

Duración teórica en pavimentos flexibles con bases y sub-bases sometidas a condición saturada no-drenada

Theoretical duration in flexible pavements with bases and sub-bases subjected to a non-drained saturated condition

Briceño, Johannes^{1,2*}; Molina, Johan¹; Sanchez, Luis¹; Verjel, Victor³

¹Departamento de Vías, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

²Postgrado de Ingeniería Vial, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

³Programa de Ingeniería Civil, Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia.

*ingjebb@gmail.com

Resumen

Con el crecimiento y desarrollo vial, la ingeniería civil ha mostrado gran interés en el diseño óptimo de pavimentos. Considerando la diversidad de condiciones climáticas y topográficas, el interés se ha centrado en su durabilidad y rendimiento. Esta investigación tiene como objetivo analizar el comportamiento de bases y sub-bases de pavimentos flexibles sometidas a la condición saturada no-drenada, la estructura del pavimento fue diseñada bajo los métodos (AASHTO, 1993) y venezolano (Salamé y col., 1970), utilizando como base experimental la capacidad de soporte mediante el ensayo de Capacidad de Soporte California (CBR) (Stanton y Porter, 1929). Se determinó el CBR de diseño en condición saturada drenada y saturada no-drenada en material de base y sub-base para evaluar la duración teórica del pavimento, para ambos métodos de diseño de espesores. Utilizando los espesores hallados bajo la condición saturada drenada se determinó la duración teórica al someter los mismos a la condición saturada no-drenada, comparando la duración del pavimento flexible en ambas condiciones y se finalizó con el análisis e interpretación de los resultados obtenidos. Como resultado final se logró confirmar la disminución de la duración teórica del pavimento al someterlo a la condición saturada no-drenada de su estructura de capas.

Palabras claves: Pavimentos flexibles, Bases y Sub-bases, Condición saturada no-drenada, Duración teórica.

Abstract

With the growth and development of roads, civil engineering has shown great interest in optimal pavement design. Considering the diversity of climatic and topographic conditions, interest has focused on its durability and performance. This research aims to analyze the behavior of bases and sub-bases of flexible pavements subjected to the unsaturated condition, the pavement structure was designed under the methods (AASHTO, 1993) and Venezuelan (Salamé et al., 1970), using as an experimental basis the bearing capacity by means of the California Bearing Capacity (CBR) test (Stanton and Porter, 1929). The design CBR was determined in saturated drained and saturated non-drained condition in base and sub-base material to evaluate the theoretical duration of the pavement, for both thickness design methods. Using the thicknesses found under the saturated drained condition, the theoretical duration was determined when subjecting them to the saturated non-drained condition, comparing the duration of the flexible pavement in both conditions and the analysis and interpretation of the results obtained was concluded. As a final result, it was possible to confirm the decrease in the theoretical duration of the pavement by subjecting it to the saturated non-drained condition of its layer structure.

Keywords: Flexible pavements, Bases and Sub-bases, Non-drained saturated condition, Theoretical duration.

1 Introducción.

El diseño de pavimentos flexibles en la ingeniería vial muestra gran interés y preocupación por la calidad, durabilidad y rendimiento de los sistemas viales, de manera que su diseño garantice el servicio óptimo a los usuarios. De manera particular, las estructuras viales están expuestas a condiciones climáticas cambiantes, que aunado a condiciones topográficas particulares, al crecimiento automotor, cargas y al aumento poblacional; pueden generar cambios que afecten la durabilidad y el servicio de las vías, generando altos costos en mantenimiento y afectando la rentabilidad.

En particular, en la región de los llanos venezolanos en la época de lluvias se presentan desbordes de ríos y anegación de grandes extensiones de terreno que pueden generar saturación en las estructuras de pavimento, generando una condición saturada no-drenada. En esta región es común el diseño de secciones transversales construidas en terraplen, esta condición saturada no-drenada pudiera afectar el comportamiento de la estructura de pavimento y comprometer la durabilidad para la cual fueron diseñados. Estos terraplenes construidos generalmente con material poco drenante por su contenido de arcillas y la estructura de pavimento terminada en una capa asfáltica considerada impermeable, conforma el encapsulamiento del agua que ha saturado la estructura de pavimento (base y sub-base), generando que estas capas trabajen durante un tiempo considerable del año en condición saturada no-drenada. (Muñoz 2018) señala que el suelo al estar en contacto con el agua, con valores mayores al contenido de humedad óptimo, disminuye su capacidad de soporte, lo cual podría afectar la estructura de pavimento.

En esta investigación se analizó la capacidad de soporte del material que constituye las capas de base y sub-base de la estructura de un pavimento flexible, para ello se utilizó como base experimental el Ensayo de Soporte California (California Bearing Ratio (CBR)) (Stanton y col., 1929).

De lo anterior se desprende la importancia para el campo de la ingeniería vial el conocer el efecto que puede generar la saturación de agua en la estructura del pavimento y en la duración para la cual fue diseñado. Y responder, si las condiciones de saturación y drenaje a las que puede estar sometida la estructura de pavimento es un aspecto relevante a la hora de evaluar su durabilidad.

Por esta razón, el presente estudio pretende analizar el comportamiento de la base y sub-base sometidas a una condición saturada no-drenada, para

pavimentos flexibles con diseño de espesores por los métodos (The American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO, 1993) y establecer una comparación entre la duración teórica de un pavimento sometido a la condición saturada drenada y saturada no-drenada.

Para esta investigación se utilizó dos materiales, uno integral y uno natural, que luego de haber estudiado sus características físicas y de resistencia se escogió cual formará parte de la capa base y cual de la sub-base.

Dentro de este orden de ideas, para lograr los objetivos de esta investigación, se diseñará los espesores de capas a un pavimento flexible sometiendo su estructura (Base y Sub-base) a la condición saturada drenada, para una duración de 20 años, para ello se determinará el CBR_{Diseño} en esta condición, tomando este diseño como un diseño patrón. Después, se determinará el CBR_{Diseño} para la condición saturada no-drenada de los mismos materiales que conforman la base y sub-base. Asimismo, se someterá este diseño patrón (condición saturada drenada) a la condición saturada no-drenada que no es la generalmente utilizada en el diseño de pavimentos, es decir, los espesores de capa hallados por ambos métodos de diseño (AASHTO y venezolano) en condición saturada drenada serán sometidos a esta nueva condición. Luego, utilizando las ecuaciones que corresponden a cada método de diseño de espesores se determinará la duración teórica en la condición saturada no-drenada y se comparará con la condición saturada drenada del diseño patrón.

2 Marco metodológico.

Para desarrollar esta investigación se estableció una metodología que comprende cuatro (4) etapas mediante las cuales fue posible lograr el objetivo. Estas etapas fueron: Determinar el CBR_{diseño} en condición saturada drenada y en condición saturada no-drenada del material para base y sub-base, luego; Estimar la duración teórica tanto por el método AASHTO como venezolano, del pavimento con su estructura sometida a la condición saturada no-drenada, utilizando los espesores diseñados con el material en condición saturada drenada y el CBR_{diseño} para la condición saturada no-drenada, posteriormente; Comparar la duración del pavimento flexible en la condición saturada drenada y saturada no-drenada, finalmente; Analizar resultados de modo que se establezcan posibles recomendaciones.

En este orden de ideas se describe cada una de las etapas para lograr los objetivos planteados.

2.1 Determinación el $CBR_{diseño}$ en condición saturada drenada y en condición saturada no-drenada.

Para la realización de los ensayos se prepararon los diferentes especímenes de prueba, con los dos tipos de material, realizándole el análisis granulométrico, límites de consistencia, se realizó la clasificación del suelo por los métodos AASHTO y Sistema Unificado de clasificación de Suelos (SUCS), luego, se realizó el ensayo de compactación (Proctor modificado), seguidamente se realizó el ensayo CBR en ambas condiciones de saturación, para diferentes energías de compactación (12, 25, 56 golpes), en la etapa de penetración del ensayo CBR para la condición saturada no-drenada se utilizó una variante del ensayo convencional como es el uso de una piscina que permite mantener la probeta de suelo en una condición saturada no-drenada durante todo el procedimiento como se muestra en la Figura 1 y 2.



Fig. 1. Penetración de probetas en condición saturada no-drenada.



Fig. 2. Penetración de probetas en condición saturada no-drenada.

Para ambas condiciones de saturación y tipo de material, el $CBR_{diseño}$ se obtuvo considerando el 100% de la densidad seca máxima (γ_{dmax}) de

compactación, tanto para Base como para Sub-base.

Luego, al tener todos los ensayos de clasificación y caracterización de los materiales y en especial el ensayo CBR y obtenido el $CBR_{diseño}$ tanto para la condición saturada drenada como para la condición saturada no-drenada, se determinó que material se usará para base y cual para sub-base, atendiendo los requerimientos establecidos en la normativa.

2.2 Estimar la duración teórica del pavimento con su estructura sometida a la condición saturada no-drenada.

Para ello, se partió por fijar la duración del pavimento diseñado en condición saturada drenada (Diseño patrón) en 20 años ($n=20$ años).

Ahora bien, para estimar la duración teórica del pavimento en la condición saturada no-drenada, primero fue necesario realizar el diseño de pavimento estimando los espesores en la condición saturada drenada (Diseño patrón), tanto para el método AASHTO como para el método venezolano. Cabe destacar, que para ambos métodos se asumieron valores constantes para $CBR_{sub-rasante}$, Estabilidad Marshall, confianza, desviación estándar, condiciones de drenaje buenas y porcentaje de exposición a la saturación; valores que se muestran en la Tabla 8(a).

De igual forma, se tomaron valores de tránsito, que para esta investigación serán asumidos como constantes, tales como factor camión, tasa de crecimiento, tránsito diario promedio, porcentaje de vehículos pesados, factor de distribución por sentido o canal en función del tráfico diario promedio, factor de ajuste por tráfico balanceado, número de años de duración de pavimento ($n=20$ años) y factor de utilización de canal (fuc); valores que se muestran en la Tabla 8(a).

2.2.1 Diseño patrón. Diseño de pavimento con su material de base y sub-base en condición saturada drenada. Método AASHTO.

Obtenidos los valores de $CBR_{diseño}$ a través de los ensayos de laboratorio, tanto para base como para sub-base en condición saturada drenada, se precisa calcular el Modulo Resiliente (MR) para base, sub-base y sub-rasante; utilizando las ecuaciones 1 y 2.

$$MR = 1500 * CBR \dots \dots \dots \text{Ecuación (1)}$$

$$MR = 385,05 * CBR + 8660 \dots \dots \dots \text{Ecuación (2)}$$

Luego, utilizando las tablas del método AASHTO de escoge los coeficientes de drenaje (m_1), para la base (m_B) y la sub-base (m_{SB}), recomendados

según la condición de drenaje y exposición a la saturación, mostrados en la Tabla 8(b).

Seguidamente, se determinan los coeficientes de aporte estructural (a_i) de cada capa (sub-rasante (a_{SR}), sub-base (a_{SB}) y base (a_B)), utilizando las graficas del método.

Después, con los valores de tránsito constantes se obtiene el valor de números de ejes equivalentes ($N't$) utilizando la Ecuación (3), y con el valor de la confiabilidad siendo constante y el módulo resiliente efectivo se utiliza la ecuación de diseño del método para hallar los números estructurales (SN_i) para cada capa (sub-rasante (SN_{SR}), sub-base (SN_{SB}) y base (SN_B)), Ecuación (5).

$$N't = PDT_o * \%Vp * FC * fds * fuc * A * D *$$

FpEcuación (3).

Donde:

$N't$ = Representa las cargas equivalentes diarias para el año inicial de diseño.

PDT_o = Volumen diario del total de vehículos (livianos + pesados), para cualquier día del año inicial (n) del diseño.

$\%Vp$ = número de vehículos pesados, expresado en forma decimal, como porcentaje del PDT.

FC = Factor camión.

fds = Factor de distribución por sentido.

fuc = Factor de utilización de canal.

A = Factor de ajuste por tránsito desbalanceado.

D =Número de días por año en que las variables anteriores son aplicables.

Fp =Factor de crecimiento o proyección del tránsito. Ecuación 4.

$$Fp = \frac{(1+TC)^n - 1}{TC} \dots \dots \dots \text{Ecuación (4)}$$

Donde:

n = Número de años del periodo considerado.

TC = Tasa de crecimiento interanual.

$$\log_{10} Wt_{18} = Z_R * S_o + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) -$$

$$0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5} \right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10} M_R -$$

8.07.....Ecuación (5).

Donde:

Variables independientes.

W_{t18} = Número de aplicaciones de cargas equivalentes de 80 kN (18.000 lb) acumuladas en el periodo de diseño (n).

Z_R = Desviación normal estándar, función de la confiabilidad del diseño o grado de confianza en que las cargas de diseño no serán superadas por las

cargas reales aplicadas sobre el pavimento.

S_o = Desviación estándar del sistema, función de posibles variaciones en las estimaciones de tránsito (cargas y volúmenes) y comportamiento del pavimento a lo largo de su vida de servicio.

ΔPSI = Pérdida de servicibilidad o servicapacidad (Condición de Servicio) prevista en el diseño, y medida como la diferencia entre el índice de servicio inicial (p_o) y el final (p_i).

MR = Módulo resiliente de la sub-rasante y de las capas de bases y sub-bases granulares, obtenido a través de ecuaciones de correlación con la capacidad portante (CBR) de los materiales (suelos y granulares).

Variable dependiente.

SN = Número estructural, o capacidad de la estructura para soportar las cargas bajo las condiciones (variables independientes) de diseño.

Finalmente, con los SN_i , a_i y m_i , utilizando las ecuaciones de la 6 a la 8, se determinan los espesores e_i de cada capa de la estructura de pavimento (espesor de capa asfáltica de rodamiento (e_{CR}), espesor de la base (e_B) y espesor de la sub-base (e_{SB})) en la condición saturada drenada, que servirán de diseño patrón y base para la estimación de la duración del pavimento en la condición saturada no-drenada.

$$SN_B \geq e_{CR} * a_{CR} \dots \dots \dots \text{Ecuación (6)}$$

$$SN_B \geq e_{CR} * a_{CR} + e_B * a_B * m_B \dots \dots \text{Ecuación (7)}$$

$$SN_B \geq e_{CR} * a_{CR} + e_B * a_B * m_B + e_{SB} * a_{SB} * m_{SB} \dots \dots \dots \text{Ecuación (8)}$$

2.2.2 Diseño patrón. Diseño de pavimento con su material de base y sub-base en condición saturada drenada. Método venezolano.

Obtenidos los valores de $CBR_{diseño}$ a través de los ensayos de laboratorio, tanto para base como para sub-base en condición saturada drenada, se realiza la corrección del $N't$ con el uso del factor regional (R_g) de la Ecuación 9 que es función de la pendiente (p) de la vía. Seguidamente se determina el número estructural venezolano (NEV) para cada capa (NEV_{SR} , NEV_{SB} , NEV_B) utilizando la Ecuación 10.

$$R_g = \left(\frac{p}{3}\right)^{0.25} \dots \dots \dots \text{Ecuación (9)}$$

$$Nt = N't * R_g \dots \dots \dots \text{Ecuación (10)}$$

$$NEV(i) = \frac{3.236 * Nt^{10^{(0.094 * \log(CBR(i)) - 0.932)}}}{CBR(i)^{0.533}} \dots \text{Ecuación (11).}$$

Al mismo tiempo, siguiendo la metodología de diseño del método venezolano se obtienen los coeficientes de aporte estructural de cada capa a_i . Finalmente, con los NEV_i y a_i , utilizando las ecuaciones de la 12 a la 15, se determinan los espesores e_i de cada capa de la estructura de pavimento (e_{CAR} , e_B , e_{SB} y e_{MS}) en la condición saturada drenada, que servirán de diseño patrón y base para la estimación de la duración del pavimento en la condición saturada no-drenada.

$$NEV_{SR} \geq e_{MS} * a_{MS} + e_{SB} * a_{SB} + e_B * a_B + e_{CAR} * a_{CAR} + e_{CR} * a_{CR} \dots \text{Ecuación (12).}$$

$$NEV_{MS} \geq e_{SB} * a_{SB} + e_B * a_B + e_{CAR} * a_{CAR} + e_{CR} * a_{CR} \dots \text{Ecuación (13).}$$

$$NEV_{SB} \geq e_B * a_B + e_{CAR} * a_{CAR} + e_{CR} * a_{CR} \dots \text{Ecuación (14).}$$

$$NEV_B \geq e_{CAR} * a_{CAR} + e_{CR} * a_{CR} \dots \text{Ecuación (15).}$$

2.2.3 Estimar la duración teórica.

Se dice que esta estimación de duración del pavimento fue hecha de manera teórica para la condición saturada no-drenada, ya que se utilizó la Ecuación 5 (Método AASHTO) y 11 (Método venezolano).

2.2.3.1 Método AASHTO.

Para esto, se utilizó los espesores de capa del diseño patrón de pavimento (en condición saturada drenada), con el CBR_i hallado en condición saturada no-drenada se determinaron los MR_i utilizando las Ecuaciones 1 y 2, luego con las nuevas condiciones de drenaje y exposición a la saturación correspondientes a la condición saturada no-drenada se obtienen los coeficientes m_i y se determinan los nuevos números estructurales (SN_i).

Finalmente, determinado los nuevos SN_i se tomó el SN_{SR} y utilizando la Ecuación 5 donde el término Wt_{18} es función de la proyección del tránsito (Ecuación 4) y, esta de los años de duración (n), se despeja el valor de “ n ” que representa la duración teórica de un pavimento cuyos espesores se

determinaron en condición saturada drenada, pero se sometieron a una condición saturada no-drenada.

2.2.3.2 Método venezolano.

Para esto, se utilizó los espesores de capa del diseño patrón de pavimento (en condición saturada drenada), con el CBR_i hallado en condición saturada no-drenada se determinan los nuevos aportes estructurales a_i para las diferentes capas. Seguidamente, con los e_i de la condición saturada drenada y los nuevos a_i en condición saturada no-drenada se determinan los nuevos NEV_i utilizando las Ecuaciones de la 12 a la 15.

Finalmente, determinado los nuevos NEV_i se tomó el NEV_{SR} y utilizando la Ecuación 11 donde el término Nt es función de la proyección del tránsito (Ecuación 4) y, esta de los años de duración (n), se despeja el valor de “ n ” que representa la duración teórica de un pavimento cuyos espesores se determinaron en condición saturada drenada, pero se sometieron a una condición saturada no-drenada.

2.3 Comparación de la duración del pavimento flexible en la condición saturada drenada y saturada no-drenada.

Para realizar esta comparación de la duración del pavimento flexible para los dos métodos (ASSHTO y venezolano) se tomaron en consideración los valores de duración fijados y obtenidos. Para la condición saturada drenada se fijó en 20 años ($n=20$ años) y para la condición saturada no-drenada los obtenidos mediante el proceso de estimación teórica de la duración ya señalado.

3 Análisis de resultados.

Siguiendo los pasos presentados en la metodología de la investigación y obtenido los resultados de laboratorio realizados a los materiales en estudio, se presentan los métodos de diseño de pavimentos para alcanzar los objetivos planteados.

Antes de realizar el diseño de un pavimento se debe verificar la calidad de los materiales que van a conformar la estructura del mismo. Comparar resultados de ensayos de laboratorio con los requerimientos exigidos por la normativa técnica en cuanto a la calidad del material según el método empleado.

Por tal razón, a los materiales analizados, material natural y material integral se le realizaron los ensayos de laboratorio de control de calidad para base (B) y sub-base (SB) exigidos por la normativa (COVENIN 2000-87). Los resultados de estos ensayos se muestran de forma resumida en la Tabla 1(a) y Tabla 1(b).

Tabla 1(a). Ensayos control de calidad. Especificaciones.

Material	Identificación visual	Análisis granulométrico por tamizado	Límites de consistencia			Clasificación AASHTO
		%P200	%LL	%LP	IP	
Natural	Suelo grueso (gravoso) deforma angular	1.86	19.59	NP	NP	A-1-a(0)
Integral	Suelo grueso (gravoso-arenoso) deforma angular	5.24	22.31	NP	NP	A-1-a (0)
Especificaciones base (B)		<35%	<25		<6	
Especificaciones sub-base (SB)		<35%	<35		<9	

Tabla 8(b). Ensayos control de calidad. Especificaciones.

Material	Partículas planas y alargadas (%)	Desgaste Los Ángeles (%)	Contenido de materia orgánica (%)	γ_{dmax} (Kg/cm ³)	Hinchamiento (%)	CBR %
Natural	15.46	45	1.58	2210.00	0.99	26.43
Integral	No presentó	47	1.07	2245.00	0.95	6.25
Especificaciones base (B)	<20%	<50%	<5		≤3	>60 u 80%
Especificaciones sub-base (SB)	<20%	<50%	<5		≤3	>40%

* γ_{dmax} , representa la densidad seca máxima del ensayo Proctor modificado

En las Tablas 1(a) y 1(b) se puede notar que los materiales cumplen con las especificaciones, con excepción de los resultados de CBR donde por lo general en los materiales presentes en Venezuela este valor es bajo, obligando a trabajar con los materiales con que se cuenta y compensando esta realidad con el aumento de espesores de las capas de la estructura de pavimento.

Posteriormente, se define que material va a conformar la estructura de pavimento, base o sub-base. Resultando con mejor comportamiento el material natural por lo que se escogió como material para conformar la base (B) de la estructura de pavimento. Se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Definición del material de base y sub-base.

Material	Capa de la estructura de pavimento
Natural	Base (B)
Integral	Sub-base(B)

3.1 Determinación el CBR_{diseño} en condición saturada drenada y en condición saturada no-drenada.

Siguiendo el procedimiento descrito en el marco metodológico, la Tabla 3 y 4 muestra los resultados de laboratorio del ensayo CBR del material natural para la condición saturada drenada, asimismo, la Tabla 5 y 6 para el material integral en condición saturada drenada. Cabe señalar que, para determinar el $CBR_{diseño}$ de la capa base (B) se consideró el 100% de la densidad seca máxima (γ_d)

del ensayo de compactación (Proctor modificado) al igual que para la sub-base (SB).

Tabla 4. Ensayo CBR. Material natural. Condición saturada drenada.

Golpes por capa	Sobrecarga (grs)	Días de imbibición	γ_d (kg/m ³)	ω_{final} (%)	Hinchamiento o lineal relativo (%)	CBR (%)	
						a 2.54m m	a 5.08m m
12	5503	4	2025.02	10.47	0.994	5.71	12
25	5516	4	2098.84	9.67	0.971	10.71	25
56	5498	4	2193.54	9.00	0.938	12.14	56

Tabla 4. Ensayo CBR. Material integral. Condición saturada drenada.

Golpes por capa	Sobrecarga (grs)	Días de imbibición	γ_d (kg/m ³)	ω_{final} (%)	Hinchamiento o lineal relativo (%)	CBR (%)	
						a 2.54m m	a 5.08m m
12	5503	4	2138.33	6.11	0.950	3.75	6.25
25	5516	4	2198.99	6.08	0.926	5.00	10.63
56	5498	4	2242.97	6.12	0.906	7.14	15.00

* γ_d , representa la densidad seca, ω_{final} , es el contenido de humedad al final del ensayo.

Como se puede observar en la Tabla 3 y 4, el material natural tiene una mejor capacidad de soporte, mayor que el material integral, una de las condiciones predominantes a la hora de escoger que capa de la estructura de pavimento va a conformar.

Tabla 5. Ensayo CBR. Material natural. Condición saturada no-drenada.

Golpes por capa	Sobrecarga (grs)	Días de imbibición	γ_d (kg/m ³)	ω_{final} (%)	Hinchamiento o lineal relativo (%)	CBR (%)	
						a 2.54m m	a 5.08m m
12	5503	4	2077.89	8.72	0.953	4.28	8.57
25	5516	4	2141.41	8.46	0.933	4.69	10.63
56	5498	4	2236.90	7.37	0.913	2.67	7.33

* γ_d , representa la densidad seca, ω_{final} , es el contenido de humedad al final del ensayo.

Tabla 6. Ensayo CBR. Material integral. Condición saturada no-drenada.

Golpes por capa	Sobrecarga (grs)	Días de imbibición	γ_d (kg/m ³)	ω_{final} (%)	Hinchamiento o lineal relativo (%)	CBR (%)	
						a 2.54m m	a 5.08m m
12	5503	4	2190.34	5.81	0.708	4.28	11.43
25	5516	4	2213.51	5.73	0.676	14.29	32.86
56	5498	4	2252.61	5.63	0.664	4.28	13.57

* γ_d , representa la densidad seca, ω_{final} , es el contenido de humedad al final del ensayo.

De igual forma, en la Tabla 5 y 6 podemos notar que el material que se ve más afectado en la pérdida de capacidad de soporte (CBR) es el material natur

Al comparar la capacidad de soporte (CBR) en estas dos condiciones, es evidente que se ve afectada por la condición de saturación y drenaje del ensayo.

A continuación, la Tabla 7 muestra que capa de la estructura forma cada material estudiado y su $CBR_{diseño}$, tanto en condición saturada drenada como saturada no-drenada.

Tabla 7. $CBR_{diseño}$

Material	Capa de la estructura de pavimento	$CBR_{diseño}$ al 100% γ_{dmax} (%)	
		Condición saturada drenada	Condición saturada no-drenada
Natural	Base (B)	26.43	7.33
Integral	Sub-base (SB)	15	13.57

En la Tabla 7 se puede notar que el valor de $CBR_{diseño}$ disminuye cuando se evalúa en la condición saturada no-drenada en comparación con la condición saturada drenada. Al escoger el $CBR_{diseño}$ en la condición saturada no-drenada se utilizó un criterio conservador por el comportamiento del material, que al aumentar la energía de compactación durante el ensayo disminuye su capacidad de soporte (CBR), además, del hecho de estar impedido el drenaje del agua en la masa de suelo durante el ensayo produce una falsa realidad de soporte por estar trabajando en una condición saturada no-drenada donde el agua atrapada en los intersticios del suelo soporta la carga.

3.2 Estimar la duración teórica del pavimento con su estructura sometida a la condición saturada no-drenada.

3.2.1 Diseño patrón. Diseño de pavimento en condición saturada drenada. Método AASHTO.

Habiendo escogido entre los dos materiales utilizados cual conformaría la base (B) y cual la sub-base(SB) y cuáles son los $CBR_{diseño}$ para cada capa (Tabla 7), la Tabla 8(a) y 8(b) resumen los resultados del proceso de diseño.

3.2.2 Diseño patrón. Diseño de pavimento en condición saturada drenada. Método venezolano.

De igual forma, la Tabla 9(a) y 9(b) resumen los resultados del proceso de diseño.

La Figura 3 muestra la estructura de pavimento resultante del diseño.

Tabla 8(a). Diseño patrón. Diseño de pavimento en condición saturada drenada. Método AASHTO.

Estructura de pavimento		Mezcla asfáltica	ZR (%)	So (%)	Po	Pt
Capa	$CBR_{diseño}$	Estabilidad Marshall (lb)				
Sub-rasante (SR)	5 (*)	2000	95	40	4.50	2.00
Sub-base (SB)	15					
Base (B)	26.43					
Capa de suelo						
Capa	$CBR_{diseño}$	n (años)	Condición de drenaje	Exposición a la saturación (%)	N't (e.e)	
Sub-rasante (SR)	5 (*)	20 (**)	Buenas	5	5.6×10^6 (***)	
Sub-base (SB)	15					
Base (B)	26.43					

(*) , (**) y (***) valores asumidos .

Tabla 8(b). Diseño patrón. Diseño de pavimento en condición saturada drenada. Método AASHTO.

Estructura de pavimento		Coeficientes de drenaje (mi)	Números estructurales SNI	Aportes estructurales ai
Capa	MR (psi)			
Sub-rasante (SR)	7500		4.40	
Sub-base (SB)	14437	1.15	3.60	0.087
Base (B)	18838	1.15	3.37	0.086
Carpeta de rodamiento (CR)				0.431
Espesores				
Capa	(plg)	(cm)	Espesor constructivo (cm)	
Sub-base (SB)	4.36	11.07	15	
Base (B)	6	15.24	20	
Carpeta de rodamiento (CR)	7.82	19.86	20	

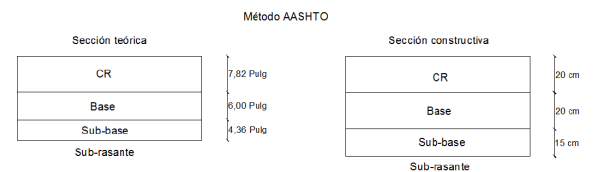


Fig. 3. Diseño patrón. Estructura de pavimento. Método AASHTO.

Tabla 9(a). Diseño patrón. Diseño de pavimento en condición saturada drenada. Método venezolano.

Estructura del pavimento		Mezcla asfáltica	TMAA (°C)	p (%)	n (años)	N't (e.e)
Capa	$CBR_{diseño}$	Estabilidad Marshall (lb)				
Sub-rasante (SR)	5 (*)	2200 (Mezcla tipo VII, penetración CA 60-70)	28	3	20 (**)	5.6×10^6 (***)
Sub-base (SB)	15					
Base (B)	26.43					
Carpeta asfáltica remanente (CAR)		2800 (Mezcla tipo III, penetración CA 60-70)				
Carpeta de rodamiento (CR)						

(*) , (**) y (***) valores asumidos .

Tabla 9.b. Diseño patrón. Diseño de pavimento en condición saturada drenada. Método venezolano.

Estructura del pavimento	Factor regional (Rg)	NEV _i	a _i	Espesores	
				(cm)	Espesor constructivo (cm)
Capa					
Sub-rasante (SR)	1	11.36			
Sub-base (SB)		7.96	0.080	42.5	45
Base (B)		6.69	0.098	12.96	15
Carpeta asfáltica remanente (CAR)			0.342	13.10	15
Carpeta de rodamiento (CR)			0.442	5 (*)	5

(*) valores asumidos.

La Figura 4 muestra la estructura de pavimento resultante del diseño.

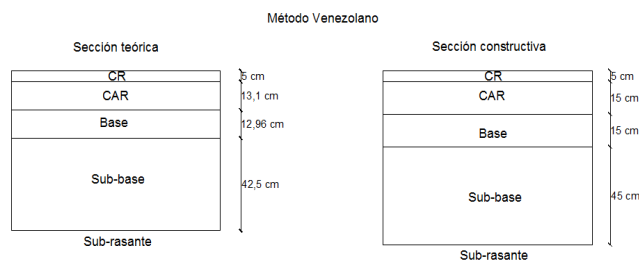


Fig. 4. Diseño patrón. Estructura de pavimento. Método venezolano.

Cabe destacar, que el valor de CBR_{diseño} se puede obtener en laboratorio bajo tres condiciones del material, seco, húmedo o saturado. En esta investigación para el diseño del pavimento denominado diseño patrón, tanto por el método AASHTO como el venezolano, los CBR_{diseño} para las capas que conforman la estructura de pavimento se hallaron utilizando una condición comúnmente considerada desfavorable, como es la condición saturada del material, aunque el mismo no se encontrará durante todo el año en esa condición.

3.3 Estimación de la duración teórica en condición saturada no-drenada.

3.3.1 Método AASHTO.

Finalmente, se estima la duración teórica de un pavimento diseñado considerando que su estructura de base y sub-base prestará servicio en condición saturada drenada, que luego será sometida a una condición saturada no-drenada. La Tabla 10 resume los resultados del proceso de estimación, considerando la combinación de condiciones para el CBR_{diseño} y los coeficientes de drenaje (m_i) buscando la más desfavorable.

Tabla 10. Estimación duración teórica en condición saturada no-drenada. Método AASHTO.

Estructura de pavimento	Espesores en la condición saturada drenada (plg)	CBR diseño	Coefficientes de drenaje (mi)	Módulo resiliente MRi (psi)	Aportes estructurales a _i	Números estructurales SNI
Usando CBR _{diseño} en condición saturada no-drenada y coeficiente de drenaje (mi) en condición saturada no-drenada						
Sub-rasante (SR)		5 (*)		7500		3.67
Sub-base (SB)	4.36	13.57	0.40	13886	0.085	3.52
Base (B)	6	7.33	0.40	11483	0.064	3.37
Carpeta de rodamiento (CR)	7.82				0.431	
Usando CBR _{diseño} en condición saturada no-drenada y coeficiente de drenaje (mi) en condición saturada drenada						
Sub-rasante (SR)		5 (*)		7500		4.23
Sub-base (SB)	4.36	13.57	1.15	13886	0.085	3.81
Base (B)	6	7.33	1.15	11483	0.064	3.37
Carpeta de rodamiento (CR)	7.82				0.431	
Usando CBR _{diseño} en condición saturada drenada y coeficiente de drenaje (mi) en condición saturada no-drenada						
Sub-rasante (SR)		5 (*)		7500		3.72
Sub-base (SB)	4.36	15	0.40	14437	0.087	3.58
Base (B)	6	26.43	0.40	18838	0.086	3.37
Carpeta de rodamiento (CR)	7.82				0.431	
Duración teórica (años)						
Usando CBR _{diseño} en condición saturada no-drenada y coeficiente de drenaje (mi) en condición saturada no-drenada						6.45
Usando CBR _{diseño} en condición saturada no-drenada y coeficiente de drenaje (mi) en condición saturada drenada						16.51
Usando CBR _{diseño} en condición saturada drenada y coeficiente de drenaje (mi) en condición saturada no-drenada						7.13

(*) Valor asumido.

3.3.2 Método venezolano.

Finalmente, se estima la duración teórica de un pavimento diseñado considerando que su estructura de base y sub-base prestará servicio en condición saturada drenada, que luego será sometido a una condición saturada no-drenada. La Tabla 11 resume los resultados del proceso de estimación.

Tabla 11. Estimación duración teórica en condición saturada no-drenada. Método venezolano.

Estructura de pavimento	Espesores en la condición saturada drenada (cm)	Condición saturada no-drenada			
		CBR _{diseño}	Aportes estructurales a _i	Números estructurales NEV _i	Duración Teórica (años)
Sub-rasante (SR)		5 (*)		10.81	14.63
Sub-base (SB)	42.5	13.57	0.078	7.49	
Base (B)	12.96	7.33	0.062	6.69	
Carpeta asfáltica remanente (CAR)	13.10		0.342		
Carpeta de rodamiento (CR)	5(*)		0.442		

(*) Valores asumidos

3.4 Comparación del periodo de diseño en la condición saturada drenada y la duración teórica del pavimento flexible en la condición saturada no-drenada.

En la Tabla 12 se pueden comparar el periodo

de diseño (n) fijado en 20 años para el diseño patrón, donde la estructura de pavimento está sometida a una condición saturada drenada y la duración teórica en tres combinaciones posibles de condiciones entre las cuales figuran: 1. Usando $CBR_{diseño}$ en condición saturada no-drenada y coeficiente de drenaje (m_i) en condición saturada no-drenada, planteamiento inicial de esta investigación, 2. Usando $CBR_{diseño}$ en condición saturada no-drenada y coeficiente de drenaje (m_i) en condición saturada drenada y, 3. Usando $CBR_{diseño}$ en condición saturada drenada y coeficiente de drenaje (m_i) en condición saturada no-drenada; todo esto utilizando los métodos de diseño de espesores AASHTO y venezolano. Evidentemente, el tiempo representado en años disminuye considerablemente cuando la estructura de pavimento diseñada para estar sometida a una condición saturada drenada pasa a ser sometida a cualquiera de las tres combinaciones de condiciones, especialmente cuando es sometida a una condición saturada no-drenada. Para el método AASHTO se produjo una reducción de 49.85% (Ponderación que se hizo al promediar las tres combinaciones de casos mencionados en la Tabla 11) y para el método venezolano una reducción del 26.85%. Estos resultados demuestran de manera teórica el deterioro de la estructura de pavimento por las condiciones de saturación y drenaje desfavorables, especialmente se puede señalar que el porcentaje de reducción de la durabilidad es más marcada en el método AASHTO donde en su procedimiento de diseño de espesores considera las condiciones de drenaje.

Tabla 12. Comparación del periodo de diseño en la condición saturada drenada y la duración teórica del pavimento flexible en la condición saturada no-drenada.

Condición de saturación y drenaje	Tiempo en años	
	Método AASHTO	Método venezolano
Usando $CBR_{diseño}$ en condición saturada no-drenada y coeficiente de drenaje (m_i) en condición saturada no-drenada		
Periodo de diseño (Diseño patrón). Condición saturada drenada	20	20
Duración teórica.	6.45	14.63
Usando $CBR_{diseño}$ en condición saturada no-drenada y coeficiente de drenaje (m_i) en condición saturada drenada		
Periodo de diseño (Diseño patrón). Condición saturada drenada	20	
Duración teórica.	16.51	
Usando $CBR_{diseño}$ en condición saturada drenada y coeficiente de drenaje (m_i) en condición saturada no-drenada		
Periodo de diseño (Diseño patrón). Condición saturada drenada	20	
Duración teórica.	7.13	

4 Conclusiones.

Al analizar el comportamiento de la masa de suelo con presencia de agua en los ensayos de capacidad de soporte californiana (CBR), realizados para las condiciones saturada drenada y saturada no-

drenada y, comparar los resultados, encontramos que el método de diseño de espesores AASHTO toma en consideración las condiciones de saturación y drenaje de las capas de la estructura de pavimento por medio de coeficientes de mayoración, lo cual es el punto focal de esta investigación, lo que permite mayor certeza al estimar la duración teórica del pavimento flexible. Cabe destacar, que este método no considera las condiciones climáticas de cada región o país, más allá de las presentes en el experimento AASHTO original. Sin embargo, en la condición saturada no-drenada los resultados permiten observar el efecto drástico que tiene el agua atrapada en la estructura de pavimento que origina esta condición y en consecuencia el efecto negativo en la duración teórica del pavimento.

De igual forma, el método venezolano se considera rezagado, pues no toma en consideración las condiciones de saturación y drenaje de la estructura de pavimento, viéndose afectado el diseño en la condición saturada no-drenada, obteniéndose resultados negativos en la duración de un pavimento flexible sometido a esta particular condición.

En definitiva, la presencia de agua en la estructura de pavimento es un factor que afecta en un alto grado la duración del mismo, especialmente en la condición donde el agua queda atrapada durante un considerable lapso de tiempo en la estructura, originando la condición saturada no-drenada planteada en esta investigación. Por todo esto, es evidente la necesidad de drenar dicha agua, garantizando que los materiales que conforman esta estructura sean lo más granulares posibles y/o construyendo obras de drenaje que ayuden a esta causa, ya que esta presencia de agua disminuye drásticamente la capacidad portante de los materiales usados en la estructura como base (B) y sub-base (SB).

Dado qué, la condición saturada no-drenada se pudiese producir cuando el agua se quede atrapada en la estructura de pavimento, entre la Sub-rasante (SR) o terreno de fundación de un material con un coeficiente de permeabilidad muy bajo y las capas asfálticas las cuales se consideran impermeables, especialmente en la estación lluviosa y en secciones transversales en terraplén, originando que las cargas del tránsito no se distribuyan de manera eficiente en la estructura, generando esfuerzos que pueden producir asentamientos. Además, una vez que esta condición de saturación y drenaje pase durante la estación de sequía, la estructura de pavimento pudo haber sufrido arrastre de finos lo que generaría asentamiento y hundimientos que se reflejan en la carpeta de rodamiento, afectando la seguridad y comodidad de los usuarios.

De lo antes expuesto, pudiera no asumirse que

las causas del mal estado de un pavimento son debido únicamente a la mala calidad de los materiales de suelo o asfálticos, y/o diseño deficiente de la estructura, pues en realidad la causa posible podría estar en la saturación y deficiente drenaje, por no considerar condiciones extremas de funcionamiento, que con el paso de vehículos pueden generar sub-presiones que destruyen el pavimento con el paso del tiempo, acortando su vida útil.

En conclusión, la presencia de agua atrapada en la estructura de pavimento afecta la capacidad de soporte de los materiales que la conforman, deteriorando sus capas produciendo un gran número de fallas que van en detrimento de la seguridad, comodidad y duración del pavimento.

Recomendaciones:

Considerar en zonas donde la estación lluviosa pueda durar un tiempo considerable, la topografía no permita el drenaje y en especial en construcción de secciones transversales de vía en terraplén; diseñar los pavimentos bajo condición desfavorable saturada no-drenada.

Considerar en estas condiciones desfavorables de drenaje la utilización de materiales de filtro (piedra picada), así como membranas de geotextil a la hora de construir los terraplenes pudiendo encapsular la estructura de pavimento con el geotextil.

Considera la utilización de mezclas suelo-asfalto en la estructura de pavimento. Esta mezcla de suelo con asfalto haría más impermeable las capas de suelo de la estructura de pavimento (Base y Sub-base).

Referencias

- Abu-Eisheh, Abaza Khaled A, Sameer A, 2003, An Optimum Design Approach for Flexible Pavements, *International Journal of Pavement Engineering*, 4:1, 1-11, DOI: 10.1080/1029843031000087464.
- Beskid JM, Martínez R, 2004, Estudio comparativo de los resultados del California Bearing Ratio (CBR) obtenidos en laboratorio y con un penetrómetro dinámico. Maracaibo, Venezuela: Universidad Rafael Urdaneta. Disponible en: <https://es.slideshare.net/edujt2/ensayo-cbr-california-bearing>. [Consulta: 2019, noviembre 25].
- Castaño Martínez F, Herrera Betín J, Gómez Sáenz J, Reyes Lizcano F, 2009, Análisis cualitativo del flujo de agua de infiltración para el control del drenaje de una estructura de pavimento flexible en la ciudad de Bogotá D.C. *Revista especializada Infraestructura Vial*, Volumen 11, Número 22.
- Chávez Hugo, Bustillos William, 2010, Estudio exploratorio del efecto de saturación en el ensayo california (CBR) de campo y laboratorio en el diseño de estructura de pavimento. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería en Construcción.
- Condori B, Pariona L, 2014, Estudio de la resistencia de la sub-base usando experimentos factoriales basados en el contenido de humedad, energía de compactación y la hidratación. Tesis de pregrado. Universidad Nacional del Centro de Perú, Huancayo Perú.
- Corredor G, 2004, Apuntes de pavimentos. Volumen 1. Universidad Santa María, Facultad de Ingeniería. Universidad Católica Andrés Bello, Facultad de Ingeniería. Venezuela.
- Corredor G, 2008, Diseño de nuevos pavimentos por el método AASHTO-93. Instituto venezolano del asfalto (INVEAS).
- Corredor G, 2008, Obtención y manejo de la información de tránsito para diseño de pavimentos. Maestría en Vías Terrestres. Módulo III. Diseño de pavimentos I. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Tecnología de la Construcción. Disponible en: <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/manejo-de-transito-para-diseno-de-pavimentos.pdf>. [Consulta: 2019, julio 6].
- Corredor G, 2008, Experimento Vial de la AASHTO y las Guías de Diseño AASHTO. Maestría en Vías Terrestres. Módulo III. Diseño de pavimentos I. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Tecnología de la Construcción. Disponible en: <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/manejo-de-transito-para-diseno-de-pavimentos.pdf>. [Consulta: 2019, julio 6].
- Delgado Carlos, Cerro Elena, Valera Fernando, 2015, Influencia de la humedad de las capas granulares en la optimización de inversiones para la conservación del patrimonio vial. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil.
- Díaz Rito J, 2016, Análisis de los Procedimientos Constructivos de Bases y Sub-bases granulares para Pavimentos Flexibles. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Facultad de Ingeniería. Ciudad de México. Septiembre 2016. Disponible en: <https://repositorio.unam.mx/contenidos/91374>. [Consulta: 2019, noviembre 27].
- DW Hight, MGH Stevens, 1982, An analysis of the California bearing ratio test in saturated clays. *Geotechnique* 1982 32: 4, Págs. 315-322. Biblioteca virtual de ICE (conocimiento esencial de ingeniería). Disponible en: <https://doi.org/10.1680/geot.1982.32.4.315>.

[Consulta: 2019, noviembre 6].

Gutiérrez Christian, Báez Fernando, Garzón Jessica, 2015, Efectos del flujo del agua superficial y subterránea en la estructura de pavimentos flexibles, Seminario Internacional de Geotecnia Aplicada en Obras de Infraestructura en la Ciudad de Chihuahua-México .Pág. 1-5. Universidad La Gran Colombia, Colombia.

Huang Yang, 1995, Pavement Analysis and Systems. University of Kentucky. Mac Graw International.

INVIAS, 2018, Glosario de términos. Instituto Nacional de Vías. Atención al ciudadano. Gobierno de Colombia. Disponible en: <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/42-servicios-de-informacion-al-ciudadano/glosario>. [Consulta: 2019, noviembre 15]. Ingeniería Real.com (s/f), Método AASHTO para pavimento flexible. Revista de Ingeniería, Arquitectura, Ciencia y Tecnología. Disponible en: <https://ingenieriareal.com/metodo-aashto-para-pavimento-flexible/>

Norma Venezolana COVENIN, Norma de Carreteras (2000:1987), COVENIN Reunión N° 6-87 (84) de fecha 08/12/87. Venezuela.

OEA- Organización de Estados Americanos, 1991, Manual Interamericano para el Control de Tránsito y Carreteras MTC-OEA. XXI Congreso Panamericano De Carreteras Montevideo, Uruguay mayo 1991. Copaca/Res. XXII (XVI/91). Actualización del Manual Interamericano de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras. Disponible en: <https://www.gub.uy/unidad-nacional-seguridad-vial/sites/unidad-nacional-seguridad-vial/files/documentos/publicaciones/Manual%20Interamericano%20de%20Dispositivos%20de%20Control.pdf>

Salamé Luis, Pinaud Andres, Cavajal Arturo, Stalhuth William, Witczak Matthew, 1970, Método de diseño de pavimentos flexibles venezolano. Empresa Ingeniería S.V. C.A. Laboratorio Vial, sección de control de calidad, Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC), República de Venezuela.

Stanton T E, Porter O J, 1929, California Bearing Ratio (CBR). Departamento de Carreteras del Estado de California. Estados Unidos de América.

The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), part 1 specifications, 1986, part 2 Methods of Sampling and Testing, fourteenth edition. Estándar Specifications for The Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing.

Recibido: 08 de diciembre de 2020

Aceptado: 20 de marzo de 2021

Johannes Enrique Briceño Balza: Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería Vial. Profesor Asistente investigador de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela, Departamento de Vías, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Mérida Venezuela.

Johan David Molina Rangel: Ingeniero Civil, Egresado de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: johandavid.m.r@gmail.com.

Luis Angel Sanchez Guerrero: Ingeniero Civil, Egresado de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: gerrero9060@gmail.com.

Víctor Hugo Verjel Tarazona: Ingeniero Civil, Magister en Gestión de Proyectos. Profesor programa de Ingeniería Civil, Universidad de Pamplona, República de Colombia. Correo electrónico: victor.verjel@unipamplona.edu.co

