

**CONTRIBUCIÓN AL MODELAMIENTO DEL EFECTO DEL AGUA SOBRE LOS
PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.**

**LAURA CRISTINA LONDOÑO LOZANO
DIANA SOFÍA SÁENZ CARRILLO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2013

**CONTRIBUCIÓN AL MODELAMIENTO DEL EFECTO DEL AGUA SOBRE LOS
PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

**LAURA CRISTINA LONDOÑO LOZANO
DIANA SOFÍA SÁENZ CARRILLO**

Trabajo de Grado en la modalidad de investigación para optar al título de
Ingeniera Civil

DIRECTOR

EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA

Ingeniero civil, Ms. C, Ph. D. – Profesor UIS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2013

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios Todopoderoso, a nuestras familias y amigos por su apoyo y compañía en nuestro proceso de formación.

Al profesor Eduardo Castañeda director de proyecto por su disposición, tiempo dedicado y aportes de conocimiento en el desarrollo de esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
1. CONCEPTOS GENERALES	13
1.1 Concreto bituminoso	13
1.2 Factores que influyen y evidencian el deterioro	13
1.2.1 Efecto del agua en la capa asfáltica	15
2. DESARROLLO DEL MODELO	18
2.1 Estudios previos	18
2.1.1 Ecuación principal de degradación	18
2.1.2 Ecuación de recuperación del material en función del tiempo de secado	19
2.2 Concepción del modelo	21
2.2.1 Modelo de saturación	22
2.2.2 Modelo de secado	22
2.3 Metodología del modelo numérico	24
3. APLICACIÓN DEL MODELO	26
4. CONCLUSIONES	31
BIBLIOGRAFIA	33

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Fisuración por fatiga	14
Figura 2. Agrietamiento por baja temperatura	14
Figura 3. Deformación permanente	14
Figura 4. Indicadores de deterioro de pavimentos	14
Figura 5. Infiltración de agua en los poros de la mezcla	16
Figura 6. Infiltración de agua en el agregado	16
Figura 7. Degradación en el tiempo durante tres ciclos de saturación	20
Figura 8. Profundidades de la carpeta asfáltica a evaluar	20
Figura 9. Modelo de saturación propuesto	22
Figura 10. Modelo de secado propuesto	23
Figura 11. Metodología que sigue el modelo en Excel	25
Figura 12. Gráfico precipitación vs. tiempo	26
Figura 13. Gráfico saturación vs. tiempo	26
Figura 14. Gráfico deterioro vs tiempo	27
Figura 15. Portada	28
Figura 16. Ingreso de variables	29
Figura 17. Valores numéricos de degradación	29
Figura 18. Resultados	29
Figura 19. Proceso interno del modelo	30

RESUMEN

TITULO: **CONTRIBUCIÓN AL MODELAMIENTO DEL EFECTO DEL AGUA SOBRE LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS¹**

AUTORES: LAURA CRISTINA LONDOÑO LOZANO
DIANA SOFÍA SÁENZ CARRILLO²

PALABRAS CLAVES: Capa asfáltica, Efecto del agua, Stripping, Saturación, Secado, Degradación, Recuperación.

DESCRIPCION:

En países como Colombia las metodologías de diseño de pavimentos aplicadas no consideran los efectos negativos que el medio ambiente puede proporcionar a las mezclas asfálticas, entre estos la temperatura, la radiación solar y el efecto del agua en forma de precipitación. Siendo Colombia un país tropical es imperativo tener en cuenta el factor clima, ya que los cambios de temperatura y las precipitaciones causan efectos dañinos al pavimento, que podrían producir deterioros prematuros, así que es importante conocer el desempeño que tendrá una estructura de pavimento sin despreciar el deterioro que produce el agua en ésta. Entre los efectos que produce la presencia de agua en estructuras de pavimento está la pérdida de adhesión entre el agregado granular y el asfalto y por lo tanto la disminución de su capacidad de soporte, todo esto genera la necesidad de modelar el comportamiento de los pavimentos bajo los efectos del agua.

En esta investigación esto se desarrolló una propuesta de modelo numérico que evalúa el deterioro de las capas asfálticas de un pavimento a diferentes profundidades, por el efecto que causan los ciclos de precipitaciones típicas de un país tropical, los cuales someten al material a ciclos de humedecimiento y secado. El modelo numérico permite el ingreso de diferentes variables como temperatura ambiente, precipitación y propiedades de los materiales, las cuales intervienen en el proceso de degradación y recuperación de las capas asfálticas.

¹ Proyecto de grado. Modalidad Trabajo de Investigación

² Facultad Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Eduardo Alberto Castañeda Pinzón

SUMMARY

TITLE: CONTRIBUTION TO THE MODELING OF WATER EFFECT ON ASPHALT PAVEMENTS¹

AUTHOR: LAURA CRISTINA LONDOÑO LOZANO
DIANA SOFÍA SÁENZ CARRILLO²

KEYWORDS: Asphalt layer, Water effect, stripping, saturation, drying, degradation, healing

DESCRIPTION:

Pavement design methodologies applied in Colombia do not take into account the negative effects that environment can provide to asphalt mixtures; some of these effects are temperature, solar radiation and the effect of water in the form of precipitation. As Colombia is a tropical country it is imperative to consider the weather factor, since changes in temperature and precipitation can cause damage to the pavement which could cause premature failure, so it is important to know the performance that a pavement structure will have taking in to account deterioration as a result of humidity. Loss of adhesion between the granular aggregate asphalt is an effect of water damage among others which, as a consequence decreases its bearing capacity, therefore there is the need of modeling the behavior of pavements under the influence of water.

In consequence of this, a novel numerical model for predicting the performance of asphaltic layers under environmental conditions is presented. The model accounts for the process of degradation evolution and healing by including the effects of moistening and drying from different precipitation cycles expected in a tropical region. Estimated values of degradation and healing are function of different user-defined conditions such as temperature, precipitation, properties of the materials used and can also be also obtained for different depths along the asphaltic layer.

¹ Proyecto de grado. Modalidad Trabajo de Investigación

² Facultad Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Eduardo Alberto Castañeda Pinzón

INTRODUCCIÓN

Un pavimento es una estructura diseñada para soportar el paso de vehículos sobre su superficie de rodadura. En el diseño de este tipo de estructuras se consideran diferentes variables, las cuales afectan el desempeño durante su vida útil, tales como el tráfico, características de la sub-rasante, las capas del pavimento, calidad en el proceso constructivo y el clima.

En la metodología para el diseño de un pavimento asfáltico se consideran diferentes factores entre ellos las condiciones ambientales típicas de países donde se presentan estaciones climáticas. Estos métodos también son aplicados en países con climas tropicales como Colombia donde no se consideran con precisión los efectos causados por las condiciones hidrológicas a las que se somete la estructura, lo cual provoca cierto grado de incertidumbre en la predicción del tiempo que tardará el pavimento en comenzar su proceso de degradación. Un pavimento que se degrade con anticipación al tiempo de vida calculado provoca pérdidas económicas, afectaciones en el confort, la seguridad, los tiempos de desplazamiento, entre otros inconvenientes.

Para modelar el desempeño que tendría una capa asfáltica bajo un clima alternado de periodos lluviosos y secos se debe tener en cuenta los efectos que causa tanto la presencia de agua, la cual produce una disminución de la adhesión en la interfaz agregado-ligante, como la ausencia de ésta que permite al material recuperar parcial o totalmente sus propiedades mecánicas y revertir su proceso de degradación.

El presente trabajo parte de modelos de degradación y recuperación desarrollados en investigaciones previas de laboratorio, para proponer un ajuste e integración de

estos en un modelo numérico, aplicado a unas condiciones climáticas como precipitación y temperatura, típicas de un país tropical.

1 CONCEPTOS GENERALES

Los pavimentos flexibles son los más utilizados en Colombia por su durabilidad, resistencia y economía. Éste tipo de estructuras se componen de varias capas, una capa superficial de concreto asfáltico, una base y una sub-base granular las cuales se apoyan en un suelo de fundación o sub-rasante.

1.1 Concreto bituminoso

Las mezclas están compuestas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total [1].

Una de las principales causas de los daños y procesos de deterioro prematuros en las estructuras de pavimento es la baja calidad en la adhesión entre el ligante y el material granular, ésta depende de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los materiales que la componen.

1.2 Factores que influyen y evidencian el deterioro

Uno de los objetivos que se busca al diseñar un pavimento es retardar su proceso de deterioro, este proceso se puede evidenciar por la presencia de fenómenos como la fisuración por fatiga (Figura 1), agrietamientos por baja temperatura (Figura 2), y deformación permanente (Figura 3), lo cual produce disminución en su calidad de rodado. La Figura 4 relaciona el paso del tiempo y las cargas de tráfico con la evolución de estos fenómenos.



Figura 1. Fisuración por fatiga [2]



Figura 2. Agrietamiento por baja temperatura [2]



Figura 3. Deformación permanente [2]

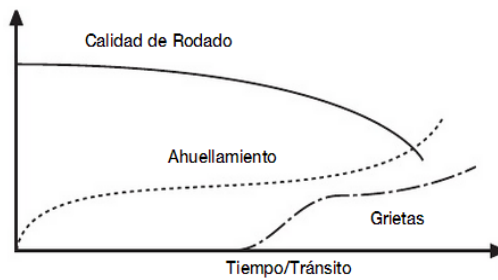


Figura 4. Indicadores de deterioro de pavimentos [3]

La evolución del proceso de deterioro se ve influenciada por diferentes factores, algunos lo aceleran a mayor escala que otros, entre estos se encuentra:

- El tráfico: repetición de cargas, velocidad, distribución de tráfico, eje y configuración de ruedas, etc.
- El clima: radiación solar, temperatura ambiente, precipitaciones.
- Ubicación de la estructura: profundidad del nivel freático, secciones de corte y relleno.
- Calidad en el proceso constructivo y en su mantenimiento

El modelo numérico desarrollado en este proyecto toma en cuenta el efecto que el agua en forma de precipitación causa en el deterioro de una capa asfáltica.

1.2.1 Efecto del agua en la capa asfáltica.

El agua afecta principalmente la capacidad estructural de los materiales granulares, se ha demostrado que el agua libre al interior de un pavimento puede deteriorar de 20 a 50 veces más su capacidad estructural que cuando se restringe su presencia, constituyéndose en el factor climático erosivo más peligroso [4].

La sensibilidad al agua del asfalto y el agregado se ve influenciado por su naturaleza físico-química [5].

La presencia de agua libre dentro del pavimento se debe principalmente a dos causas de diferente naturaleza [6]:

- Infiltración de agua a través de grietas en el pavimento, zanjas laterales, cunetas sin pavimentar, etc.
- Ascensión capilar desde el nivel freático.

Cada uno de estos aspectos contribuye a la degradación de la capacidad portante de las estructuras, logrando acelerar el proceso de deterioro y acortando su vida útil. Debido a la naturaleza porosa del material, el agua proveniente de

precipitaciones logra infiltrarse en el pavimento por medio de los poros y las fisuras presentes en la capa de rodadura. El agua que logra infiltrarse en la estructura (Figura 5), entra en contacto con el asfalto y se dispersa en el recubrimiento de este alrededor del agregado granular, ingresando en la interfase bitumen-agregado lo cual causa el debilitamiento de este último (Figura 6).



Figura 5. Infiltración de agua en los poros de la mezcla [5]

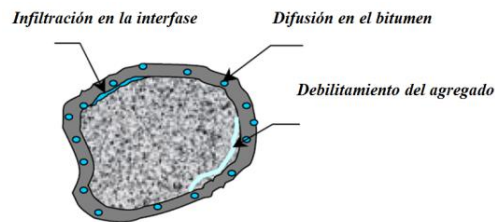


Figura 6. Infiltración de agua en el agregado [5]

Varios autores han considerado que el deterioro por el agua de las mezclas asfálticas es reversible [7] [8]. En las interfaces de asfalto-agregado se observa que después de haberse roto la adhesión por la intrusión de una película de agua puede ser restaurada mediante la eliminación de la película de agua si la película de betún está en la vecindad inmediata del agregado y si ninguna de sus características de la interfase han cambiado [9].

El proceso de secado de un sólido normalmente consta de tres etapas:

1. Aumento de la temperatura del material.
2. Pérdida de humedad del material.
3. Disminución de la velocidad de secado.

Igualmente la evolución de las propiedades de una mezcla sometida a un proceso de secado se divide en dos fases principales dependientes de las etapas de secado. La primera fase corresponde a las dos primeras etapas de secado, en esta fase continúa el proceso de deterioro y es sólo en la última etapa en la cual se produce el efecto de recuperación de las propiedades del material.

Los ensayos que se utilizan para evaluar el efecto del agua en una mezcla asfáltica no permiten establecer con precisión la evolución de su deterioro bajo condiciones particulares del clima al que estará sometida. Los ensayos más utilizados para evaluar las propiedades mecánicas del material pueden ser de tipo destructivo y no destructivo.

Debido a la falta de estudios sobre el efecto del agua en el pavimento, se hace necesaria una metodología que tome en cuenta el efecto del clima de la región donde se encuentre el material para conocer con mayor certeza el desempeño que se espera de éste durante su tiempo de servicio.

El modelo numérico que se desarrolla en este proyecto busca establecer la evolución del porcentaje de deterioro por efecto del agua y la recuperación debido al secado de la mezcla asfáltica en el transcurso del tiempo, dependiendo de la susceptibilidad del material al clima al cual está sometido.

2 DESARROLLO DEL MODELO

2.1 Estudios previos

Este modelo se basa en la investigación “Contribución de los métodos no destructivos a la evaluación del efecto del agua sobre las mezclas asfálticas” [5] donde se evaluó el modulo complejo de probetas sumergidas y saturadas de agua a diferentes temperaturas e intervalos de tiempo, logrando establecer relaciones matemáticas para determinar el deterioro de mezclas asfálticas a partir de las características del material y las condiciones a las que fueron sometidas las probetas, así como también la recuperación de éstas en función del tiempo de secado.

Con el objetivo de determinar la evolución del deterioro y la recuperación en una carpeta asfáltica bajo condiciones climáticas de un país tropical, se ajustaron las ecuaciones de degradación y recuperación, mostradas a continuación:

2.1.1 Ecuación principal de degradación [5]

La ecuación muestra que la degradación es dependiente de la temperatura a la que se encuentra el material.

$$D = (A * T_{pav} - B)t^{\beta} \quad (1)$$

Donde, D es la degradación en porcentaje, T_{pav} es la temperatura del material, t es el tiempo de permanencia del material en el agua, A, B y β son constantes de degradación que varían con cada mezcla (deben ser obtenidos experimentalmente).

Los valores de temperatura de un pavimento varían a lo largo del día, la ecuación (2) permite calcular la degradación para intervalos de tiempo con temperatura variable.

$$D = \sum_{i=0}^t D_i \quad (2)$$

$$D_i = D_{fi} - D_{oi} \quad (3)$$

$$D_{oi} = D_{f(i-1)} = (A * T_{pav(i)} - B)t_{(i)eq}^\beta \quad (4)$$

$$D_{fi} = (A * T_{pav(i)} - B)(t_{(i)eq} + t_i - t_{i-1})^\beta \quad (5)$$

Donde, D_i es la degradación en un intervalo de tiempo a temperatura constante, D_{fi} es la degradación al final del intervalo de tiempo i , D_{oi} es la degradación al comienzo del intervalo de tiempo i , $T_{pav(i)}$ es la temperatura del material en el intervalo de tiempo i , $t_{(i)eq}$ es el tiempo equivalente para la temperatura del intervalo (tiempo para alcanzar la degradación inicial bajo las condiciones a la temperatura constante $T_{pav(i)}$), t_i es el tiempo acumulado de degradación.

2.1.2 Ecuación de recuperación del material en función del tiempo de secado [5]

La ecuación es dependiente del tiempo de secado del material.

$$D = D_o [1 + \Phi_r f(t)] \quad (6)$$

$$f(t) = e^{-A(\log t)^B} - 1 \quad (7)$$

Donde, D_o es la degradación de la mezcla al comienzo de la recuperación, Φ_r es la fracción recuperable de la degradación, $f(t)$ es la ley de evolución de la recuperación, A y B son constantes de recuperación obtenidas experimentalmente para cada mezcla, t es el tiempo de secado a una temperatura y humedad relativa dadas. Aunque no es objetivo de este proyecto, se considera conveniente complementar con estudios que evalúen la evolución del secado en función de la temperatura del material y la humedad relativa del aire.

En la Figura 7 se muestra una comparación de la predicción de la evolución de la degradación de la mezcla MD-3 y los valores experimentales, durante tres ciclos de saturación-secado a 60°C y 40% de humedad relativa. [5]

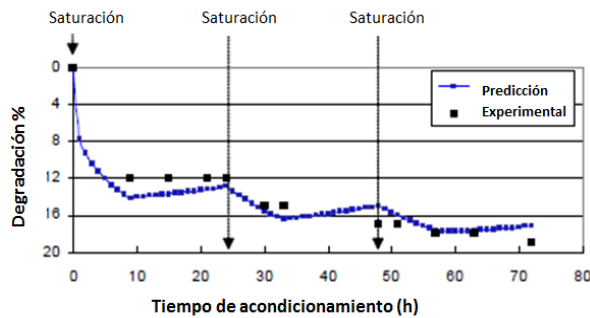


Figura 7. Degradación en el tiempo durante 3 ciclos de saturación [5]

El cálculo del deterioro a diferentes profundidades de una capa asfáltica (superficie, intermedio y base) requiere datos de temperatura del material, por tal razón se aplicó el modelo desarrollado por Correa y Navas [10] para calcular la temperatura superficial del pavimento a partir de la temperatura ambiente (Ecuación 8).

$$T_{pav(i)} = 0,058 * T_{amb}^2 - 1,0908 * T_{amb} + 25 \quad (8)$$

Donde, $T_{pav(i)}$ es la temperatura del pavimento en el intervalo i , T_{amb} es la temperatura ambiente en el intervalo.



Figura 8. Profundidades de la carpeta asfáltica a evaluar.

2.2 Concepción del modelo

Usando como referencia los registros de la investigación [10] se establecieron 8 ecuaciones que relacionan la temperatura superficial con la temperatura a diferentes profundidades de la capa por medio de regresión lineal para diferentes momentos del día, estableciendo 4 intervalos de tiempo (1:00-7:00, 8:00-12:00, 13:00-15:00, 16:00-0:00).

Las ecuaciones de deterioro fueron desarrolladas a partir de probetas en estado de saturación, sin embargo una carpeta asfáltica puesta en servicio no permanece en este estado constantemente, pues su grado de saturación varía a lo largo del tiempo en función de la temperatura y las precipitaciones que caen sobre ésta. Debido a lo anterior el valor de deterioro que se calcula con estas ecuaciones corresponderá a un material saturado, lo cual hace necesario que en el caso en que el material se encuentre parcialmente saturado, el valor resultante de la ecuación (2) de deterioro sea multiplicado por un factor de proporcionalidad (Ecuación 9). Para el desarrollo de este modelo se ha supuesto una relación lineal entre el porcentaje de deterioro y el de saturación.

$$D = \sum_{i=0}^t D_i * (S_i/100) \quad (9)$$

Donde, D es la degradación acumulada en porcentaje, D_i es la degradación en un intervalo de tiempo a temperatura constante, S_i es el grado de saturación en el intervalo i .

Para conocer el porcentaje de saturación es necesario desarrollar un modelo que, a partir de datos climatológicos, pueda calcular su grado de saturación a diferentes profundidades, por esta razón se han considerado dos modelos que permiten establecer el porcentaje de saturación a partir de la precipitación en un intervalo de tiempo. La Figura 9 y la ecuación 10 corresponden al modelo de saturación y la Figura 10 y ecuación 11 al modelo de secado propuesto.

2.2.1 Modelo de saturación:

$$S_i = S_o + \left(1 - e^{-\frac{\alpha t}{10}}\right) * (100 - S_o) \quad (10)$$

Donde, S_i es el grado de saturación en el intervalo i , S_o es el grado de saturación inicial del intervalo i es decir grado de saturación para el intervalo $i - 1$, α es un coeficiente de ajuste diferente para cada profundidad, t es el tiempo acumulado desde que inicia la precipitación.

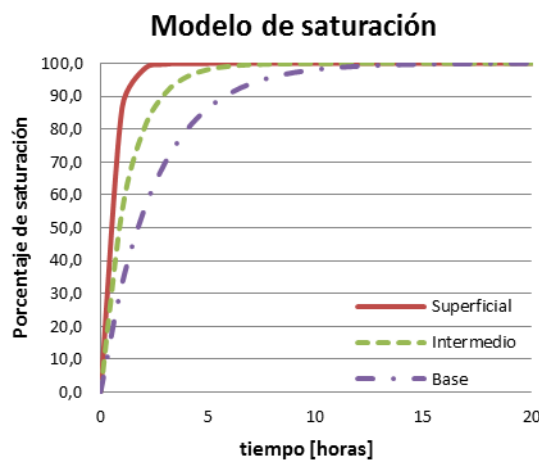


Figura 9. Modelo de saturación propuesto.

2.2.2 Modelo de secado:

$$S = S_o(e^{-E(\log t)^F}) \quad (11)$$

Donde S_i es el grado de saturación en el intervalo i , S_o es el grado de saturación inicial del intervalo i es decir grado de saturación para el intervalo $i - 1$, E y F son coeficientes de ajuste diferentes para cada profundidad, t es el tiempo acumulado desde que inicia el proceso de secado.

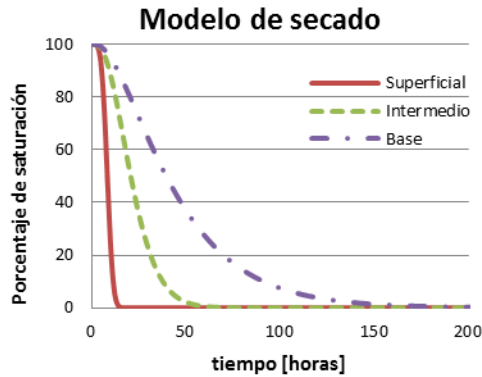


Figura 10. Modelo de secado propuesto.

A pesar de que estos modelos propuestos no han sido validados, son herramientas necesarias para desarrollar este modelo numérico. Sin embargo existe la necesidad de complementar con estudios para generar un modelo más ajustado a la realidad.

Para calcular el deterioro (Ecuación 9) en cada intervalo de tiempo se tuvo en cuenta que la temperatura del material varía para cada hora, por esta razón se debe hallar un valor de tiempo efectivo (Ecuación 12) que corresponde al tiempo que tardaría el material en alcanzar la degradación inicial del intervalo bajo las condiciones de temperatura del intervalo actual

$$t_{(i)eq} = \left(\frac{D_{oi}}{A \cdot T_{pav(i)} - B} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (12)$$

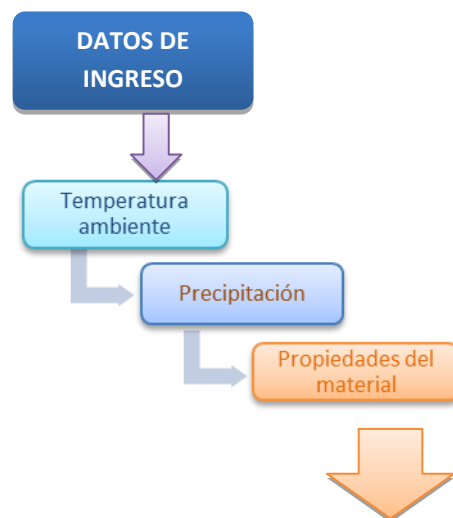
Donde, $t_{(i)eq}$ es el tiempo equivalente para la temperatura del intervalo (tiempo para alcanzar la degradación inicial bajo las condiciones a la temperatura constante $T_{pav(i)}$), D_{oi} es la degradación al comienzo del intervalo de tiempo i , $T_{pav(i)}$ es la temperatura del pavimento en el intervalo i , A, B y β son constantes de

degradación que varían con cada mezcla (deben ser obtenidos experimentalmente).

El proceso de recuperación de la mezcla asfáltica no comienza simultáneamente con el secado, ya que el proceso de deterioro continúa aun cuando ha cesado la precipitación hasta que el contenido de agua se reduzca lo suficiente para que inicie el proceso de recuperación. Se requieren estudios que establezcan el valor de saturación que permite al material recuperarse. En este modelo se supuso que dicha recuperación comienza cuando el proceso de secado ha reducido la saturación a un 5%.

2.3 Metodología del modelo numérico

Se desarrolló un modelo numérico en hoja electrónica de cálculo, el cual permite calcular el proceso de degradación de una capa asfáltica a diferentes profundidades. La información necesaria para utilizar el modelo así como el flujo dentro del programa creado se encuentran brevemente explicados en la Figura 11.



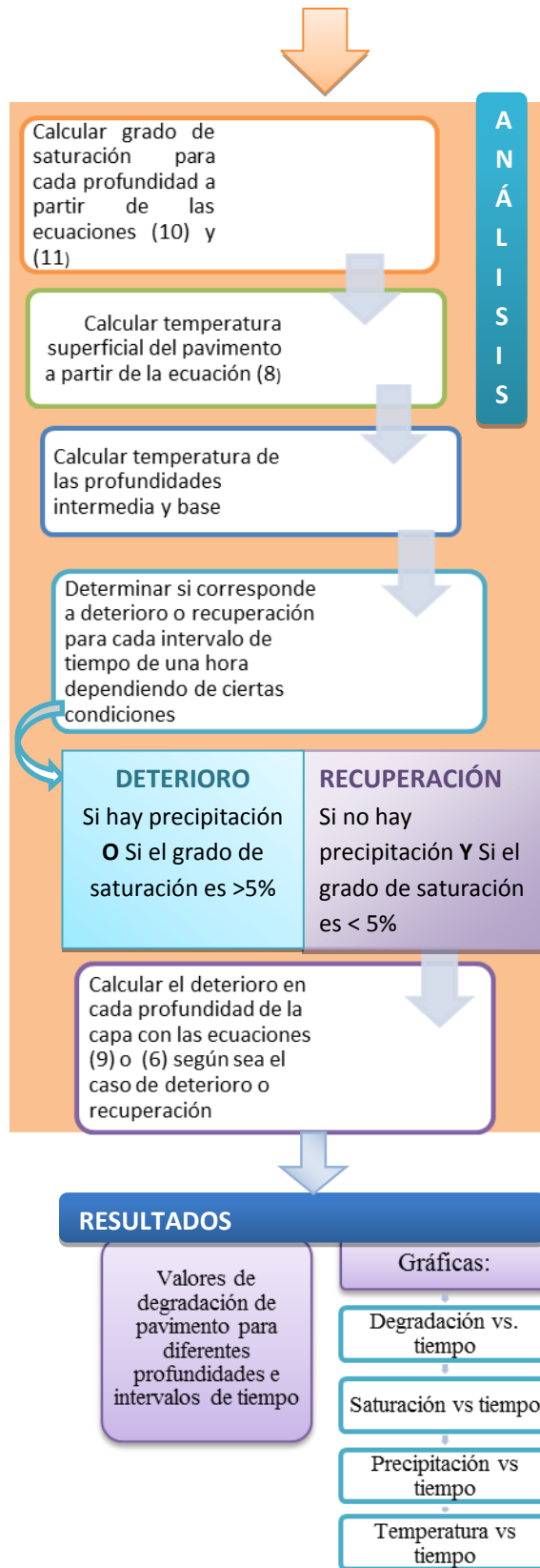


Figura 11. Metodología que sigue el modelo en Excel

3. APLICACIÓN DEL MODELO

Al modelo numérico se le ingresaron datos horarios de precipitación y temperatura ambiente correspondientes a un mes, igualmente se tomaron las constantes de degradación y recuperación de un material. El programa automáticamente sigue un proceso interno representado en la Figura 11 el cual concluye en la presentación de resultados tanto numéricos como gráficos.

El modelo numérico muestra el aumento en el deterioro cuando se presentan precipitaciones y a su vez la disminución de éste en periodos secos en los cuales el grado de saturación de la mezcla alcanza valores menores del 5%. La Figura 12 muestra de manera grafica los datos de precipitación ingresados, en la Figura 13 se presenta la evolución del grado de saturación según el modelo supuesto basado en los datos de precipitación y en la Figura 14 se encuentra la gráfica de degradación vs tiempo.

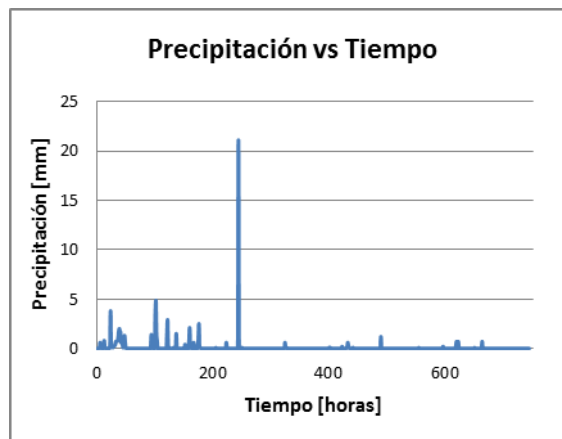


Figura 12. Gráfico precipitación vs tiempo.

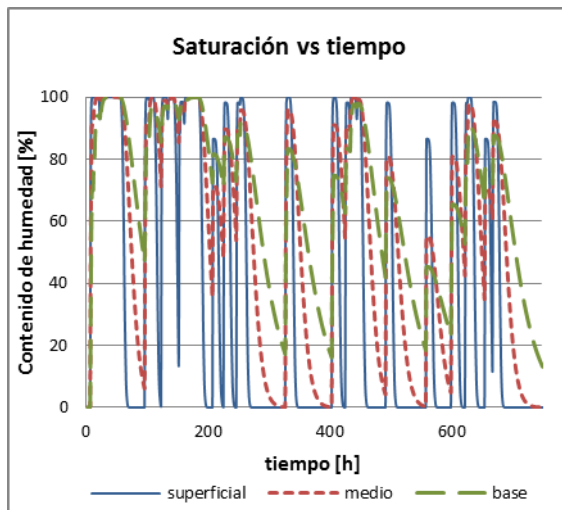


Figura 13. Gráfico saturación vs tiempo.

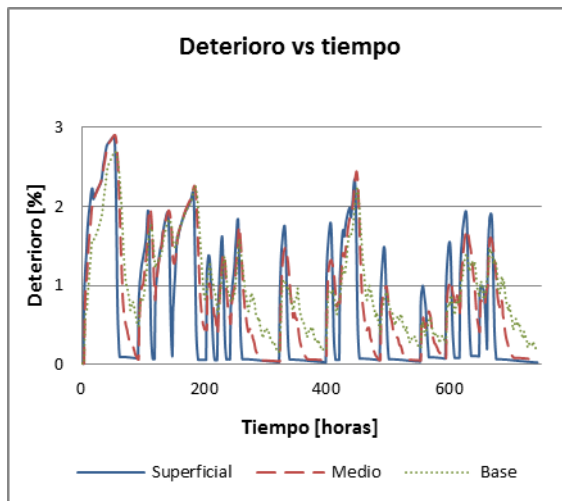


Figura 14. Gráfico deterioro vs tiempo.

El comportamiento mostrado en la grafica deterioro vs tiempo podría variar según las variables climatológicas ingresadas, en otras condiciones el deterioro alcanzaría otras tendencias de valores.

El aumento del deterioro indica también un mayor grado de afectación del pavimento, ya que el material no se encuentra en su condición óptima de

adhesión, esto implica una aceleración del proceso de pérdida de resistencia a la fatiga y disminución de la rigidez del material.

3.1. Interfaz del programa

Para el proceso de este modelo numérico, se diseñó un programa mediante el uso de macros en Excel. Esta herramienta permite al usuario calcular en corto tiempo el porcentaje de deterioro y de recuperación, a partir de los datos ingresados de temperatura ambiente, precipitación y características del material. A continuación se presenta una breve inducción al programa.

La portada (Figura 15) presenta la información del proyecto, de los autores y es el comienzo para ejecutar el programa. Al abrir el programa debe habilitar los macros y el SOLVER y dar en el botón “COMENZAR”



Figura 15. Portada.

En la segunda hoja (Figura 16) se encuentra los datos que se deben ingresar al programa, la temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$), la precipitación (mm), y las propiedades del material. Al terminar se da clic en el botón “CALCULAR” o en “VER GRÁFICOS” para poder ver los valores de deterioro obtenidos para dichas condiciones iniciales de la estructura. (Figura 17 y Figura 18)

INGRESO DE VALORES DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN

Hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Temperatura (°C)	23.1	22.1	22.4	21.2	22.2	22.1	22.1	22.5	23.2	24.3	25.1	24.3	23.3	23.1	24.5	25.1	23.1	22.3	22.3	22.3	22.3	22.3	22.3
Precipitación (mm)	0	0	0	0	0.1	0.6	0.1	0	0	0.1	0	0.2	0.5	0.1	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0.3

PROPIEDADES DEL MATERIAL

Exposición

A) 0.25
B) 0.050

Recuperación

A) 0.000
B) 0.5

CALCULAR

VER GRÁFICOS

Figura 16. Ingreso de variables

% DEGRADACIÓN

HORA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Degradación superficial (%)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Degradación interna (%)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Degradación base (%)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

HORA	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70			
Degradación superficial (%)	2.2	2.29	2.38	2.48	2.57	2.66	2.75	2.84	2.93	3.02	3.11	3.20	3.29	3.38	3.47	3.56	3.65	3.74	3.83	3.92	4.01	4.10	4.19
Degradación interna (%)	2.85	2.89	2.90	2.91	2.90	2.88	2.85	2.80	2.75	2.68	2.59	2.50	2.40	2.31	2.22	2.13	2.04	1.95	1.86	1.77	1.68	1.59	1.50
Degradación base (%)	2.65	2.67	2.69	2.70	2.69	2.66	2.60	2.52	2.43	2.33	2.23	2.13	2.03	1.94	1.84	1.75	1.66	1.57	1.48	1.39	1.30	1.21	1.12

HORA	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120			
Degradación superficial (%)	3.75	3.77	3.78	3.79	3.79	3.79	3.79	3.79	3.79	3.79	3.79	3.79	3.79	3.79	3.79	3.79	3.79	3.79	3.79	3.79	3.79	3.79	3.79
Degradación interna (%)	1.08	1.11	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	
Degradación base (%)	0.94	0.95	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	

HORA	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190		
Degradación superficial (%)	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20
Degradación interna (%)	1.28	1.31	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33
Degradación base (%)	1.09	1.09	1.08	1.07	1.05	1.03	1.00	0.96	0.91	0.85	0.79	0.72	0.65	0.58	0.51	0.44	0.37	0.30	0.23	0.16	0.09	0.02

HORA	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220		
Degradación superficial (%)	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58
Degradación interna (%)	1.44	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
Degradación base (%)	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24

Figura 17. Valores numéricos de degradación.

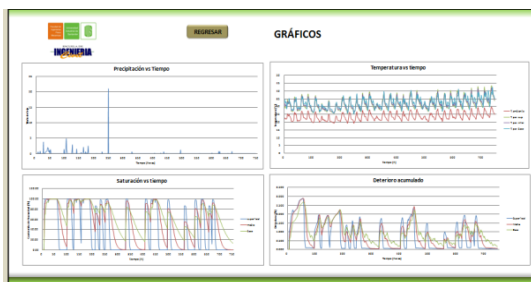


Figura 18. Resultados

Al final se encuentra una pestaña llamada “Modelo” en el cual se muestra todo el proceso que hace el modelo numérico para obtener los resultados.

MODELO NUMÉRICO																	
Hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Temperatura ambiente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Temperatura superficial	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Temperatura medio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Temperatura base	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Temperatura ambiente	22.8	22	22.4	22	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.4	22.3	22.4	22.3	22.2	22.5	22.4	22.5
Temperatura par superficial	30.1	29.1	29.1	29.1	29.4	29.4	29.1	29.1	29.1	29.1	29.5	29.6	29.4	29.3	29.1	29.1	29.1
Temperatura par intermedio	32.19	32.50	32.61	32.69	32.84	32.84	32.67	32.62	32.62	32.62	32.62	32.62	32.62	32.62	32.62	32.62	32.62
Temperatura par base	34.667	32.23	31.43	32.23	32.625	32.625	32.625	32.625	32.625	32.625	32.625	32.625	32.625	32.625	32.625	32.625	32.625
Precipitaciones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sa superficial	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sa medio	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sa base	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Humedad superficial [x]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Humedad medio [x]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Humedad base [x]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sa superficial	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sa medio	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sa base	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sa superficial	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Figura 19. Proceso interno del Modelo

4. CONCLUSIONES

El modelo numérico propuesto es el resultado de integrar los procesos de cálculo de un modelo de degradación y recuperación, para evaluar el desempeño de una capa asfáltica a diferentes profundidades, bajo los efectos del agua en forma de precipitación y con diferentes ambientes de temperatura. Este es un modelo inicial que requiere ser validado, el cual considera la variación de la susceptibilidad del material, la cantidad de agua en la capa asfáltica, la temperatura y el tiempo de exposición bajo las condiciones climáticas ingresadas.

Los resultados obtenidos al analizar el proceso de degradación a diferentes profundidades de una capa asfáltica permiten identificar que la mayor afectación se produce en la franja superficial, ya que ésta se encuentra más expuesta a los factores ambientales a los que se ve sometida la estructura. Igualmente se observó que el comportamiento de la temperatura en los pavimentos flexibles no es uniforme en toda su profundidad, a las 12:00 horas se presenta la máxima temperatura en superficie y la mínima en la parte baja de la capa asfáltica y por el contrario a las 24:00 horas se reporta la mínima temperatura en superficie y la máxima en la parte más profunda de la capa.

Los resultados permiten identificar las siguientes áreas de estudio para calibrar y ajustar el modelo numérico: En primer lugar se recomienda evaluar cómo cambia el grado de saturación en función de la precipitación, la profundidad, la permeabilidad del material, el tráfico, el drenaje y el nivel freático. Igualmente analizar el proceso de secado bajo condiciones variables de temperatura y humedad relativa. Asimismo investigar el deterioro en probetas parcialmente saturadas para establecer una relación que permita conocer la evolución del proceso de deterioro en función del grado de saturación y a su vez definir la

fracción recuperable de la degradación en función de la pérdida de las propiedades del material. Además sería conveniente relacionar cómo cambia la resistencia en fatiga y la rigidez del material cuando éste no se encuentra en su condición óptima de adhesión. Por otra parte se requiere determinar el porcentaje de saturación que permite al material comenzar su recuperación durante el secado. Finalmente se sugiere complementar con estudios que determinen los valores de temperatura a diferentes profundidades de una capa asfáltica en función de la temperatura ambiente y la radiación solar.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Alonso E. “Succión y humedad en bases y explanadas de carreteras”, Robertson R., Birgisson B. “Evaluation of water flow through pavement systems”; Simposio Internacional sobre Drenaje Interno de Firmes y Explanadas”. Granada, España 1998.
- [2] Cañete A. “Estudio de la sensibilidad de firmes y explanadas de carreteras bajo cambios climáticos”. [Tesis de especialización]; Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y puertos de Barcelona; Universidad politécnica de Cataluña (UPC). España, 2000.
- [3] Castañeda E. SUCH, Ch. “Evaluation of moisture sensitivity of bituminous mixtures by a complex modulus approach”. Journal of the Transportation Research Board No. 1891. TRB. Washington. 2004
- [4] Castañeda Pinzon E. “Contribution de methodes non destructives a l’évaluation del’effet de l’eau sur les enrobes bitumineux.”[PhD. Tesis]; Ecole doctorale mecanique, thermique et genie civil; Université de Nantes. France, 2004
- [5] Correa Avello J. W. Navas Navas E. R “Variación de la temperatura del pavimento asfáltico puesto en servicio” [Tesis pregrado]; Escuela de Ingeniería Civil; Universidad Industrial de Santander (UIS). Colombia, 1996.
- [6] García Aragón C. Caro Spinel Silvia “Efecto del clima sobre el desempeño de pavimentos”. [Tesis de maestría]; Escuela de Ingeniería Civil; Universidad de Los Andes. Bogotá, Colombia, 2005.

[7] Garnica Anguas P. Delgado Alamilla H. Sandoval Sandoval C. "Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas," Publicación Técnica No 272 Sanfandila, Qro, 2005, capítulo 1, p. 5-8.

[8] Moutier F. "Etude statistique de l'effet de la composition des enrobes bitumineux sur leur comportement en fatigue et leur module complexe". Bulletin de liaisons Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 172, pp.33-41, mars 1991.

[9] Padilla Rodríguez A. "Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista," [Minor Thesis]; Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y puertos de Barcelona; Universidad politécnica de Cataluña (UPC). España, 2004

[10] Pérez Rodríguez V. "Evaluación del efecto del agua en vigas de concreto asfáltico bajo condiciones inducidas de humedad". [Tesis de maestría]; Escuela de Ingeniería Civil; Universidad Industrial de Santander (UIS). Colombia, 2012.

[11] Schmidt R.J., Graf P.E." The effect of water on the resilient modulus of asphalt-treated mixes". Proceedings Of The Association Of Asphalt Paving Technologists. Volume 41. Cleveland Ohio. February 14,15 And 16. 1972. Pp 118-162.

[12] Scott J. , Schellenkens J. , Vonk W. , Wilson P. "Etude des mécanismes d'adhésion et de désenrobage des bitumes routiers". Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées. Numéro spécial V. Paris. Décembre 1977.

[13] Wirtgen GmbH, "Wirtgen Manual de Reciclado en Frío," segunda edición, Alemania, 2004, capítulo 1, p. 21.