porqué se realizo, que se desea obtener, hasta donde se piensa llegar y la metodología a utilizar. Por otra parte en el segundo capitulo se explicaran cuales son las diferentes variables ambientales y como estas inciden en el deterioro de los pavimentos.

El tercer capitulo se enmarcara en el contexto internacional, se mostraran estudios de casos que se han presentado en otros países, tecnologías utilizadas para mitigar los efectos generados por los factores ambientales en los pavimentos analizados. En el cuarto capitulo se describen otras aplicaciones para contrarrestar el deterioro de los pavimentos por factores ambientales y por ultimo en los capítulos quinto y sexto se presentan las conclusiones y las recomendaciones respectivamente.



1.5. Justificación

El motor de la presente investigación radica principalmente en la no inclusión de las variables ambientales en las normativas, al momento de hacer los diseños de pavimentos y el desconocimiento por parte de muchos ingenieros del país de este tema, que en algunos casos puede ser la mayor causa de deterioro de una vía.

Otra razón de gran peso son los costos generados por cada kilómetro de carretera mejorado, que en promedio en un pavimento flexible le cuesta al estado cerca de 570 millones de pesos, lo que deja entrever que las inversiones terminan siendo muy elevadas en mantenimiento y reducidas en cuanto a la vida útil de los pavimentos respecta³.

Con lo anterior, podemos deducir que es mucho mejor asegurar una larga vida en los pavimentos, que tener unos de calidad media que sean intervenidos constantemente. En Colombia al momento de diseñar los pavimentos se tiene en cuenta, el tráfico al que va estar sometido, las cargas que va a soportar, pero pocas veces los factores externos como la precipitación, el viento, la radiación solar, la humedad relativa, etc., que según investigaciones en el contexto internacional se convierten en agentes acelerantes en el proceso de envejecimiento de una vía. Estos agentes son conocidos en el área de la ingeniería de pavimentos como: La variable ambiental o la fatiga ambiental.

Este trabajo se centrará en un estudio a nivel internacional del estado del arte de la fatiga ambiental de pavimentos.

1.6. Alcance

En la presente investigación se analizará el problema que se presenta en los pavimentos por la incidencia de la variable ambiental y se orientara una futura

³ Ministerio del Transporte. Importancia de la calidad en pavimentos asfálticos. En: AL DIA [Internet]. 2002. <http://www.mntransporte.gov.co/prensa/newinter/Home.htm>



investigación de cómo podrían estar influyendo en las diferentes zonas del país. De la misma forma se realizarán recomendaciones de posibles soluciones a los problemas antes mencionados a partir del estudio a nivel internacional del estado del arte de la fatiga ambiental de los pavimentos, teniendo en cuenta los diferentes factores que afectan a los pavimentos en las distintas regiones del país

Por último se publicarán los resultados obtenidos en la investigación, con el fin de concientizar a los diseñadores de pavimentos del país de lo necesario de su implementación, para poder llegar así, a una vida útil alta en un pavimento.

1.7. Metodología

El primer paso a seguir es la recopilación de la información existente en journals, papers, tesis de las universidades, empresas consultoras del país, Normativas existentes en las diferentes agencias reconocidas a nivel internacional. Además se buscarán las soluciones planteadas al problema en diferentes países que tengan condiciones climáticas similares a las de Colombia.

Luego se realizará un análisis de la información recopilada, se procederá a organizarla en el contexto que esta se desenvuelva y posteriormente se identificarán las variables ambientales que más afectan a los pavimentos en las diferentes regiones del país.

De lo anterior se obtendrá un esquema donde interactúen los agentes de mayor relevancia, con los problemas que estos acarrearán y se realizarán unas publicaciones con los resultados obtenidos.



CAPITULO 2. GENERALIDADES SOBRE EL DETERIORO DE LOS PAVIMENTOS

El deterioro de los pavimentos viene dado por varios componentes, uno de estos y hasta el momento el más estudiado y controlado es el paso repetitivo de cargas y el tipo de cargas a la que se va a someter la estructura. Otro aspecto importante que contribuye al deterioro de los mismos y al que se va a enfocar la presente investigación son los diferentes factores ambientales a los que estará sometida la estructura en su vida útil.

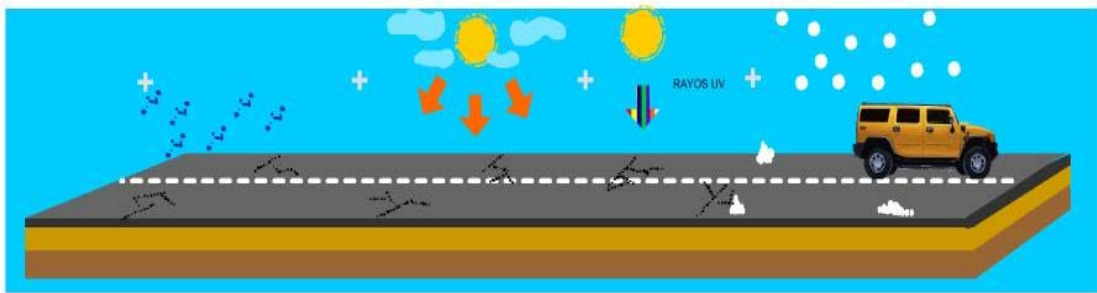
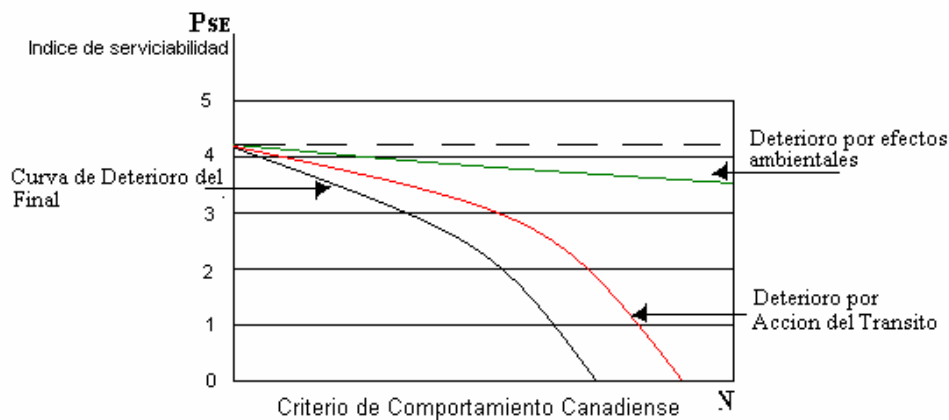


Figura2: Factores ambientales que afectan la estructura de un pavimento

La acción conjunta de las variables antes mencionadas son fundamentales para disminuir la vida útil de un pavimento, pero en muchos países, como es el caso de Colombia la variable ambiental no es tenida en cuenta y según estudios realizados, esta tiene un grado de participación considerable en la curva de deterioro del pavimento, Lili (1985).



Fuente: Lili, F (1985)

Figura3: Curva de deterioro del pavimento⁴

⁴ LILI, F. (1985). Sistema Integral de Diseño de Pavimentos Flexibles – versión 2. Buenos Aires.



Los siguientes son factores ambientales :

- Temperatura
- Radiación Solar
- Humedad Relativa
- Precipitación
- Velocidad del viento

2.1 Antecedentes

Los primeros pasos dados en Latinoamérica en la inclusión de la variable ambiental en modelos de diseño de pavimentos desarrollado por computadora, se dieron en 1983 con el SIDPF1 y su posterior Actualización en 1985 con el SIDPF2 denominado Sistema Integral de Diseño de Pavimentos Flexibles (Llil, F. 1985).

Con este modelo se buscaba analizar un pavimento en un periodo determinado, de acuerdo a unos parámetros establecidos, teniendo en cuenta un tráfico acorde al periodo de vida útil de la vía y todas las etapas por las que esta pasara, desde su concepción, diseño, implementación, construcción, operación, mantenimiento y rehabilitación. De igual forma se manejan tanto los costos generales de la vía como los costos extras generados al usuario.

En los pavimentos los modelos de deterioro pueden ser del tipo empírico-estadístico o Mecanicístico-racional, uno y otro nos pueden predecir los diversos tipos de falla. En la segunda actualización del modelo en 1985 se utiliza para complementar el criterio AASHO, el utilizado en ese entonces por los canadienses en el estado de Ontario, que se basaba en la deformabilidad de los pavimentos en la subrasante.

En ese entonces se afirmaba que la deformación en la subrasante era el mejor indicador de la curva de deterioro del pavimento, debido a que al



repetirse constantemente esta deflexión en la subrasante, esta se iba a reflejar en la superficie.

En el presente modelo al momento de analizar las curvas de comportamiento se toma en cuenta el deterioro producido por el tráfico como a su vez el deterioro producido por la variable ambiental. Así mismo, se tienen en cuenta dos tipos de variables ambientales: La primera que es el factor regional R establecido por la AASHO, que tiene en cuenta las condiciones climatológicas de la zona y la otra donde se tiene en cuenta la actividad de las arcillas expansivas (frecuencias de ocurrencia, grado de actividad del suelo y tasa de desarrollo de rugosidad superficial).

2.2 Definiciones referentes al comportamiento de ligantes asfálticos y daños ocasionados por los factores ambientales.

La siguiente terminología se hace necesaria para una mejor comprensión del comportamiento reológico de ligantes asfálticos (Martínez, 2005) y del daño que los factores ambientales pueden ocasionar en la estructura del pavimento:

- **Reología⁵**: Es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de materiales, en cualquiera de sus formas, en términos de la elasticidad y viscosidad del material.
- **Elasticidad⁶** : Es la habilidad del material de almacenar energía deformacional y puede verse simplemente como la capacidad del material de recobrar su forma original después de haber sido deformado.
- **Viscosidad⁷** : Es la medida de la resistencia del material a fluir y refleja la rata de disipación de energía deformacional mediante flujo.
- **Viscoelasticidad⁸** : Es la respuesta del material a una fuerza o desplazamiento exhibiendo bien flujo elástico o viscoso o una

^{5,6,7,8} Tomado de: Notas de clase, Curso de Reología del Asfalto y Especificaciones SUPERPAVE, dictado por Andrés Rangel. Universidad de los Andes, julio 2002



combinación de los dos. Los materiales que exhiben este comportamiento se denominan viscosos.

- **Moisture damage** :Es “El deterioro progresivo de la funcionalidad de una mezcla asfáltica por la pérdida de la adhesión entre el cemento asfáltico y la superficie del agregado y/o por la pérdida de la resistencia a la cohesión del cemento asfáltico debido principalmente a la acción del agua” (Kiggundu and Roberts, 1988)
- **Humedad Relativa**⁹: es el cociente entre la humedad absoluta y la cantidad máxima de agua que admite el aire por unidad de volumen. Se mide en tantos por ciento y está normalizada de forma que la humedad relativa máxima posible es el 100%. La humedad relativa es una medida del contenido de humedad del aire y, en esta forma, es útil como indicador de la evaporación, transpiración y probabilidad de lluvia convectiva. No obstante, los valores de humedad relativa tienen la desventaja de que dependen fuertemente de la temperatura del momento.
- **Temperatura horaria**: Es la temperatura exacta registrada a cada hora del día.
- **Precipitación horaria**: Es la precipitación exacta registrada a cada hora del día.
- **Porcentaje de brillo del sol**¹⁰: Cociente entre la duración real del brillo solar y la duración geográfica o topográficamente posible.

2.3. Com portamiento del Asfalto a diferentes tem peraturas

Según Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement) el asfalto a temperaturas superiores a 50° es un material con un comportamiento de fluido newtoniano, es decir, hay una relación lineal entre fuerza resistente y velocidad lineal relativa. Al encontrarse en temperaturas intermedias el asfalto se comporta como un líquido de corte decreciente, pues se observara que la viscosidad disminuirá al aumentar la velocidad relativa entre las capas.

⁹ <http://personal.telefonica.terra.es/web/cvvega/indexhr.htm>; (ultima visita, 10 de Julio de 2007.)

¹⁰ <http://www.onamet.gov.do/?s=web&p=1025>; (ultima visita, 10 de Julio de 2007.)



Adicionalmente el asfalto caliente puede ser llamado plástico, porque una vez comienza a fluir, no regresan a su estado original. Por esa razón en climas cálidos algunos pavimentos bajo cargas repetitivas fluyen y forman ahuellamientos.

En climas calidos el ahuellamiento también es influido por las propiedades de los agregados. Por otro lado, cuando el pavimento se encuentra sometido a cargas rápidas o a bajas temperaturas, el asfalto se comporta como un sólido elástico, debido a que estos se deformaran al ser cargados y retornaran a su forma original al ser descargados. Si se aplicara una carga excesiva, el sólido puede romperse. Aunque el asfalto es un sólido elástico a baja temperatura puede volverse demasiado frágil y agrietarse bajo carga excesiva, esto se debe a los esfuerzos internos que se desarrollan en el pavimento cuando el proceso de contracción es restringido.¹¹

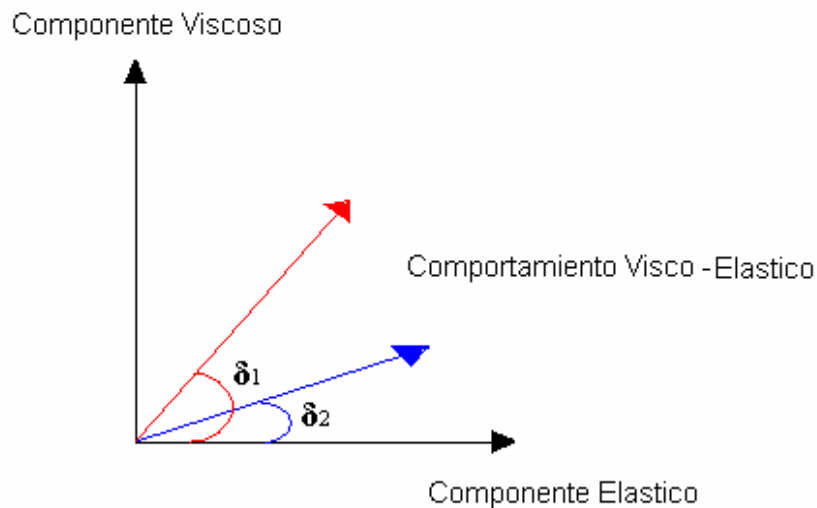
En asfaltos se han identificado varios tipos de envejecimiento, el primero que se presenta es la volatilización, este se da durante el mezclado en caliente y la construcción, donde los componentes livianos del asfalto se evaporan, lo que ocasiona que el asfalto se endurezca un poco.

Otro tipo de envejecimiento que se presenta es el que se da por oxidación, que ocurre al colocarse las moléculas del asfalto en contacto con el oxígeno, teniendo como resultado una estructura mucho mas frágil. Este se presenta por vez primera durante los procesos que se realizan antes de la colocación, con mayor incidencia en el mezclado en caliente, debido a que estas operaciones se realizan a temperaturas muy elevadas y el asfalto se encuentra en películas muy delgadas, logrando así una reacción por oxidación a una velocidad intermedia. Posteriormente se vuelve a presentar este tipo de envejecimiento en la puesta en servicio, en esta etapa se presentara a una velocidad mas baja, acentuándose un poco mas en climas calidos, en los periodos de verano.

¹¹ MC GEMINIS, Robert; SHULER, Scott y BAHIA, Hussain. (1994) Background of superpave asphalt binder test methods. (RAFAEL, Julia y JUGO Augusto, Trad.)



Al lograr los pavimentos cierto endurecimiento ocasionado por el envejecimiento por oxidación, claramente van a ser mas susceptibles a la fisuración, además los pavimentos recién colocados al no tener una buena compactación van a tener una gran cantidad de vacíos en la mezcla, lo que permitirá que el aire entre con mayor facilidad y contribuya a que se presente la oxidación.



Fuente: Superpave

Figura 4: Comportamiento visco-elástico del asfalto

En la grafica No. 4 Se pueden apreciar dos tipos de asfaltos diferentes , de los cuales el rojo tiene un mayor componente viscoso, lo que se vera reflejado en deformaciones permanentes al estar sometido a altas temperaturas y cargas sostenidas y por otro lado el azul el cual tiene un ángulo delta menor, con lo que demuestra que tiene un mayor componente elástico.

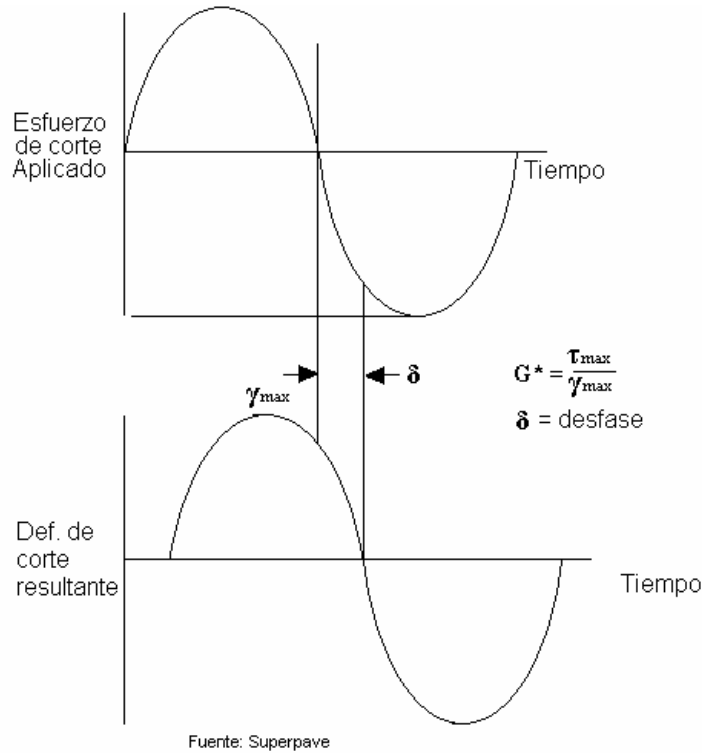


Figura 5: Respuesta Esfuerzo –Deformación de un material visco elástico

En la grafica No. 5 Vemos como el ángulo delta es igual al desfase entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante.

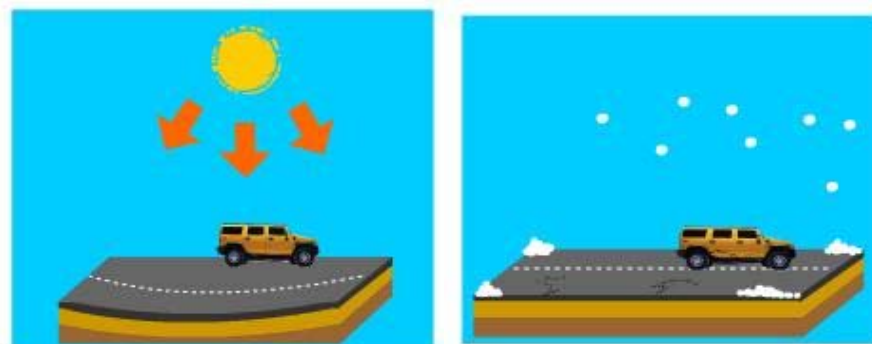


Figura 6 y 7: Comportamiento del asfalto a diferentes temperaturas

2.4. Comportamiento del pavimento frente a la presencia del agua.

Como bien es sabido el agua es uno de los peores enemigos de las estructuras de pavimentos, Thompson y Robnett (1979) demostraron que hay una relación directa entre el aumento de la humedad y la disminución del Modulo Resiliente,



esto sucederá tanto en las capas granulares como en la subrasante y esto conllevará a que en las capas asfálticas se presente una fisuración por fatiga, que permitirá un mayor paso del agua a toda la estructura del pavimento. Por esta razón los sistemas que se adopten para drenajes y subdrenajes al momento de realizar el diseño, tendrán una gran incidencia en el periodo de vida útil de nuestro pavimento.

Según Bohórquez (2003) la mezcla saturada con asfalto de Barranca sometida a la fatiga tiene muy poca recuperación a la deformación, debido a que cuando se realiza la rotura de la probeta, la filtración del agua permite una recuperación parcial pero acelera el proceso de la rotura ante las cargas cíclicas sometidas.

Durante todo el ensayo la muestra se encuentra en contacto con el agua a una temperatura ambiente, donde este último tiene uno de sus componentes como es el caso del oxígeno en contacto con la mezcla, produciéndole oxidación a la muestra, lo que deja entrever un aumento en la rigidez y disminución en la respuesta ante la deformación.

En el contexto internacional este tema es conocido como Moisture Damage y desde hace dos décadas este tema comenzó a ser objeto de muchas investigaciones. El Moisture Damage se enfoca en "El deterioro progresivo de la funcionalidad de una mezcla asfáltica por la pérdida de la adhesión entre el cemento asfáltico y la superficie del agregado y/o por la pérdida de la resistencia a la cohesión del cemento asfáltico debido principalmente a la acción del agua" (Kiggundu and Roberts, 1988).

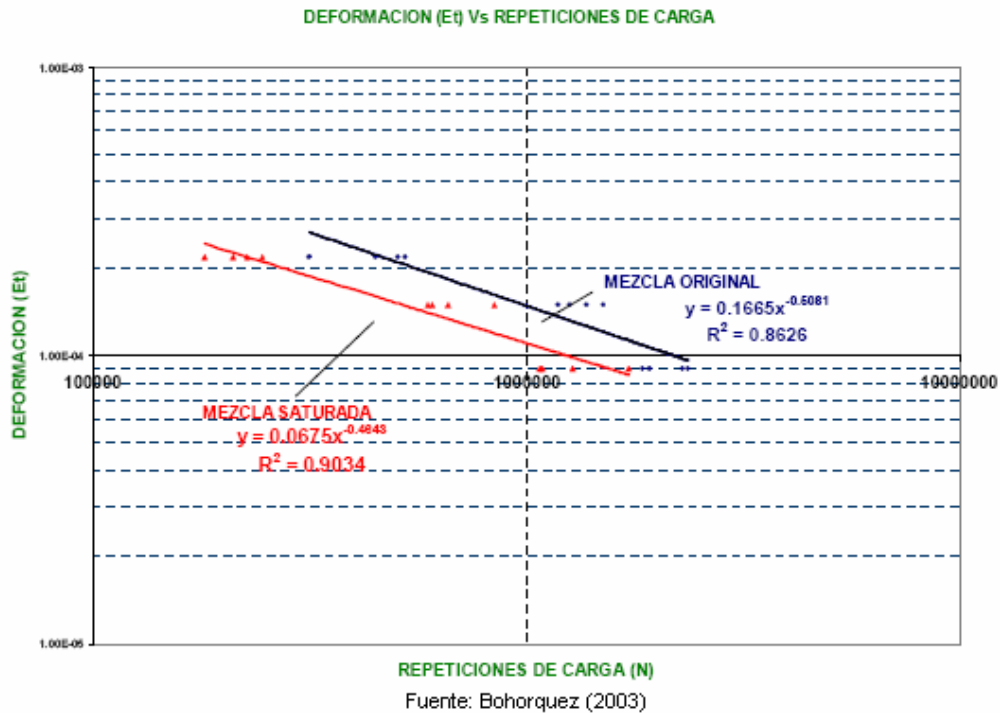


Figura 8: Deformación (E_t) vs. Repetición de carga

De acuerdo a la grafica No. 8 Podemos observar como en dos mezclas similares vamos a obtener una deformación permanente con un menor número de vehículos en la que se encuentra saturada.

2.4.1. Precipitación.

La precipitación constituye una de las principales causas de fluctuación de humedad en las capas de pavimentos (Bohórquez, 2003). Por otra parte estudios recientes establecieron relaciones entre la humedad optima de compactación y el contenido de humedad natural de los materiales granulares, las cuales obedecen a la precipitación media anual del sitio que se pretende analizar.

Agencias como la AASHTO utilizan la precipitación para modelar los flujos de calor en el pavimento.



Figura9: Comportamiento del concreto asfáltico frente a la precipitación

2.4.2. Humedad Relativa

Por humedad relativa se entiende el cociente entre la humedad absoluta y la cantidad máxima de agua que admite el aire por unidad de volumen. Se mide en tantos por ciento y está normalizada de forma que la humedad relativa máxima posible es el 100%.

En la atmósfera hay constantes movimientos de vapor de agua, pero siempre existirá un equilibrio entre el contenido de agua del suelo y la presión de vapor de esa atmósfera, es decir si el suelo tiene mayor contenido de agua al correspondiente a la humedad relativa reinante, el suelo perderá agua hasta alcanzar la condición de equilibrio y en caso contrario fijara humedad de vapor hasta alcanzar el mismo equilibrio.



Figura 10: Comportamiento del concreto asfáltico frente a la humedad del medio ambiente

2.5. Com portamiento del pavimento frente a la Radiación solar.

La Radiación solar es una de las variables con mayor incidencia en los pavimentos en todo el año, mas sin embargo son de las que menos interés por parte de los proyectistas tiene.” Según los manuales de radiación solar, publicados por la Universidad Nacional, Colombia no esta lejos de Arabia Saudita el país que mayor radiación solar recibe en el mundo con 6.8 Kwh. por metro cuadrado. La guajira recibe el 84 % de esa energía. La segunda zona del país... son los Llanos Orientales.... Incluso ciudades altas como Bogotá, mantienen en promedios en la mitad del punto de referencia árabe”¹²

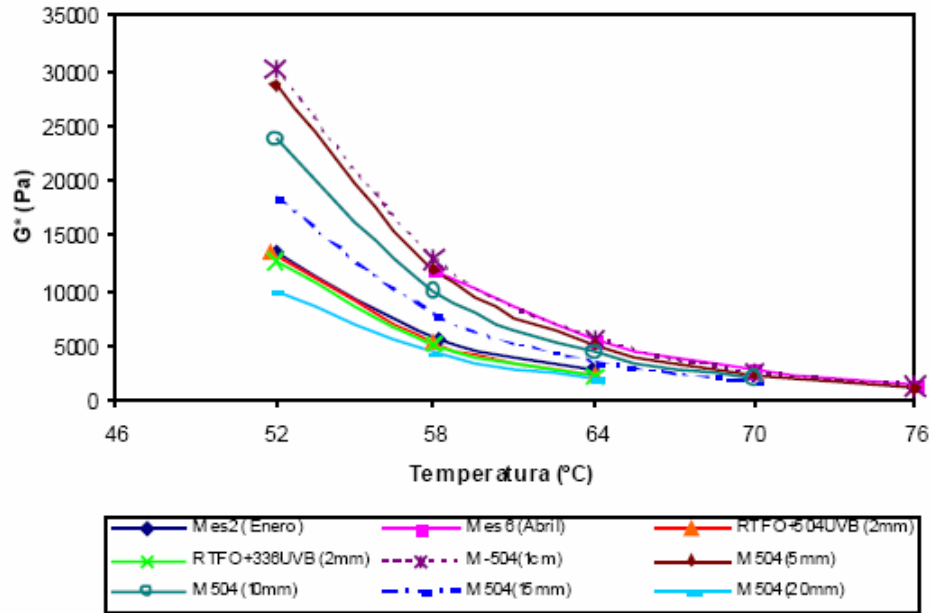
A la superficie terrestre los rayos solares pueden llegar de dos formas, la primera de forma directa que es cuando alcanzan la superficie sin encontrarse con partículas de polvo, aire o agua y la segunda forma de llegar es de manera difusa cuando los rayos interactúan con diferentes partículas presentes en la atmósfera, lo que induce a que se produzca la dispersión

Según ensayos hechos por (Martínez, 2005) para un asfalto Barranca 80-100 todas las muestras de ligante sin importar el espesor de la película experimentaron incremento en el modulo complejo, adicionalmente se

¹² Padilla, N. Escobarmora, C., Un negocio Caliente, Revista Cromos Noviembre 22 de 2004. pag 47



demonstró que hay una relación directa entre la influencia de los rayos ultra violeta y el espesor del asfalto



Fuente: Martinez, 2005

Figura 11: Comparación de G^* a 2 y 6 meses de servicio comparado con resultados de muestras envejecidas de forma acelerada en el laboratorio

En la grafica No. 11 como la muestra de 1cm de espesor alcanza el mismo modulo complejo de la muestra que tiene 5 mm, esto es posible a que la muestra de 1cm al tener mayor cantidad de masa puede almacenar el calor por mucho mas tiempo y puede ocasionarle un envejecimiento gradual.

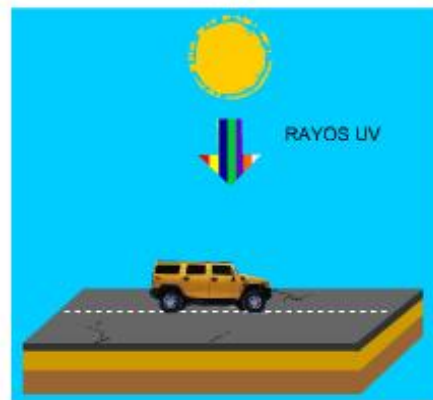


Figura 12 Efecto de los rayos Ultra Violetas en el concreto asfáltico



2.6. Com portamiento del pavimento frente a la velocidad del viento.

La velocidad del viento varia de acuerdo al tipo de región, en el litoral es donde mayor velocidad tiene y donde mayor daño causa, esto produce pérdida de finos en la rodadura, erosión y arrastre de material en el pavimento. De igual forma la velocidad del viento se utiliza para calcular el coeficiente de transferencia de calor de los pavimentos.

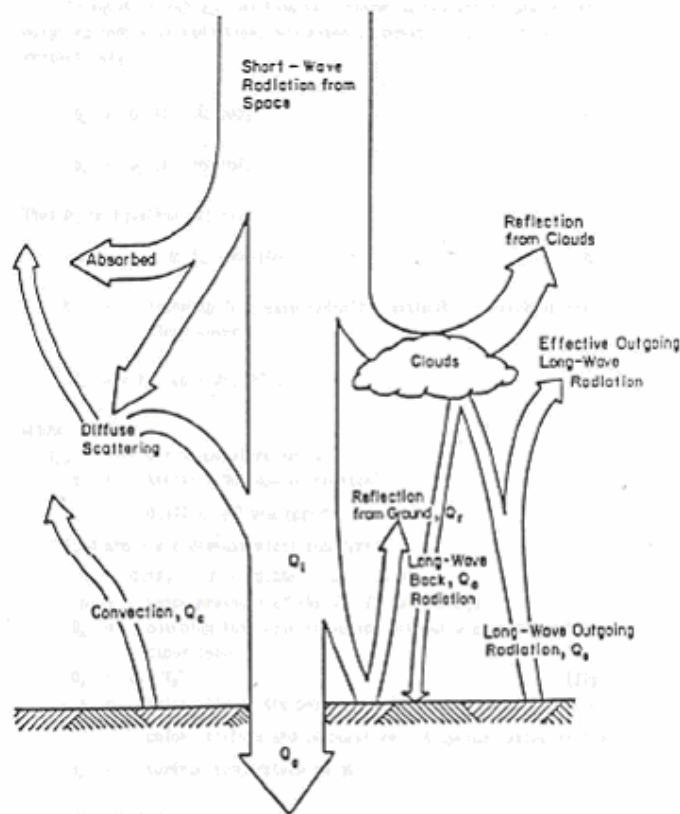


Figure 2.3.10. Heat transfer between pavement surface and air on a sunny day (3).

Fuente: AASHTO, 2002

Figura 13: transferencia de calor entre la superficie del pavimento y el aire en un día soleado



CAPITULO 3. DESARROLLO DE LA PROBLEMÁTICA

3.1. Casos Puntuales en Latino América

En Latinoamérica los pavimentos se ven afectados continuamente por las variables ambientales, a continuación se explicara específicamente sobre las zonas de altura, en donde las condiciones climáticas son adversas y los pavimentos nunca alcanzan a llegar en buen estado al final de su vida útil.

3.1.1. Pavimentos de Altura

Según Del Águila (1999), los pavimentos de altura se encuentran ubicados a alturas promedio de 3500 msnm, en Suramérica estos normalmente se presentan en la mayor parte de Bolivia y Perú con una longitud aproximada de 4.000 Km., las condiciones ambientales a las que están sometidos este tipo de pavimentos son bastante agresivas.

En estas zonas el gradiente térmico fluctúa hasta 60°C en 8 horas, con temperaturas que van de los -20°C en las madrugadas hasta los 20°C durante el día, adicionalmente la intensidad de la radiación solar en estas zonas es de 4 a 5 veces mayor que la presentada en el litoral.

Los principales fenómenos que se presentan en estas zonas son: el gradiente térmico, aguas subterráneas, la radiación solar y las temperaturas bajas. De igual forma hay grandes problemas con las fuentes de materiales en la región y la variedad de asfaltos disponibles al momento de preparar la mezcla.

Los suelos finos con presencia de agua subterránea son susceptibles al congelamiento, lo que dará origen a un posterior hinchamiento, de igual forma este fenómeno producirá pérdida de espesor efectivo en las capas granulares, lo que acortara notablemente la vida de los pavimentos. Por otra parte el agua superficial que se presenta en estas zonas, al ingresar por los vacíos existentes en la capa de rodadura ayuda a que se presente el fenómeno de oxidación en



los asfaltos y al trabajar conjuntamente con las cargas del tráfico, la presión de los neumáticos generara una presión de poros que ira destruyendo el pavimento gradualmente.

Fenómenos presentados en la capa de concreto asfáltico como el gradiente térmico, el cual ha sido poco analizado para estas zonas, da lugar a unos cambios volumétricos internos de gran importancia, que se ven reflejados en esfuerzos cíclicos de tracción – compresión, llevando así al pavimento a una falla por fatiga.

La intensa radiación solar presentada en esta zona ocasiona la evaporación de las partículas blandas del asfalto, creando así un envejecimiento prematuro y oxidación del asfalto en cuestión. Por otra parte esta crea pérdida de los finos en la rodadura, decoloración del pavimento e incremento en la permeabilidad de la capa.

Los problemas mencionados anteriormente no son los únicos, a esto se le agregan, cauces de ríos no explotables o con poca cantidad de material, bancos rocosos de origen volcánico con materiales de bajo peso específico y alta absorción del agua. Debido a la falta de agregado grueso en la región, se produce una mezcla de gradación fina de alto consumo de asfalto, dando origen a una mezcla blanda, de baja trabajabilidad y sumado a la procedencia única de asfalto (proveedor único, con una formula única), aseveran el deterioro del pavimento en la zona.

Para dar solución a estos problemas se han realizado varias pruebas, una de estas fue la de impermeabilización de la subrasante con un geotextil impregnado de asfalto, lo que evito que una vez producido el fisuramiento térmico el agua penetrara, a su vez se logro evitar deformaciones permanentes, conservando la capacidad estructural del pavimento y facilitando su mantenimiento.



Otra propuesta fue la de implementar asfaltos modificados, lo que traería consigo mezclas flexibles y elásticas a bajas temperaturas, con una mayor resistencia a la fatiga.

3.2 Desarrollos realizados en Norte América

Teniendo en cuenta que Estados Unidos de América es uno de los países más avanzados en cuanto al estudio de la incidencia de las variables ambientales en los pavimentos, es conveniente describir el estudio de casos presentados en dicho país y la tecnología utilizada para resolverlos.

3.2.1. Factores y efectos ambientales a tener en cuenta en el diseño de pavimentos¹³.

Las condiciones ambientales tienen un efecto significativo sobre el comportamiento tanto del pavimento rígido como del flexible. Factores externos como la lluvia, temperatura, ciclos de hielo-deshielo y el nivel freático juegan un papel importante en el impacto que va a tener el ambiente sobre el comportamiento del pavimento; Factores internos como la susceptibilidad de los materiales del pavimento a la humedad, al daño causado por el ciclo hielo deshielo, drenaje de las capas de pavimento, potencial de infiltración del pavimento y todos aquellos que de una u otra forma pueden hacer que el pavimento reaccione a las condiciones ambientales externas.

En la estructura de un pavimento, la humedad y la temperatura son las dos variables que afectan significativamente las propiedades de las capas y el terreno como tal. Alguno de los efectos del ambiente sobre el pavimento se menciona a continuación:

- Materiales asfálticos confinados tienen una variación dependiendo de la temperatura. El modulo puede variar de 2 a 3 millones psi o más durante los meses de invierno hasta 100000 psi o menos en meses calurosos.

¹³ AASHTO 2002. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Final report Part 2 design inputs, chapter 3 environmental effects. March 2004. Champaign, Illinois.



- En temperaturas congelantes, el agua en el suelo se congela y su modulo resiliente podría aumentar de 20 a 120 veces mas, que su valor antes de congelarse.
- El proceso de congelamiento puede estar acompañado de la formación de partículas de hielo que crean unas zonas donde se reducen los esfuerzos en el pavimento al descongelarse este.
- Todas las otras condiciones son iguales, los altos contenidos de humedad conllevando a los módulos mas bajos en los materiales inconfiados; sin embargo la humedad tiene dos efectos separados.
 - Primero, esta puede afectar el estado de los esfuerzos, a través de la succión o de la presión de poros del agua. El agregado grueso y el agregado fino puede presentar un incremento de su modulo de mas cinco veces, debido al secado del suelo. El modulo de los suelos cohesivos esta afectado por la interacción arcilla-agua-electrolitos, la cual es bastante compleja
 - Segundo, puede afectar la estructura del suelo por medio de la destrucción de la cementacion de las partículas del suelo.
- Los materiales confinados no están directamente afectados por la presencia de la humedad. Sin embargo, la humedad excesiva puede llevarlos a separarse en mezclas asfálticas o a tener unos efectos a largo plazo en la integridad estructural de materiales cementados confinados.

Los materiales cementados confinados pueda también que se dañen en los ciclos de hielo-deshielo, humedad y secado, demostrándose en la reducción del modulo y el aumento de las deflexiones. Los efectos del hielo-deshielo se experimentan en las capas inferiores, pero eventualmente tiende a presentarse distensiónamiento en la superficie del pavimento.

Todos los distensionamientos considerados en el documento de la AASHTO son inducidos en algún grado por factores ambientales. Por consiguiente, las



fluctuaciones diurnas y estacionales en los perfiles de la temperatura y la humedad en la estructura del pavimento son ocasionadas por cambios en el nivel freático, precipitación-infiltración, ciclos de congelamiento-deshielo y otros factores ambientales, los cuales se modelan de una manera muy detallada en el modelo empírico-mecanístico desarrollado por la AASHTO.

3.2.1.1. Herramientas de modelación climática. Modelo Reforzado Climático Integrado (The Enhanced Integrated Climatic Model EICM).¹⁴

Cambiar los perfiles de la temperatura y la humedad en la estructura del pavimento y la subrasante, por encima de la vida útil de diseño del pavimento, se contempla en la guía de diseño de la AASHTO gracias a la sofisticada herramienta de modelación climática llamada “The Enhanced Integrated Climatic Model” (EICM). El EICM es un programa de flujo de humedad y calor unidimensional, el cual simula los cambios en las características y el comportamiento de los pavimentos y los materiales de la subrasante en conjunto con las condiciones climáticas en muchos años de operación. El EICM esta conformado por los siguientes tres grandes componentes:

- The Climatic – Materials –Structural Model (CMS Model) desarrollado en la Universidad de Illinois.
- The CRREL Frost Heave and Thaw Settlement Model (CRREL Model) desarrollado en el Laboratorio de Investigación e Ingeniería de las Regiones Frías de la Armada de los Estados Unidos(United State Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL)
- The Infiltration and Drainage Model (ID Model) desarrollado en la Universidad de Texas A&M.

En resumen el EICM computa y predice la siguiente información a partir de los perfiles de los pavimentos y subrasantes: Temperatura, factor de ajuste del modulo resiliente, presión de poros del agua, contenido de agua, las profundidades de congelamiento y deshielo, la caída de la escarcha y el

¹⁴ Ibid.



comportamiento del drenaje. Este modelo se puede aplicar tanto para pavimentos asfálticos como para pavimentos en concreto.

3.2.2. Análisis del diseño de pavimentos flexibles.¹⁵

Según la AASHTO 2002 el diseño de pavimentos tiene que satisfacer los siguientes criterios: deformación permanente (rutting-ahuellamiento), fisuramiento por fatiga, fisuramiento por temperatura, rugosidad, si el diseño no satisface estos criterios entonces es replanteado hasta que este cumpla con todos.

Una vez que el diseño cumpla con el criterio de performance, es considerado factible desde un punto de vista estructural y funcional, adicionalmente se pueden comenzar a evaluar los costos del ciclo del pavimento.

3.2.2.1. La apreciación global del proceso de diseño de los pavimentos flexibles

1. Establezca una serie de ensayos de prueba para las condiciones específicas del sitio, defina la resistencia de la subrasante, las propiedades del concreto asfáltico y de otros materiales del pavimento, tráfico, cargas, clima, tipo de pavimento, diseño y características de la construcción.
2. Establezca un criterio con el que se obtenga un comportamiento aceptable del pavimento al final del periodo de diseño (i.e., niveles aceptables de ahuellamiento, fisuramiento por fatiga, fisuramiento térmico e IRI)
3. Seleccione el nivel deseado de confiabilidad para cada uno de los indicadores de comportamiento.
4. El proceso de ingreso para obtener valores mensuales de ingreso de tráfico y variaciones estacionales, climáticos y de materiales, necesarios en las evaluaciones de diseño para el periodo de la vida útil.

¹⁵ AASHTO 2002. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Final report Part 3 design analysis, chapter 3 design of new and reconstructed flexible pavements. March 2004. Champaign, Illinois.



5. Computar las solicitaciones estructurales (esfuerzos y tensionamiento) usando la teoría elástica multicapa o modelos de elementos finitos basados en las solicitaciones del pavimento para cada tipo de eje, carga y para cada calculo de incremento de daño a través del periodo de diseño.

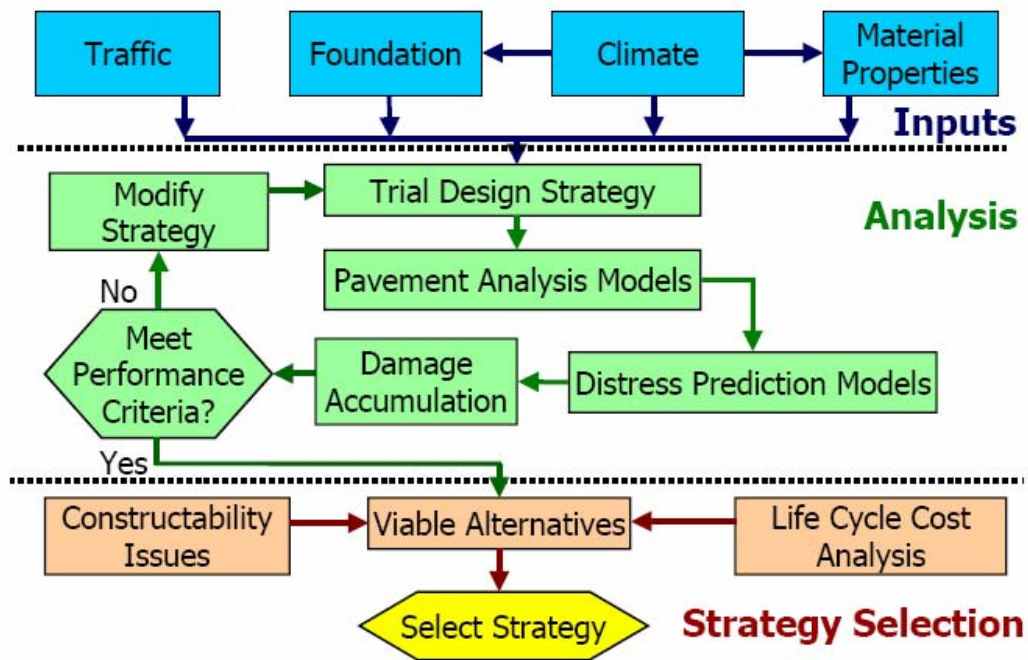


Figura 14: Proceso de diseño global para los pavimentos flexibles¹⁶

6. Calcular los deterioros y / o daños acumulados al final de cada periodo de análisis para la vida la vida útil.
7. Prediga (Estipule) los deterioros importantes (ahuellamiento, fisuramiento por fatiga, fisuramiento térmico) al final de cada periodo de análisis a través de la vida útil, usando el modelo calibrado mecanístico empírico de comportamiento suministrado en la AASHTO.

¹⁶ Ibid.



8. Prediga (estipule) la suavidad (IRI) en función del IRI inicial, el deterioro acumulado con el tiempo y los factores del sitio al final de cada análisis de incremento.
9. Evalúe el comportamiento esperado del diseño de prueba, al nivel de confiabilidad esperado.
10. Si el diseño de prueba no cumple con los criterios de comportamiento, modifique su diseño y repita los pasos 4 hasta el 9 hasta que el diseño cumpla los criterios de performance.

3.2.2.2. Predicción del deterioro.

El propósito del modelo de solicitaciones de los pavimentos flexibles es determinar las solicitaciones estructurales del sistema de pavimentos debido a las cargas del tráfico e influencias ambientales. Los esfuerzos calculados y acumulados forman las bases para evaluar la capacidad estructural de los diseños de pruebas propuestos. Una variedad de deterioros estructurales son considerados en el diseño y análisis de los pavimentos flexibles. Estos incluyen:

- Fatiga de la cara superior o piel de cocodrilo
- Fatiga de la superficie inferior fisuramiento longitudinal
- Fatiga en capas estabilizadas químicamente (únicamente en pavimentos semirrígidos)
- Deformación permanente o ahuellamiento
- Fisuramiento por temperatura

3.2.2.3. Datos de entrada para el diseño de pavimentos flexibles nuevos.

Los datos de entrada usados para el diseño de pavimentos asfálticos nuevos son los siguientes.

- Información general
- Identificación del proyecto y del sitio



- Análisis de parámetros
- Trafico
- Clima
- Propiedades de la superficie y del drenaje
- Estructura del pavimento

3.2.2.4. *Clima*

Las condiciones ambientales tienen un efecto considerable en el comportamiento de los pavimentos flexibles. La interacción de los factores climáticos con los materiales del pavimento y las cargas es compleja. Factores como la lluvia, temperatura, ciclos de hielo deshielo, y el nivel freático afectan la temperatura y el contenido de humedad del pavimento quien a su vez afecta directamente la capacidad de transporte de carga de las capas del pavimento y en ultimas el comportamiento del mismo.

3.2.2.5. *Datos de entrada del clima*

La siguiente información del clima es la requerida para realizar el diseño del pavimento:

- Temperatura horaria en el periodo de diseño
- Precipitación horaria en el periodo de diseño
- Velocidad del viento horaria en el periodo de diseño
- Porcentaje de brillo del sol en el periodo de diseño
- Humedad relativa del ambiente en el periodo de diseño
- Nivel freático estacional o constante en el sitio del proyecto.

Las cinco primeras se obtienen de estaciones metereologicas, las cuales deben tener al menos 24 meses de datos para poder dar una solución razonable. en los Estados Unidos la mayoría de estas estaciones tienen entre 60 y 66 meses, adicionalmente para conocer cualquiera de la información requerida excepto el nivel freático, solo son necesarios los siguientes datos:



- Ubicación del pavimento – Latitud y Longitud
- Elevación

Los diseñadores deben usar la estación más cercana o interpolar las seis más cercanas.

3.2.3. Variación de las propiedades de los materiales en los pavimentos asfálticos por variables ambientales¹⁷

Según JILL OVIK, et al. En “Characterizing seasonal variations in flexible pavement material properties” en el desarrollo de diseño de pavimentos flexibles muchas agencias se han direccionado hacia los diseños empírico – mecanicísticos. En este tipo de diseños se usa el espesor inicial del pavimento, las propiedades de los materiales de la estructura del pavimento y las condiciones de carga para introducir en un modelo numérico o analítico para calcular los esfuerzos, las tensiones y deflexiones en cualquier punto de la estructura

Debido a que las propiedades de los materiales de los pavimentos flexibles tales como la rigidez de las capas, fluctúan con las condiciones climáticas, es necesario cuantificar los efectos climáticos en las propiedades de los materiales de los pavimentos, en una región específica.

En los procedimientos de diseño de pavimento flexible mecanicísticos - empíricos, es difícil cuantificar la relación entre los factores del clima y las variaciones estacionales en los módulos de las capas del pavimento de una región dada.

La mayoría de la información de la investigación que se mencionara a continuación se tomo de la base de datos de Minnesota Road Research

¹⁷ OVIK, Jill; BIRGISSON, Bjorn y NEWCOMB, David. “Characterizing seasonal variations in flexible pavement material properties”, Transportation Research Record 1684, Paper No. 99- 0283.



Program, la cual se realizo en la interestatal 94 Minnesota Central. El resultado del estudio arrojó que la rigidez máxima de las capas de pavimento se alcanza en el invierno y la rigidez mínima se da en diferentes periodos del año en las diferentes capas del pavimento.

El modub del concreto asfáltico es mínimo en el verano cuando las temperaturas son altas, el modulo de la base es mínimo en el periodo de deshielo en primavera y el modulo de la subrasante es mínimo en los últimos meses de primavera y verano. Las variaciones estacionales en el modulo de la capa del pavimento se usan para establecer factores estacionales para cada capa de pavimento que describa el ciclo del modub en un año típico Estos factores pueden ser aplicados a procedimientos de diseño empírico-mecanicisticos, para este caso especifico en minnesota.

La metodología usada en este estudio relaciona específicamente factores climáticos a las condiciones y rigidez de las capas del pavimento. Se determino que la rigidez del concreto asfáltico (EAC) es sensible a la temperatura y la rigidez de la base granular (EGB) y la subrasante (ESG) es sensible en la presencia del agua en la capa. Esto se realiza en tres pasos básicos:

El primero, consiste en crear un mapa del clima con la temperatura, historia de la temperatura y la precipitación específica para el sitio del pavimento. El segundo paso relaciona los factores del clima a las condiciones de la subrasante del pavimento y el tercer paso utilizado en el estudio fue relacionar las condiciones estacionales del campo, con la rigidez de las capas del pavimento.

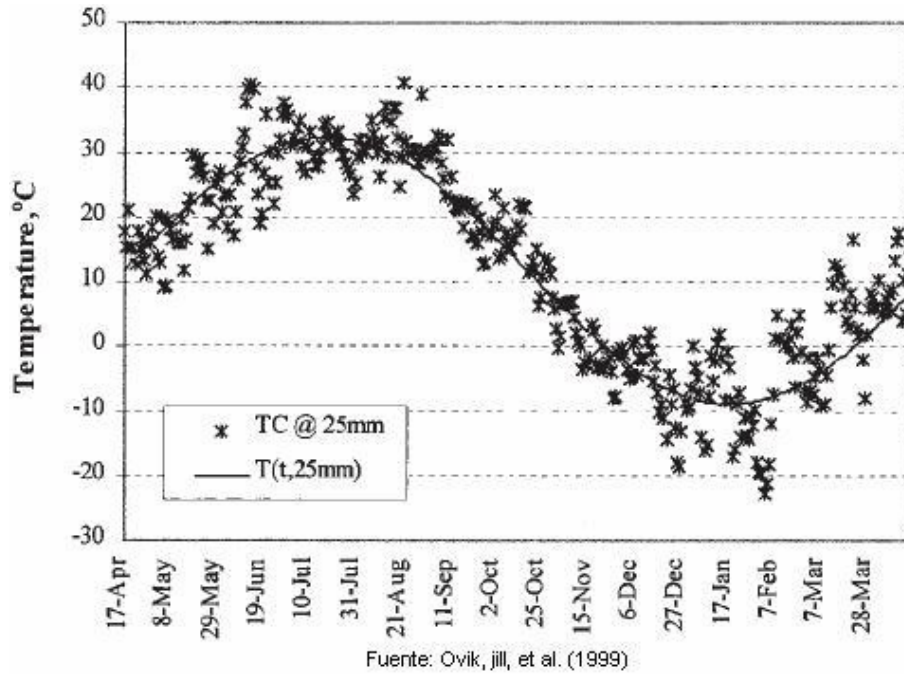


Figura 15: Cambios de temperatura en el año, registrados por sensores en el pavimento

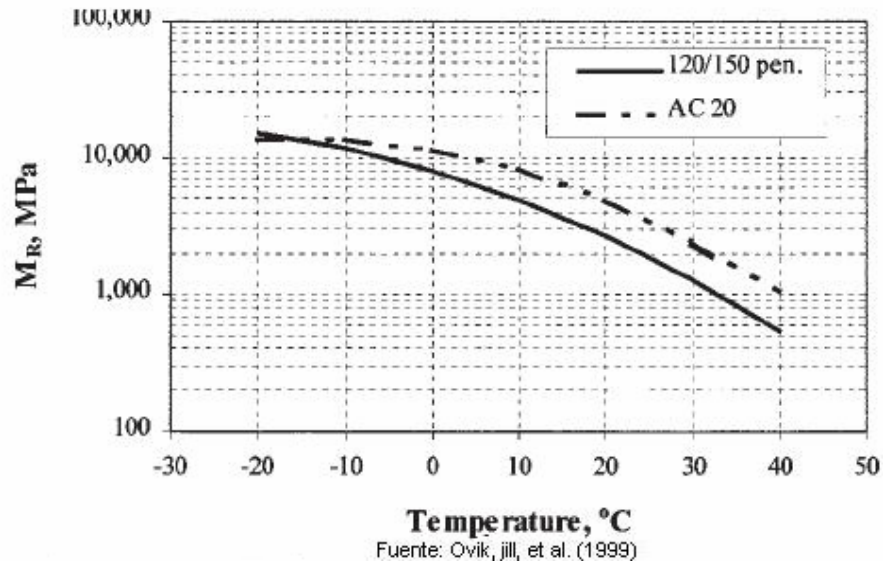


Figura 16: Aumentos en el modulo a causa del incremento de la temperatura

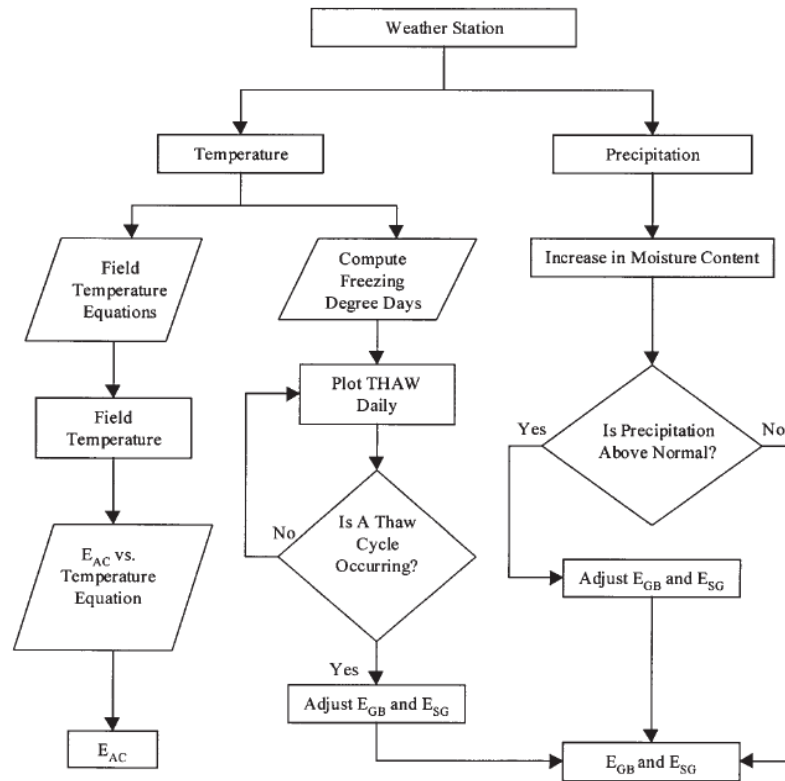


FIGURE 2 Process used to quantify relationships between climate factors and pavement material properties.

Figura 17: Proceso usado para cuantificar la relación entre los factores climáticos y las propiedades de los materiales del pavimento¹⁸.

Cabe la pena resaltar que los resultados que se obtuvieron en el estudio antes mencionado son para un lugar específico, sin embargo la metodología plasmada si se podría utilizar en otras regiones.

3.2.4. Coeficiente de drenaje de la AASHTO para pavimentos flexibles¹⁹

En esencia el coeficiente “m” fue desarrollado en proporción del coeficiente de la capa del ensayo de base granular de la AASHO, bajo cualquier condición de drenaje y clima, en el sitio. El coeficiente de la capa fue calculado a partir del

¹⁸ Ibid.

¹⁹ RICHARDSON, David “Aashto drainage coefficients for flexible pavements”, Transportation Research Record 1778, Paper No. 01-0198.



modulo resiliente, determinado para condiciones con un análisis elástico de capas.

El modulo fue variado por el cambio de la humedad de la subrasante y la base para cualquier tiempo del año. La sensibilidad del material de base a la humedad (reflejado en las constantes K_1 y K_2 del modelo ϵ), fue determinada en parte en ensayos de modulo resiliente de materiales granulares en el laboratorio. El resultado de este análisis es la creación de unas tablas que guían al diseñador a escoger el coeficiente "m". El nuevo valor de "m" puede ser usado para proporcionar una medida racional de la influencia del drenaje del pavimento en su comportamiento.

En la versión 1986 de la Guía para el Diseño de estructuras de Pavimentos de la AASHTO, recomendaban la inclusión del drenaje del pavimento en el diseño de las estructuras del pavimento. En el método de diseño de la AASHTO un numero estructural se calcula (SN), el cual es función del coeficiente de la capa, espesor de la capa y el coeficiente de drenaje, adicionalmente el coeficiente de la capa es un modificador esencial de la capa del pavimento.

El método propuesto recientemente por la AASHTO reemplaza la tabla "m", con una nueva basada directamente en la perdida de la capacidad de soporte de la base granular debido a la perdida de características friccionantes y esfuerzos de confinamiento, además la calidad de la tabla de drenaje ha sido modificada. En la practica, el usuario puede determinar el coeficiente "m" manualmente.

Un problema con la tabla del coeficiente de drenaje de la AASHTO, es el método para escoger la columna apropiada, la escogencia depende del porcentaje de tiempo que el suelo en el área general del sitio del proyecto esta cerca de la saturación. Esto no describe adecuadamente un suelo que sufre un cambio estacional en el modulo resiliente. Para enfrentar este problema se decidió, definir seis condiciones climáticas posibles por el número de meses del año que la subrasante esta congelada, descongelada, húmeda y seca.



La Guía AASHTO proporciona una ecuación que relaciona coeficientes de las capas con el modulo resiliente de la subbase y base granular.

TABLE 1 Recommended Drainage Coefficients for Flexible Pavements with Untreated Base and Subbase Materials

Pavement Quality of Drainage	Climate Condition					
	A	B	C	D	E	F
Excellent	1.25-1.20	1.25-1.20	1.25-1.20	1.25-1.20	1.20-1.15	1.20-1.15
Good	1.25-1.20	1.20-1.15	1.20-1.15	1.20-1.15	1.20-1.15	1.20-1.15
Fair	1.20-1.15	1.15-1.05	1.05-0.85	1.05-0.85	1.05-0.85	1.15-1.05
Poor	1.15-1.05	1.15-1.05	1.05-0.85	1.05-0.85	1.05-0.85	0.85-0.70
Very Poor	1.05-0.85	1.05-0.85	0.85-0.70	0.70-0.60	0.85-0.70	0.70-0.60

Tabla 2: Coeficiente de drenaje recomendado para pavimentos flexibles con bases y subbases no tratadas.²⁰

TABLE 2 Climate Condition Season Lengths

Climate Condition (AASHTO Zone)	Season (months)			
	Roadbed Frozen	Roadbed Thawing	Roadbed Wet	Roadbed Dry
A (IV)	0.0	0.0	2.0	10.0
B (I)	0.0	0.0	5.5	6.5
C (VI)	3.0	1.5	1.0	6.5
D (V)	0.5	0.5	1.5	9.5
E (III)	3.0	1.5	2.0	5.5
F (II)	0.5	0.5	5.0	6.0

Tabla 3: Duración de las Condiciones climáticas por temporadas²¹.

²⁰ Ibid.

²¹ Ibid.



TABLE 4 Quality of Subgrade Drainage

Rating	Soil Drainage	Additional Moisture Contribution
Good	<ul style="list-style-type: none"> relatively high permeability (predominantly granular soils) 	Low Moisture Contribution: <ul style="list-style-type: none"> deep water table absence of wet-weather springs at-grade or on fill flooding potential: none or rare
Fair	<ul style="list-style-type: none"> moderate permeability (fine to moderately fine soil texture) may have layer that impedes downward drainage 	Moderate to none: <ul style="list-style-type: none"> deep water table absence of wet-weather springs at-grade or on fill flooding potential: none to occasional
Poor	<ul style="list-style-type: none"> low permeability (e.g., silty clays) may have layer that impedes downward drainage 	Positive moisture contribution: <ul style="list-style-type: none"> shallow water table absence of wet-weather springs at-grade or in fill flooding potential: occasional to frequent
Very Poor	<ul style="list-style-type: none"> very low permeability (heavy clays) contains layer that impedes drainage 	Positive moisture contribution: <ul style="list-style-type: none"> shallow water table in area of wet-weather springs sidehill cut or cut section flooding potential: frequent or common marshy area

Tabla 4: Calidad de drenaje de la subrasante.²²

3.2.5. Comportamiento en las carpetas asfálticas influenciadas por las variables climáticas²³

El estudio Canadiense del performance de los pavimentos de larga duración (CLTTP), comenzó en 1989, involucra 65 secciones en 24 provincias, que reciben rehabilitación comprendiendo varios espesores de asfalto de carpeta.

Los efectos de varias alternativas de rehabilitación para el comportamiento de el pavimento en términos de el incremento de la rugosidad comparativos como carga de trafico, clima y condiciones del suelo de la subrasante son descritos a continuación:

²² Ibid.

²³ TIGHE, Susan; HAAS, Ralph YLI, Ning yun. "Overlay performance in Canadian strategic highway research program's long-term pavement performance study". Transportation Research Record 1778, Paper No. 01-2200.



- La tendencia del incremento de la rugosidad de los pavimentos desde 1990 hasta 1998 es esencialmente lineal. Comenzando con un promedio de un IRI de 1.1m/Km. alcanzo un 1,7 m/Km. Aunque el crecimiento es esencialmente lineal, la extrapolación en un futuro es extremadamente peligrosa en si mismo, lo que también hace pensar una duración irrazonable de una carpeta de larga duración para este caso.
- El rango del IRI del pavimento existente en las provincias antes de la carpeta oscilaba entre 1.5 y 3.0 m/Km.,el cual es un rango relativamente liso. En términos de serviceabilidad presente indexada corresponde entre un 3.5 y un 2.7. La sobrecarpeta da como resultado el mejoramiento o la disminución del IRI en valores que oscilan entre un 0.4 a 1.4 m/Km.

El efecto global de los espesores de la sobrecarpeta en el incremento de la rugosidad es el siguiente:

- La carpeta delgada se deteriorara a una rata considerable, la de espesor medio y grueso mostraron una diferencia muy pequeña después de 8 años. Es importante seguir el monitoreo par saber que diferencias se puedan presentar a futuro
- En zonas húmedas, de grandes heladas, las carpetas delgadas tienen una rata mas alta de incremento de la rugosidad que las carpetas gruesas para ambos tipos de subrasante. Para niveles de tráfico involucrado, este factor no parece tener un efecto significativo.

En zonas secas de grandes heladas, el incremento de la rugosidad para espesores medios y gruesos ha sido bastante bajo, nuevamente con un nivel de trafico que no parece tener un efecto significativo.

En zonas húmedas de bajas heladas, carpetas delgadas combinadas con una subrasante fina ocasionan la rata más alta de incremento de rugosidad; nuevamente el tráfico no aparenta tener un efecto significativo.



Es de anotar, aunque el nivel del tráfico no cause un efecto aparente esto puede ser principalmente debido al límite entre altos y bajos niveles, 200.000 ejes equivalentes sencillos por año

- El promedio del valor del IRI de pavimentos con subrasante de agregado fino tuvo un mayor incremento en la tasa en los 8 años que los pavimentos que tenían una subrasante de agregado grueso, para ambos casos altos y bajos niveles de tráfico.
- Para zonas húmedas, de grandes heladas, todas las secciones de pavimento con concreto asfáltico de mezcla en caliente y asfalto reciclado carpetas entre 30 hasta 60mm tienen un incremento en el IRI mucho más alto con los años para ambos niveles de tráfico altos y bajos niveles. Todos los pavimentos con capas gruesas de concreto asfáltico de mezcla en caliente 100 hasta 185 mm tuvieron un pequeño incremento en un periodo de 7 años.
- Todas las secciones de C-LTPP en zonas secas de grandes heladas que incluyen principalmente a Alberta, Manitoba y Saskatchewan, experimentaron un cambio pequeño en el IRI en un periodo de 7 años
- Para las carpetas gruesas, la subrasante, la zona climática y el efecto por el nivel del tráfico fueron mínimos durante los 8 años.

A manera de conclusiones globales sobre los temas que competen al presente proyecto de tesis se pueden tener:

El Espesor de la carpeta y las condiciones climáticas son los dos mayores factores con una influencia significativa en el incremento de la rugosidad. La clase de la subrasante también puede ser una influencia sustancial en ciertos casos. La combinación de estos tres factores gobiernan el comportamiento global del pavimento y el incremento de la rugosidad.

La peor situación o el incremento más rápido de la rugosidad en el pavimento podría ser con el efecto combinado de un espesor delgado de carpeta; zona húmeda y de bajas heladas; subrasante fina y altos volúmenes de tráfico. Por otra parte la combinación de carpeta gruesa; zona seca y de altas heladas



subrasante de agregado grueso minimizaría el incremento de la rugosidad en el pavimento.

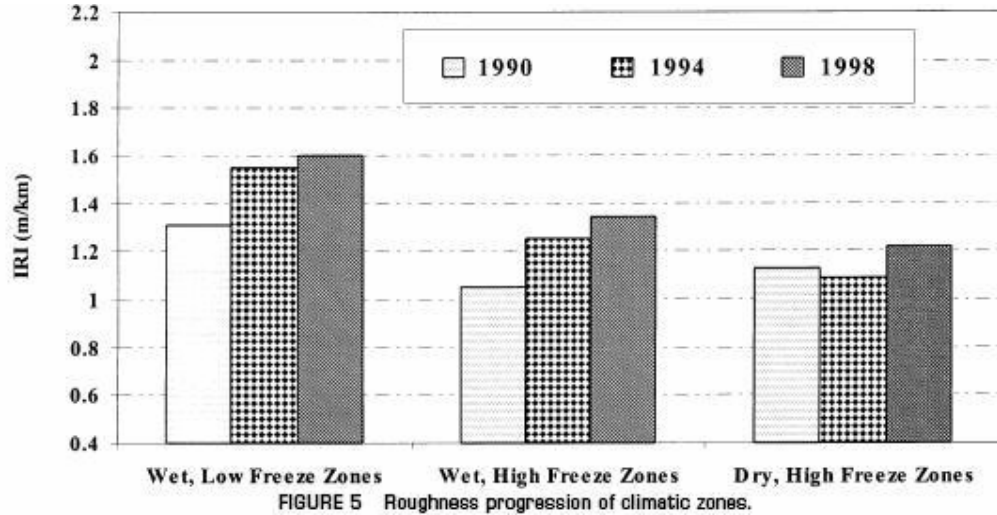


FIGURE 5 Roughness progression of climatic zones.

Figura 18 Incremento de la rugosidad en zonas climáticas

Fuente: TIGHE, Susan, et al. (2001)

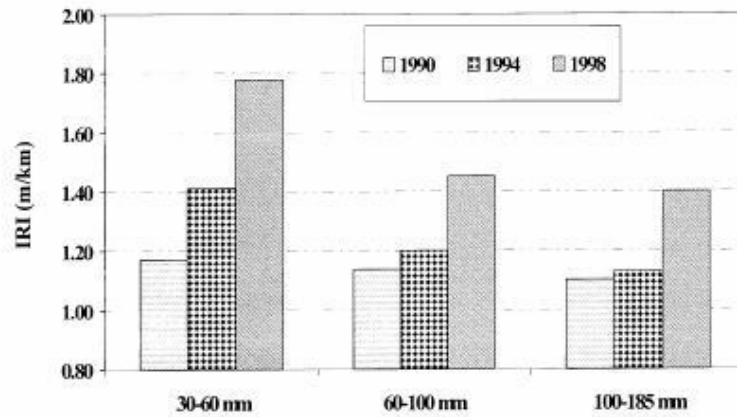


FIGURE 4 Overall effect of overlay thickness on roughness progression.

Figura 19. Efectos del incremento de la rugosidad por el espesor de la carpeta

Fuente: TIGHE, Susan, et al. (2001)



3.2.6. Comportamientos de los diferentes tratamientos para el mantenimiento de los pavimentos asfálticos²⁴

Un estudio fue realizado para evaluar el comportamiento de los diferentes tratamientos para el mantenimiento de los pavimentos flexibles, incluyendo la influencia de las condiciones de los pre-tratamientos y otros factores. Los datos usados en este estudio fueron tomados de Long-Term Pavement Performance Studies` Specific Pavement Studies (SPS) SPS-3 experiment. Los tratamientos de mantenimiento usados en el experimento SPS-3 fueron carpetas delgadas (thin overlay), sello de riego (slurry seal), sellado de fisuras (crack seal) y tratamiento simple (chip seals). Los efectos iniciales y a largo plazo de los tratamientos para mantenimiento fueron analizados sobre el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), ahuellamiento y fatiga, como era su influencia en el tiempo, tráfico de camiones, condiciones del pre-tratamiento y el clima. Las carpetas delgadas se encontraron como las más efectivas entre los tratamientos estudiados, seguido por el (chip seal) y los sellos de riego. El sellado de fisuras no demostró ningún beneficio inicial o a largo plazo con respecto al IRI, ahuellamiento o fatiga.

El diseño del experimento fue desarrollado por el Instituto de Transporte de Texas bajo los contratos de operación de carreteras del Programa estratégico de Investigación de Carreteras (Strategic Highway Research Program), el experimento central SPS-3 consiste en el control de secciones y cuatro tratamientos para el mantenimiento: carpetas delgadas, sellos de riego, chip seal y sellado de fisuras. El test de secciones suplementarias de la Agencia Estatal de carreteras también está presente en muchos sitios del SPS-3.

Las carpetas delgada eran de 1.5 pulgadas de espesor. Estas carpetas fueron colocadas por las agencias estatales y provinciales de carreteras con sus propias mezclas de concreto asfáltico y sus propias cuadrillas. Los sellos de riego y los chips seals fueron colocados por cuatro contratistas, las

²⁴ HALL, Kathleen; CORREA, CARLOS y SIMPSON Amy. "Performance flexible pavements maintenance treatments in the long-term pavement performance sps-3". Transportation Research Record 1823, Paper No. 03-4526.



especificaciones del material fueron las mismas para todas las regiones, el material usado para el sellado fue el mismo para todos los sitios y en la colocación se produjeron variaciones. Para el selbo de riego y el chip seals los materiales y la cuadrilla de instalación cambiaron en cada región.

La distribución del clima fue obtenida de la base de datos de la Administración Oceánica y Atmosférica Nacional, donde se estableció una precipitación anual de 14 a 63 pulgadas por año y un rango de temperatura anual de 36 a 72 grados Fahrenheit. La caracterización del tráfico es de ejes equivalentes sencillos de 18 Kips.

3.3. Experiencias en Europa

Al incursionar en experiencias vividas en Europa, se busco un país que se encuentre en un contexto similar a Colombia en cuanto al estado de sus vías y los planes existentes para el diseño y mantenimiento o rehabilitación de las mismas. Lógicamente las condiciones climáticas existentes en Lituania nunca van a ser similares a las de Colombia, pero si existe una condición socio económica parecida entre los países, aunque oficialmente el PIB per. capita de Lituania al año 2007 duplica al de Colombia con 16.823,00²⁵ USD, su economía todavía no se puede comparar con la de países del segundo mundo como México y Argentina.

El punto del análisis se enfoca a como un país en vía de desarrollo puede crear líneas de investigación en la incidencia de las variables ambientales, en el deterioro de los pavimentos, para realizar los diseños de sus proyectos viales. A continuación se realizara una descripción de dicha investigación.

²⁵ Wikipedia Lituania. <http://es.wikipedia.org/wiki/Lituania> (ultima visita 10, de Julio de 2007)



3.3.1. Soluciones a vías en afirmado sometidas a inclemencias Climáticas²⁶

La red estatal de carreteras de Lituania consiste en mas 21.000Km de vías, estas son en gran parte en afirmado con un (43,3%). cuando fue implementado el Programa de Pavimentación de Vías en Afirmado, surgieron algunos problemas al momento de estimar la inversión que podría determinar la implementación de diferentes alternativas en el proyecto de rehabilitación.

El costo total de la renovación de las vías en afirmado dependen de las condiciones climáticas, geológicas e hidrológicas del lugar, como también del tráfico y las características del afirmado. Las vías, como los diseños de edificios tienen que ser lo suficientemente fuertes, durables y estas deben corresponder a los volúmenes de tráfico que por ahí transiten. Los resultados del test mostraron una diversidad de pavimentos y las características del afirmado renovado.

Las carreteras en afirmado varían de acuerdo al ancho de la vía, la estructura, los materiales y el tráfico. Analizando el tráfico en las vías en afirmado, estas se pueden clasificar en 4 grupos de acuerdo al tráfico vehicular. Frecuentemente la resistencia del suelo de la subrasante determina la estructura de las vías renovadas en afirmado. Los autores llevaron a cabo un test en subrasantes bajo diferentes condiciones geomorfológicas y geológicas, estimando la estructura, condiciones físicas y las propiedades mecánicas.

Acordes al resultado del test, la resistencia de las vías en afirmado existentes dependen de la resistencia de la subrasante, del espesor del afirmado y de la calidad del mismo. El modulo de deformación equivalente del afirmado es descrito por un binomio. Seleccionando las estructuras para la reconstrucción del afirmado, los modelos matemáticos son sugeridos.

²⁶ ZILIONIENE, Dáiva; CYGAS Donatas y DUNDULIS KASTYTIS "Sdution of gravel road renovation based on certáin local conditi ons in Lithuania". Transportation Res earch Record 18 19, Paper No. LVR8-1083.



El KAMIS (abreviación en Lituania para el Modelo de Pavimentación de Carreteras) fue creado para evaluar la viabilidad económica de pavimentar las vías en afirmado bajo las condiciones Lituanas; esto hizo posible comparar costos y beneficios asociados con la renovación de las vías en afirmado en un país con un clima de grandes heladas.

En términos monetarios la relación de beneficio por la rehabilitación vial es: El ahorro en la operación de vehículos (basados en el submodelo HDM VOC-4), tiempo ahorrado por los usuarios (según programa HDM-3) y economía ambiental (de acuerdo al programa EKOL)

Teniendo en cuenta lo anterior se desarrollan una serie de ecuaciones, que nos llevaran a un diseño de acuerdo a las condiciones climáticas de Lituania y que pueden ser aplicadas en otros países del mismo tipo como: Canadá, estados del norte de los Estados Unidos de América y países del norte de Europa.

TABLE 3 Characteristics of Subgrade Soils

Road	Characteristic		
	deformation modulus $E_{0.01}$, MPa	moisture content, %	void ratio
Raseiniai-Radviliskis	38-118	5.2-14.8	0.39-0.85
Kelme-Uzventis	32-164	3.7-12.4	0.29-0.86
Suginciai-Klykuoliai-Agluona	30-74	8.9-18.9	0.38-0.72
Joniskis-Linkuva	18-104	4.5-21.5	0.39-0.76
Sirvintos-Sesuliai	18-46	12.5-17.7	0.39-0.50
Varena-Marcinkonys-Druskininkai	76-122	4.6-8.7	0.53-0.67

Tabla 5: Características de la subrasante de las vías en afirmado a intervenir en Lituania.²⁷

TABLE 4 Indicators of Factors Influencing Gravel Road's Strength Depending on Frost Susceptibility of Subgrade Soils (9, 10)

Indicators	Deformation modulus, MPa			Thickness of gravel layer in cm, placed on subgrade soils		
	subgrade soils		gravel	frost susceptibility	medium frost susceptibility	low frost susceptibility or frost non-susceptible
	frost susceptibility	medium frost susceptibility				
Basic level (zero)	34.5	38.5	175	50	45	40
Variation interval	± 10.5	± 3.5	± 25	± 20	± 15	± 10
Upper level (max)	45.0	42.0	200	70	60	50
Bottom level (min)	24.0	35.0	150	30	30	30

Tabla 6: Indicadores de los factores influyentes de la resistencia de las vías en afirmado dependiendo de la susceptibilidad al congelado de la subrasante.²⁸

²⁷ Ibi d.



Actualmente se ha enfrentado la problemática que causa la influencia de los factores ambientales en los pavimentos, a continuación se describirán algunas de las soluciones planteadas en diferentes países.

²⁸ Ibid.



CAPITULO 4. OTRAS APLICACIONES PARA CONTRARRESTAR LOS EFECTOS AMBIENTALES EN PAVIMENTOS

En este capítulo se hace alusión a otras herramientas que ayudan a contrarrestar los efectos de la variable ambiental en los pavimentos, Aunque esta tesis se enfoca única y exclusivamente en la incidencia de la variable ambiental en los pavimentos flexibles, Me parece de vital importancia hacer una mención, acerca del software de modelación del comportamiento del concreto hidráulico Hiperpave el cual tiene la capacidad de valorar la influencia que las condiciones ambientales, los materiales de la mezcla de concreto hidráulico, el diseño estructural del pavimento y los procedimientos constructivos tienen en el desempeño del pavimento de concreto.

4.1 Comportamiento de pavimentos de concreto hidráulico y software para su simulación.

Es bien sabido que los pavimentos en concreto hidráulico tienen ciertos comportamientos que responden a los cambios de temperatura, excesiva humedad, radiación solar, entre otros. A continuación se describirá la herramienta de última generación que se utiliza para simular a todas las solicitaciones a que está sometido este tipo de pavimentos.

El Hiperpav es un software desarrollado para Windows que es capaz de valorar la influencia que los materiales de la mezcla de concreto hidráulico, el diseño estructural del pavimento, los procedimientos constructivos y las condiciones ambientales tienen en el desempeño del pavimento de concreto; en cuanto a las condiciones climáticas respecto al Hiperpave tiene en cuenta: la temperatura del aire, la radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento. “El módulo principal del sistema Hiperpav es un robusto modelo para la predicción del gradiente de temperatura en el pavimento de concreto debido a la interacción del calor de hidratación, la temperatura del entorno y los cambios climáticos. Además de la temperatura, Hiperpav predice los cambios de humedad durante las primeras horas después de la construcción. Los cambios



de temperatura y humedad en el concreto conllevan a importantes cambios de volumen que, a su vez, producen movimiento axial, alabeo y contracción por secado. Lo anterior produce esfuerzos de magnitud considerable debido a la restricción impuesta por la capa de base (fricción y adherencia) y el propio peso de la losa. Debido a que el concreto es más débil en tensión que en compresión, si los esfuerzos de tensión en el concreto exceden el desarrollo de la resistencia, se pueden llegar a producir daños en el pavimento de concreto. En el caso de los pavimentos de concreto simple con juntas, el daño puede presentarse en forma de agrietamiento aleatorio o micro-agrietamiento. Mediante la modelación del desarrollo de la resistencia y los esfuerzos en el pavimento con el uso del programa HIPERPAV, es posible identificar los riesgos potenciales y seleccionar alternativas de diseño que resultan en un desempeño adecuado”.²⁹

²⁹ <http://www.hiperpav.com/index.php?q=node/133>; (última visita 15 de Noviembre de 2006)



CAPITULO 5. CONCLUSIONES

- En Colombia no se ha reconocido la variable ambiental en el deterioro de los pavimentos. Este documento es una contribución a la ingeniería colombiana, para una mayor comprensión de la incidencia de dicha variable en el deterioro de los pavimentos y de que manera se pueden mitigar estos.
- Al momento de realizar los estudios para los diseños de una vía, las variables ambientales que se deben tener en cuenta son: temperatura, radiación solar, humedad, precipitación y velocidad del viento
- Para el proyectista la temperatura se constituye en una variable importante al momento de querer conocer cual va ser el comportamiento reológico del asfalto a utilizar en la vía a construir. Cuando el pavimento se encuentra sometido a cargas rápidas o a bajas temperaturas, el asfalto se comporta como un sólido elástico, debido a que estos se deformaran al ser cargados y retornaran a su forma original al ser descargados. Si se aplicara una carga excesiva, el sólido puede romperse. Aunque el asfalto es un sólido elástico a baja temperatura puede volverse demasiado frágil y agrietarse bajo carga excesiva, esto se debe a los esfuerzos internos que se desarrollan en el pavimento cuando el proceso de contracción es restringido. por otra parte el asfalto a altas temperaturas una vez comienza a fluir no regresa a su estado original y expuesto a cargas repetitivas, se forman ahuellamientos.³⁰
- En la humedad se encontró que existe una relación directa con las características mecanicistas de los materiales, en este sentido al aumentar el grado de humedad de los materiales granulares, habrá una disminución en su modulo resiliente, Thompson y Robnett (1979). De igual forma, al tener la mezcla saturada habrá una disminución en la temperatura, lo que ocasionara una rigidez en la mezcla y una posterior fisuración, Bohórquez (2003).

³⁰ MC GEMINIS, Robert; SHULER, Scott y BAHIA, Hussain (1994) Background of superpave asphalt binder test methods. (RAFAEL, Julia y JUGO Augusto, Trads.)



- En investigaciones hechas por Martínez (2005), la radiación solar tiene una relación directa, entre la influencia de los rayos ultravioletas y el espesor de la capa asfáltica, evidenciándose que en los 5mm iniciales existe un mayor envejecimiento del asfalto (endurecimiento). Adicionalmente se constato que el envejecimiento de la mezcla es mucho mayor que el obtenido por el ligante, esto se puede deber a que en la mezcla el espesor de recubrimiento de los agregados fue 3 veces menor al espesor analizado del ligante.
- La variable ambiental se convierte en una causa importante de envejecimiento de los pavimentos de altura. Los constantes cambios de temperatura, genera un gradiente térmico en las capas asfálticas del pavimento, lo que conlleva a un fisuramiento por temperatura prácticamente inevitable, de igual forma, factores como el agua ayudan a envejecer el pavimento en estas zonas, ya que esta se infiltra por las grietas térmicas y afectan toda la estructura.
- Según la AA SHTO 2002, la temperatura y la humedad son las variables que mas afectan la estructura del pavimento, debido al cambio que se genera en el comportamiento de los materiales, por consiguiente es adecuado la utilización de software especializados para la modelación y predicción del comportamiento de los materiales de la estructura del pavimento durante su vida útil.
- Es necesario plantear una estrategia para la concepción del ciclo de los pavimento en la cual se tenga en cuenta al clima como una de las principales variables y se entienda que incide en la duración de la vida de los pavimentos.



CAPITULO 6. RECOMENDACIONES

- Es imprescindible tener en cuenta el comportamiento de los materiales que componen la estructura del pavimento, sobre todo en zonas que se presenten todas las estaciones o exista una variación considerable del clima en el año, debido a que se podría mitigar los daños ocasionados por los factores ambientales.
- Realizar monitoreo continuo a través de estaciones meteorológicas que permitan obtener datos consistentes, que sirvan para poder modelar la estructura del pavimento durante su vida útil; en un principio esto se puede comenzar a implementar en las concesiones viales, como se ha venido realizando con el conteo y pesaje de vehículos.
- Se deben tomar los softwares para modelación de factores climáticos en el pavimento creados en otros países con el fin de adaptarlos a las condiciones de Colombia y así poder realizar unos diseños que proporcionen como resultado un pavimento menos vulnerable a los factores ambientales.
- Implementar normativas a nivel nacional, que obliguen a todos los entes vinculados a la ingeniería de pavimentos tener en cuenta los factores ambientales en el ciclo de un proyecto de pavimentos
- Realizar un estudio detallado para cada zona del país, sobre cuales son los factores ambientales que mayor incidencia tienen en el pavimento.
- Crear una línea de investigación a nivel nacional para el estudio de la incidencia de la variable ambiental en los pavimentos, preferiblemente adscrita a las agencias estatales que regulen las vías en Colombia, en conjunto con las universidades y que contenga la siguientes fases:
 - Realizar monitoreo continuo con estaciones meteorológicas y demás herramientas necesarias, por un tiempo mayor a 24 meses en las diferentes regiones del país, con el fin de identificar las diferentes variables ambientales por la que se están viendo afectados sus pavimentos
 - Identificación y delimitación de las regiones Colombianas donde influyen las diferentes variables ambientales.



- Crear y/o adaptar software que sirvan para la modelación del comportamiento de las características mecánicas de los materiales usados en la estructura del pavimento a utilizar, teniendo en cuenta la condición climática del sitio exacto del proyecto.
- Crear un flujograma estandarizado a nivel nacional para el desarrollo del ciclo de los pavimentos, el cual incluya la variable ambiental.
- Crear normativas para el diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos en el país que obligue a los entes que intervienen en el desarrollo de estos proyectos, a ejecutar y cumplir, las diferentes recomendaciones que se obtengan a partir de la investigación de la incidencia de la variable ambiental en los pavimentos del país.



CAPITULO 7. REFERENCIAS

- AASHTO 2002. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Final report. Part 2 design inputs, chapter 3 environmental effects. March 2004. Champaign, Illinois.
- AASHTO 2002. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Final report. Part 3 design analysis, chapter 3 design of new and reconstructed flexible pavements. March 2004. Champaign, Illinois.
- AGUADO, A. (1997). "Caracterización experimental y numérica de hormigones porosos modificados con polímeros". Barcelona.
- CAICEDO, B. y CARO, S. (2001) "Modelo numérico para el calculo de los efectos del clima en pavimentos." XIII Simposio Colombiano Sobre Ingeniería de Pavimentos.
- GEMINIS, Robert; SHULER, Scout y BAHIA, Hussain. (1994) Background of superpave asphalt binder test methods. (RAFAEL, Julia y JUGO Augusto, Trads.)
- HALL, Kathleen; CORREA, CARLOS y SIMPSON Amy. "Performance flexible pavements maintenance treatments in the long-term pavement performance sps-3". Transportation Research Record 1823, Paper No. 03-4526.
- <http://www.hiperpav.com/index.php?q=node/133>
- <http://www.onamet.gov.do/?s=web&p=1025>; (ultima visita, 10 de Julio de 2007.)
- <http://personal.telefonica.terra.es/web/cwega/indexhr.htm>; (ultima visita, 10 de Julio de 2007.)
- Instituto Nacional de Vias INVIAS. Distribución de la infraestructura vial en Colombia. <http://www.invias.gov.co> (ultima visita, 15 de noviembre de 2006)
- LILI, F. (1985). Sistema integral de diseño de pavimentos flexibles – versión 2. Buenos Aires.



- Ministerio del Transporte. Importancia de la calidad en pavimentos asfálticos. En: AL DIA [Internet]. 2002; <http://www.mintransporte.gov.co./prensa/newinter/Home.htm> MC
- OVIK, Jill; BIRGISSON, Bjorn y NEWCOMB, David. "Characterizing seasonal variations in flexible pavement material properties", Transportation Research Record 1684, Paper No. 99-0283.
- RICHARDSON, David. "Aashto drainage coefficients for flexible pavements", Transportation Research Record 1778, Paper No. 01-0198.
- TIGHE, Susan; HAAS, Ralph Y LI, Ningyuan. "Overlay performance in canadian strategic highway research program's long-term pavement performance study". Transportation Research Record 1778, Paper No. 01-2200.
- Wikipedia. Lituania. <http://es.wikipedia.org/wiki/Lituania> (ultima visita 10, de Julio de 2007)
- ZILIONIENE, Daiva; CYGAS Donatas y DUNDULIS KASTYTIS "Solution of gravel road renovation based on certain local conditions in Lithuania". Transportation Research Record 1819, Paper No. LVR8-1083.