

Incorporación del Efecto del Clima en el Procedimiento de Diseño de Pavimentos Asfálticos del MTC y AASHTO 93

J. Rafael Menéndez Acurio, Ingeniero Civil CIP 43670, Ph.D.¹
Juan Carlos Barreda Rosado, Ingeniero Civil CIP 86842, MBA²

1. RESUMEN

La presente ponencia tiene por objeto presentar una metodología para incorporar el efecto del clima en la determinación del coeficiente de capa de la carpeta asfáltica en los métodos de diseño del MTC (Ref. 1) y el procedimiento AASHTO 93 (Ref. 2). Actualmente los diseñadores de pavimentos en nuestro medio asumen un valor de coeficiente de capa de 0.42. En algunos casos este valor es obtenido a partir de la relación desarrollada entre la estabilidad Marshall y el coeficiente de capa.

Sin embargo, en proyectos donde las condiciones de clima son complejas como es el caso de proyectos en zonas de altura por encima de los 3500 msnm se debería considerar el efecto climático en la determinación de dicho coeficiente. Por tal motivo es importante tomar en cuenta los cambios de clima a lo largo del día y durante el periodo de diseño para establecer el valor representativo del coeficiente de capa. De igual manera en ciertas zonas donde la temperatura es elevada por periodos prolongados el coeficiente de capa puede ser significativamente menor que el obtenido por la relación directa con los resultados Marshall.

Para poder realizar este tipo de análisis se debe contar con resultados de módulo dinámico de la mezcla a ser colocada y con datos diarios de clima. Si bien es cierto el ensayo de módulo dinámico es complejo y está disponible en muy pocos laboratorios en el Perú, las ventajas de contar con estos resultados superan ampliamente las limitaciones y costo del mismo por lo cual es recomendable en obras importantes que este ensayo sea ejecutado durante el prediseño de la mezcla en la etapa de estudios.

La metodología planteada fue aplicada a dos tramos ubicados en el departamento de Arequipa. El primero de ellos se ubica a una altitud de 4,400 msnm, mientras que el segundo a 2,850 msnm. Se considera una estructura de pavimento similar en ambos casos al igual que los materiales que componen dicho pavimento. Se empleó los resultados del módulo dinámico de una mezcla asfáltica elaborada con PEN 120-150. Los datos de clima corresponden a las estaciones meteorológicas más cercanas a los tramos indicados

Los resultados obtenidos muestran que hay una diferencia de promedios de entre el coeficiente de capa en el tramo 1 y el tramo 2 de cerca del 20% para un mismo tipo de asfalto. Considerando que existe una diferencia de 11°C entre la temperatura media del tramo 1 y del tramo 2. Esta diferencia puede resultar importante cuando se trata de una vía con tráfico pesado. Sin embargo, se debe

¹ Ingeniero Civil, Doctorado en Pavimentos y Master en Geotecnia, Universidad de Texas A&M. Trabaja actualmente en Fugro Roadware Inc., Austin, Texas. Socio fundador de Coniser S.R.Ltda empresa especializada en Pavimentos y Geotecnia. Trabajó en el Instituto de Transportes de Texas A&M, Graña Montero Ingeniería, la Organización Internacional de Trabajo, Provías Nacional, entre otras instituciones. Ha sido docente de maestría de la Universidad Nacional de Ingeniería, así como de otras universidades nacionales tanto en pre grado como post grado. Es autor del libro Ingeniería de Pavimentos, publicado por el ICG.

401 Southwest Pkwy Apt. 202, College Station, TX 77840, USA. Tel. 01.705.9486, 001.979.587.9639, jrmenendez@gmail.com

² Ingeniero Civil, Universidad Nacional de San Agustín, MBA ESAN, Estudios de postgrado en Ingeniería de Transportes UNI. Se ha desempeñado como Jefe de Ingeniería y Coordinador de Estudios en diversos proyectos viales y de infraestructura. Actualmente es Gerente General de la empresa consultora Viena Ingenieros S.A.C. Urb. Los Delfines A-8 Cayma-Arequipa. Tel: (054) 345921, Cel: 959.560.943, RPM: #247815, RPC: 997439344, jbarreda1979@hotmail.com, info@vienaingenieros.com

aclarar que un incremento en el coeficiente de capa no necesariamente conduce a una reducción de espesor de la capa asfáltica puesto que se debe verificar el cumplimiento de los espesores mínimos de acuerdo al tráfico así como otros requerimientos tales como ahuellamiento y área fisurada.

2. ANTECEDENTES

El coeficiente de capa es un “valor índice” de la capacidad estructural de un determinado material. Este parámetro no es directamente una propiedad del material y fue creado por AASHO cuando se ejecutó la pista de pruebas a finales de 1950 e inicio de 1960. En el anexo GG de la guía AASHTO 1993 cuyo segundo volumen fue publicado en una versión anterior en 1986 y no se actualizó para 1993 (Ref. 3) se describe la relación existente entre el módulo resiliente y los coeficientes de capa. Se indica que el coeficiente de capa depende de varios factores entre ellos: el espesor de la capa, el tipo de material, las propiedades del material, la ubicación de la capa, el nivel de tráfico y el criterio de falla. Indicando que los principales factores que lo afectan son el tipo de material y las propiedades de los materiales.

Por lo tanto para poder entender cómo se relaciona el módulo dinámico con el coeficiente de capa se debe conocer previamente las propiedades de los materiales que fueron empleados en la construcción de la pista de pruebas de AASHO (posteriormente adoptó el nombre de AASHTO). A continuación se describen las características de las mezclas asfálticas empleadas en la construcción de la pista de pruebas (Ref. 4):

Tipo de material	Especificación
Cemento asfáltico	PEN 85-100 (valor promedio de las pruebas 91)
Agregado grueso	Piedra triturada caliza
Agregado fino	Arena natural silicea
Filler	Polvo de caliza

La granulometría de la superficie de rodadura y de la capa binder fue la siguiente:

Tabla 1. Granulometría de la carpeta y capa binder de la pista de pruebas AASHO

Tamiz	Superficie de rodadura	Capa binder
1 in.		100
3/4 in.	100	88-100
1/2 in.	86-100	55-86
3/8 in.	70-90	45-72
No. 4	45-70	31-50
No. 10	30-52	19-35
No. 20	22-40	12-26
No. 40	16-30	7-20
No. 80	9-19	4-12
No. 200	3-7	0-6

La mezcla asfáltica fue diseñada mediante el método de Marshall empleando 50 golpes por cara. El contenido asfáltico típico estuvo comprendido entre 4.4 a 5.5% del peso total de la mezcla para la capa binder y la superficie de rodadura respectivamente. El contenido de vacíos en el campo fue de 7.7%.

Van til et al (Ref. 5) realizaron un análisis detallado sobre los factores que están relacionados con los coeficientes de capa. Este informe forma la base del Anexo GG de la guía AASHTO. Dentro de las relaciones desarrolladas las más empleadas son las que vinculan el modulo elástico con el coeficiente de capa y la estabilidad Marshall con dicho coeficiente.

Peter-Davis y Timm (Ref. 6) realizaron un estudio de recalibración del coeficiente de capa de la carpeta asfáltica. Ellos emplearon principalmente los resultados de la pista de prueba del Centro Nacional para la Tecnología de Asfalto en USA-NCAT (Ref. 7). Basados en dichos resultados concluyeron recomendando que el Departamento de Transportes de Alabama (ALDOT) emplee un coeficiente de capa para la mezcla asfáltica en caliente de 0.54 cuando se use el método de diseño AASHTO 93. Este valor es mayor que del 0.44 que se solía recomendar en dicho departamento de transporte.

3. METODOLOGÍA

La metodología planteada comprende la siguiente secuencia de cálculo. Primeramente se realiza el cálculo de la temperatura en la superficie y al interior del pavimento. Seguidamente se aplican estos resultados a la ecuación de la curva maestra del módulo dinámico para obtener los valores horarios de módulo. Posteriormente se calcula el coeficiente de capa de la carpeta. Finalmente se analizan estadísticamente los resultados.

- Temperatura ambiente y velocidad del viento horaria
- Distribución horaria de la temperatura al interior del pavimento
- Curva maestra de la mezcla asfáltica que será empleada en la ejecución del pavimento
- Módulo dinámico horario a diferentes profundidades y módulo dinámico representativo en base al valor ponderado por deformaciones por tracción al interior del pavimento
- Coeficiente de capa correspondiente a cada módulo dinámico representativo horario
- Parámetros estadísticos de los coeficientes de capa en función de la confiabilidad.

3.1 Temperatura ambiente y velocidad del viento horaria

La temperatura al interior del pavimento es necesaria para calcular el valor del módulo dinámico horario. A partir de las temperaturas ambiente medias, máxima y mínima diarias (datos meteorológicos que suelen estar disponibles en SENAMHI), se pueden estimar la temperatura ambiente horaria aproximando el cambio de temperatura a una función continua cíclica de tipo sinusoidal tal como la que se muestra a continuación (Ref. 8, 9):

$$T_t = \left(\frac{T_{m\acute{a}xima} + T_{m\acute{i}nima}}{2} \right) - \left(\frac{T_{m\acute{a}xima} - T_{m\acute{i}nima}}{2} \right) * \text{seno} \left(\frac{2\pi}{24} * (t_d + t_w) \right)$$

Donde: $T_{m\acute{a}xima}$ = temperatura ambiente máxima; $T_{m\acute{i}nima}$ = temperatura ambiente mínima; t_d = hora del día a la que se está efectuando el cálculo; t_w = factor de ajuste para que coincida el tiempo de la temperatura mínima.

El mismo principio se puede aplicar para determinar la variación horaria de la velocidad del viento:

$$V_t = \left(\frac{V_{m\acute{a}xima} + V_{m\acute{i}nima}}{2} \right) - \left(\frac{V_{m\acute{a}xima} - V_{m\acute{i}nima}}{2} \right) * \text{seno} \left(\frac{2\pi}{24} * (V_d + V_w) \right)$$

Donde: $V_{m\acute{a}xima}$ = velocidad máxima del viento; $V_{m\acute{i}nima}$ = velocidad mínima del viento; V_d = hora del día a la que se está efectuando el cálculo; V_w = factor de ajuste para que coincida el tiempo de la velocidad mínima del viento. El factor de ajuste obtenido fue de 2.05.

3.2 Distribución horaria de la temperatura al interior del pavimento

Un aspecto crítico para el cálculo de los esfuerzos por gradiente térmico es la correcta determinación de las temperaturas al interior del pavimento. Este cálculo se deber realizar en incrementos de tiempo cortos, por lo cual el análisis fue realizado cada hora. La temperatura al interior del pavimento depende en gran medida de la radiación solar. Adicionalmente afecta la nubosidad, precipitación pluvial y las características de los materiales que componen el pavimento. Por la complejidad de este fenómeno se está planteando una metodología de cálculo detallada que permita contar con las temperaturas a las cuales estara sometida la estructura del pavimento en especial la carpeta de rodadura.

Este tipo de análisis fue desarrollado inicialmente por Lytton (Ref. 10) quien consolidó en un solo modelo integrado los diferentes modelos del efecto climático en el pavimento que estaban disponible en ese momento (Ref. 11). Posteriormente, luego de varias modificaciones y actualizaciones se denominó el modelo climático integrado mejorado par el diseño de pavimentos EICM (Ref. 12, 13) . Este modelo forma parte del nuevo programa de diseño de pavimentos de AASHTO denominado AASHTOWare Pavement ME Design (Ref. 14)

El problema para el presente trabajo es resuelto en dos etapas. La primera etapa comprende el cálculo de la temperatura en la superficie del pavimento resolviendo el balance de energía en la superficie. La segunda etapa es el cálculo de la temperatura al interior del pavimento que se obtiene resolviendo la ecuación de conducción de calor.

3.2.1 Balance de energía

La temperatura en la superficie del pavimento es una interacción compleja entre el aire, el material, la radiación solar y eventualmente el agua que pueda estar presente. En el cálculo de la temperatura en la superficie se debe considerar la radiación solar incidente de onda corta; la radiación térmica y de onda larga entre la superficie del pavimento y el ambiente; la convección libre y forzada; y el flujo al interior del pavimento, tal como se muestra en la siguiente figura (Ref. 15).

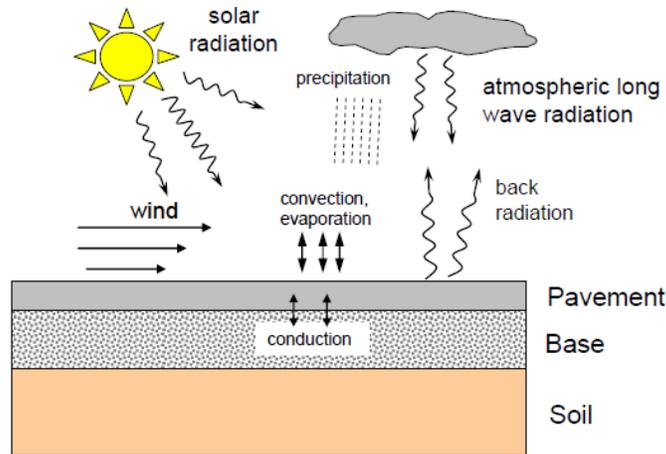


Figura 1. Balance de energía en la superficie del pavimento

El modelamiento preciso de este fenómeno es complejo, para la presente ponencia se han introducido algunas simplificaciones. La primera es considerar que los bordes laterales y el fondo del pavimento tienen una condición adiabática (sin intercambio de calor). De tal forma que el flujo de calor solo se producirá desde y hacia la superficie. Otra simplificación introducida es la de resolver la ecuación diferencial de flujo por diferencias finitas considerando un incremento de tiempo de 1 hora. El balance de energía en la superficie se describe mediante la siguiente expresión (Ref. 10, 16):

$$q_i - q_r + q_a - q_e \pm q_c \pm q_g \pm q_h \pm q_u \pm q_m \pm q_l = 0$$

Donde: q_i = energía incidente de la radiación solar directa (radiación de onda corta); q_r = energía reflejada por la superficie de la tierra (radiación de onda corta); q_a = energía absorbida de la radiación difusa, dispersa desde la atmósfera (radiación de onda larga); q_e = energía emitida por la tierra (radiación de onda larga); q_c = energía transferida desde o hacia el elemento como resultado de la convección; q_g = energía transferida desde o hacia el elemento como resultado de la conducción; q_h = energía por la transpiración condensación, evaporación y sublimación del agua; q_u = conducción dentro del aire; q_m = flujo de masa hacia la superficie (precipitación); q_l = infiltración de humedad dentro del suelo.

Aquellos componentes de la ecuación anterior que son positivos significan que conducen calor hacia la superficie y lo contrario. Aquellos que pueden tener flujo en ambas direcciones se muestran con ambos signos. Siendo que la conductividad térmica del aire es muy pequeña por lo tanto la conducción dentro del aire (q_u) no es considerada, de igual manera si se considera que el pavimento es prácticamente impermeable se puede dejar de considerar el componente de calor por infiltración de humedad (q_l). Adicionalmente se considera que q_s es la radiación neta de onda corta ($q_i - q_r$) y que q_l es la radiación neta de onda larga ($q_a - q_e$). A continuación se desarrollan las expresiones para cada uno de los componentes de la expresión anterior:

- a). Radiación solar neta de onda corta ($q_s = q_i - q_r$)

Es la radiación neta que es absorbida por la superficie del pavimento y se expresa como:

$$q_s = \alpha R_i = \alpha R_n \cos(i) = \alpha R_o \tau_\alpha^m \cos(i)$$

Donde: α = coeficiente de absorción superficial de la radiación solar; R_i = radiación solar incidente en la superficie del pavimento; R_n = energía radiante incidente en la superficie ubicada en un plano normal a la dirección de los rayos solares; i = ángulo entre la normal de la superficie y la dirección de la radiación (ángulo del zenith); R_o = constante solar, $R_o = G_{sc} E_0$; m = masa relativa de aire, definida como la relación entre la longitud actual de la trayectoria y la longitud más corta posible; τ_α =coeficiente de transmisión por unidad de masa de aire (varia de 0.62 a 0.81).

b). Radiación solar neta de onda larga ($q_l = q_a - q_e$)

La radiación es la transferencia de calor entre dos cuerpos. Se suele asumir que el intercambio de energía de radiación solo se produce en la superficie de un cuerpo. La cantidad de energía emitida o absorbida por el cuerpo es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta de ese cuerpo. La constante de proporcionalidad es denominada constante de Stefan-Boltzman. Siendo que ningún objeto emite o absorbe la radiación perfectamente se deben considerar factores de absorción y emisividad. La radiación solar de onda larga resulta de la diferencia en la radiación de onda larga saliente (q_e) y la radiación que es absorbida por la superficie del pavimento (q_a).

$$q_l = q_a - q_e$$

$$q_a = \varepsilon_a \sigma T_{air}^4$$

$$q_e = \varepsilon \sigma T_s^4 \left[1 - \frac{N \bar{W}}{100} \right]$$

Donde: σ = constante de Stefan-Boltzman= $5.68 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{K}^{-4}$); ε_a = factor de absorpsividad de la superficie del pavimento y la cantidad de nubes, $\left[G - \frac{J}{10\rho P} \right]$; T_{aire} = temperatura del aire en $^\circ\text{K}$ a 2 m de la superficie; ρ = presión de vapor que varía entre 1 a 10 mm Hg; G, J y P = constantes que adoptan los valores de 0.77, 0.28 y 0.074 respectivamente; ε = coeficiente de emisividad del material que adopta un valor típico de 0.93, $\varepsilon = 0.787 + 0.764 \ln(T_{dew}/273) F_{cloud}$ (Ref. 17); T_s = temperatura de la superficie; T_{dew} = es la temperatura del punto de rocío $T_{dew} = \sqrt[8]{H/100(112 + 0.9T_{air}) + (0.1 T_{air})} - 112$ (T_{air} en grados Celsius); F_{cloud} = factor de cobertura de nubes, $F_{cloud} = 1.0 + 0.024N - 0.0035N^2 + 0.00028N^3$; N =factor de nubosidad en décimas (varia de 0.0 a 1.0 adoptando el valor de 0.90 a 0.8 para nubes a una altitud entre 305 a 1380m); \bar{W} = cobertura de las nubes en promedio en el día o la noche, $\bar{W} = 1 - S$.

c). Energía de conducción:

Es la energía absorbida por el pavimento.

$$q_g = -k \frac{T_d - T_s}{d}$$

Donde: k = conductividad térmica; T_d = temperatura a una profundidad d , para efectos prácticos se considera a una profundidad de 8 m y la temperatura es constante e igual a la temperatura media anual más 1 o 2°C (Ref. 18); T_s = temperatura de la superficie; d = profundidad.

d). Energía de convección:

Es la energía de la transferencia de calor entre la superficie sólida (pavimento) y un fluido (aire) debido a la convección libre y forzada, se calcula con la siguiente expresión.

$$q_c = h_c (T_{aire} - T_s)$$

Donde: h_c = coeficiente de convección superficial de calor, $h_c = 698.24 [0.00144 T_m^{0.3} U^{0.7} + 0.00097 Abs(T_s - T_{aire})^{0.3}]$; T_m = temperatura promedio entre el aire y la superficie, °K; U = velocidad promedio diaria del viento en m/s; T_s = temperatura de la superficie del pavimento; T_{aire} = temperatura del aire.

e). Energía de evaporación y flujo de energía por lluvia (q_h)

Para efectos del cálculo solo se considera la energía de evaporación (Ref. 15) y a la energía por lluvia. Se considera que el agua de lluvia es drenada rápidamente y solamente se forma una lámina de agua (Ref. 19)

$$q_h = q_{evap} + q_l$$

$$q_{evap} = h_{fg} m_w''$$

$$q_l = 3.6 \times 10^{-6} \nu \gamma_w c_{p,w} (T_{lluvia} - T_s)$$

Donde: h_{fg} = calor latente de vaporización, $h_{fg} = 2.501 \times 10^6 - 2370 T_w$; T_w = temperatura del agua; m_w'' = masa del flujo de agua, $m_w'' = h_d (w_{air} - w_s)$; h_d = coeficiente de transferencia de masa; T_s = temperatura en la superficie en °K; q_l = flujo de calor debido a la lluvia (W/m²); ν = precipitación pluvial (mm/hr); γ_w = densidad del agua de lluvia (kg/m³); $c_{p,w}$ = capacidad específica de calor del agua evaluado a la temperatura de la película pavimento-agua; T_{lluvia} = temperatura de la lluvia, para el cálculo se asume igual a la temperatura ambiente; T_s = temperatura en la superficie

3.2.2 Temperatura en la superficie del pavimento

Siendo que la temperatura que interesa conocer en la superficie del pavimento se considera que esta como temperatura de equilibrio y por lo tanto el flujo neto de calor (q_{neto}) es cero. La energía absorbida de la radiación terrestre también se considera igual a cero en la superficie del pavimento.

$$q_s + q_a - q_c - q_k - q_r - q_h = 0$$

Remplazando las ecuaciones y constantes se obtiene la siguiente ecuación final:

$$422 \alpha \tau_{\alpha}^{1/\cos(z)} \cos(z) + \varepsilon_a \sigma T_{air}^4 - \varepsilon \sigma T_s^4 \left[1 - \frac{N \bar{W}}{100} \right] - h_c (T_s - T_{aire}) - k \frac{T_d - T_s}{d} - h_{fg} h_d (w_{air} - w_s) - 15.0678 v (T_{lluvia} - T_s) = 0$$

Se forma una ecuación de cuarto grado que requiere para ser resuelta suponer el diferencial de temperatura que existirá entre la superficie y un punto al interior del pavimento. De acuerdo a la bibliográfica se conoce que el diferencial de temperatura suele ser de entre 1.1 a 2.2°C/cm de profundidad (5 a 10 °F/pulgada de profundidad) (Ref. 16). La ecuación fue resuelta por iteraciones aplicando en método de Newton Raphson donde:

$$T_{s,n+1} = T_{s,n} - \frac{f(T_{s,n})}{f'(T_{s,n})}$$

Donde: $f(T_{s,n})$ = balance de energía en la superficie del pavimento en función de la temperatura superficial T_s para el periodo de tiempo n

En el siguiente cuadro se resumen las constantes que se aplicaran para el cálculo de la temperatura en la superficie del pavimento.

Tabla 2. Valores adoptados para las constantes para el cálculo de la temperatura en el pavimento

Denominación	símbolo	Valor adoptado
Absorción superficial de la radiación solar	α	1.1 zonas de altura
Coefficiente de transmisión por unidad de masa de aire	τ_{α}	0.81 (clima despejado)
Constante Solar	G_{sc}	1367 W/m ²
Coefficiente de radiación atmosférica	ε_a	0.70
Constante de Stefan-Boltzman	σ	5.68x10 ⁻⁸ W (m ² °K ⁴)
Constante	G	0.77
Constante	J	0.28
Constante	P	0.074
Constante	c	850 (J/kg.K)
Conductividad térmica	k	1.38 W/m ²
Emisividad térmica	ε	0.93
Coefficiente de transferencia superficial de calor	h_c	W/m ² °C

3.2.3 Temperatura al interior del pavimento

La conductividad térmica es descrita por la ley de Fourier, la cual indica que el flujo de calor en una determinada dirección, q_z es proporcional al gradiente térmico, $\partial T / \partial z$ (cambio en la temperatura con respecto al cambio en la profundidad). La constante de proporcionalidad, k se denomina conductividad térmica. El flujo uniforme de calor en una dimensión se describe mediante la siguiente ecuación:

$$q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z}$$

El signo negativo se debe a que el calor fluye hacia la dirección donde se reduce la temperatura. La ecuación puede ser simplificada si se asume un flujo constante de calor:

$$\frac{\partial q_z}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0$$

Si se asume que la conductividad térmica es constante y si se trata de un flujo transitorio de calor se debe incorporar al análisis dos propiedades térmicas adicionales. El calor específico a presión constante, c , que es una medida de la capacidad de almacenar calor. La difusividad térmica, α , que es una medida de la velocidad de propagación del calor. Por lo tanto el flujo transitorio de calor se puede representar mediante la siguiente expresión:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\gamma c}{k} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Para resolver la ecuación diferencial mostrada se empleó el método de diferencias finitas que simplifica el proceso de cálculo. Por lo tanto se procede a definir el incremento de tiempo Δt y el incremento de profundidad para el análisis Δz para que el valor de $\frac{\Delta t}{\Delta z^2}$ sea bajo. Para el análisis se estimó un incremento de profundidad de 2 cm y un incremento de tiempo de 1 hora, y el análisis se realizó para un periodo de 10 años. La expresión para calcular la variación de la temperatura en cada periodo de tiempo es la siguiente:

$$T_i^{t+1} = \frac{k}{\gamma c} \frac{\Delta t}{\Delta z^2} (T_{i+1}^t + T_{i-1}^t) + \left(1 - 2 \frac{k}{\gamma c} \frac{\Delta t}{\Delta z^2} \right) T_i^t$$

Para las interfaces entre capas se aplicó la siguiente expresión (Ref. 15):

$$T_i^{t+1} = \frac{\Delta t}{\Delta z^2} \left(\frac{k}{\gamma c} \Big|_{\text{capa2}} T_{i+1}^t + \frac{k}{\gamma c} \Big|_{\text{capa1}} T_{i-1}^t \right) + \left(1 - \frac{k}{\gamma c} \frac{\Delta t}{\Delta z^2} \Big|_{\text{capa1}} - \frac{k}{\gamma c} \frac{\Delta t}{\Delta z^2} \Big|_{\text{capa2}} \right) T_i^t$$

Donde: T_i^{t+1} = temperatura en el nodo i y en el tiempo $t + 1$; Δt = incremento de tiempo (1 hora); Δz = incremento de la profundidad (2 cm); k = conductividad térmica de la capa; γ = densidad del material; c = calor específico de la masa del material.

Las propiedades de los materiales componentes de la estructura del pavimento se muestran en el siguiente cuadro. De igual manera se presenta los valores considerados para el incremento de profundidad y el incremento de tiempo.

Tabla 3. Propiedades térmicas y del modelo incremental

Propiedad	carpeta	base	sub base	sub rasante
Conductividad térmica k	1.45	1.2	1.2	1
Densidad γ (gr/cm ³)	2.4	2.2	2.1	1.9
c	0.55	0.8	0.8	1.2
$k/\gamma c$ (m ² /h)	0.004	0.002	0.003	0.002

Propiedad	carpeta	base	sub base	sub rasante
Δz	0.200	0.200	0.200	0.200
Δt	1.000	1.000	1.000	1.000
$(\Delta t / \Delta z^2)$	25.0	25.0	25.0	25.0
$k / \gamma c^* (\Delta t / \Delta z^2)$	0.099	0.061	0.064	0.039

3.3 Módulo dinámico horario a diferentes profundidades y módulo dinámico representativo

El módulo dinámico se obtiene en laboratorio, y con los resultados se calculan los parámetros que describen la ecuación sigmoideal de la curva maestra de acuerdo a la siguiente expresión.

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma (\log t_r)}}$$

Donde: E^* = módulo dinámico; t_r = tiempo de carga a la temperatura de referencia, s; $\delta, \alpha, \beta, \gamma$ = parámetros de ajuste para un determinado grupo de resultados; δ = valor mínimo de $|E^*|$; $\delta + \alpha$ = valor máximo de $|E^*|$.

Los parámetros de ajuste δ y α dependen de la gradación del agregado, el contenido de asfalto, y el contenido de vacíos. Los parámetros de ajuste β y γ dependen de las características del asfalto y de la magnitud de δ y α . La función sigmoideal describe la dependencia del tiempo del módulo dinámico a una determinada temperatura de referencia. Los factores de desplazamiento describen la relación entre el módulo y la temperatura y tienen la siguiente ecuación general.

$$t_r = \frac{t}{a(T)}$$

$$\log(t_r) = \log(t) - \log[a(T)]$$

Donde: t_r = tiempo de carga a la temperatura de referencia; t = tiempo de carga a la temperatura de interés; $a(T)$ = factor de desplazamiento como función de la temperatura $\log a(T) = aT^2 + bT + c$; T = temperatura de interés; a, b y c = parámetros de ajuste.

La frecuencia de carga se calcula en función de la velocidad de circulación, espesor de la capas y módulos elásticos. Para lo cual se sigue el siguiente procedimiento (Ref. 20) donde la profundidad efectiva es calculada mediante la expresión de Odemark (Ref. 21). Juntando ambos conceptos se puede obtener una expresión que relaciona la frecuencia con la velocidad de circulación y las características de la vía proyectada.

$$f = \frac{17.6 v_s}{2 \left(a_c + \sum_{i=1}^{n-1} \left[h_i^3 \sqrt{\frac{E_i}{E_{SG}}} \right] + h_n^3 \sqrt{\frac{E_n}{E_{SG}}} \right)}$$

Donde: h_n = espesor de la capa donde se requiere hacer el cálculo; h_i = profundidad de la capa i ; E_i = módulo elástico de la capa i ; E_{SG} = módulo de la subrasante; E_n = módulo de la capa de interés; L_{eff} = longitud efectiva del pulso de la carga; a_c = radio del área de contacto del neumático; v_s = velocidad del vehículo, mph; t = tiempo del pulso de carga; f = frecuencia del pulso de carga.

Luego se calculó el módulo dinámico a cinco profundidades diferentes (20 mm, 40 mm, 60 mm y 80 mm). Posteriormente aplicando el programa Kenlayer (Ref. 22) se obtuvieron las deformaciones por tensión en cada profundidad indicada para un eje simple dual de 18 kips con presión de inflado de 85 psi. Luego se calculó el módulo dinámico como el promedio ponderado por las deformaciones por tensión en la carpeta.

3.4 Coeficiente de capa correspondiente a cada módulo dinámico representativo horario

En el método AASHTO 93 el coeficiente de capa de la carpeta es obtenido a partir de una relación gráfica que se muestra en la Figura 1 (Ref. 2, 5). Los valores de coeficiente de capa han sido limitados al rango de 0.20 a 0.464 /pulg. Esta figura forma parte de la guía de diseño de AASHTO 93, en el caso de la guía del MTC (Ref. 1) se indica que el valor del coeficiente de capa o estructural para una carpeta asfáltica en caliente con un módulo de 2,965 MPa (430,000 psis) a 20°C (68°F) es de 0.17/cm (0.43/pulg).

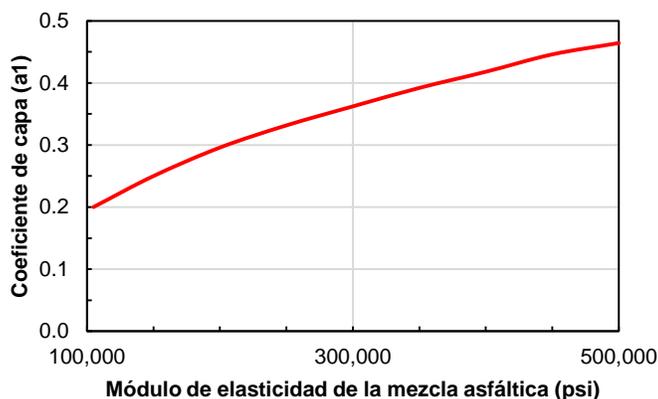


Figura 2. Relación entre módulo de elasticidad y coeficiente de capa (Ref. 5)

3.5 Parámetros estadísticos de los coeficientes de capa en función de la confiabilidad.

Se determina la distribución de resultados para un año representativo de análisis. Dependiendo del criterio del diseñador puede ser este el valor promedio de los resultados obtenidos o el valor a un determinado nivel de confiabilidad. Para mantener consistencia con el método AASHTO 93 se debe considerar el promedio de los valores.

4. RESULTADOS

La metodología planteada ha sido aplicada a dos tramos de carretera ambos ubicados en el departamento de Arequipa. El primero de ellos se encuentra en una zona alto andina a 4,400 msnm (tramo 1), mientras que el segundo en una zona cercana a la ciudad de Arequipa a una altitud de 2,850 msnm (Tramo 2). La estructura supuesta en ambos caos está compuesta por una capa de rodadura de 11.5 cm, base granular de 15 cm y sub base granular de 25 cm. La temperatura ambiental y la velocidad del viento fueron obtenidas de los datos horarios máximos y mínimos durante un año promedio de un periodo de 5 años.

4.1 Temperatura horaria

El punto de partida para el cálculo de la temperatura en la superficie es determinar la ubicación del plano de análisis para poder determinar la posición del sol con respecto a este plano cada hora durante los 365 del año que se realizará el análisis para ambas ubicaciones.

El factor de ajuste aplicado fue de 4.02 el que da el menor valor de error. La siguiente figura muestra una fracción del total de información analizada y se puede apreciar que existe una muy buena congruencia entre los datos medidos horariamente y los obtenidos mediante el modelo previamente mostrado.

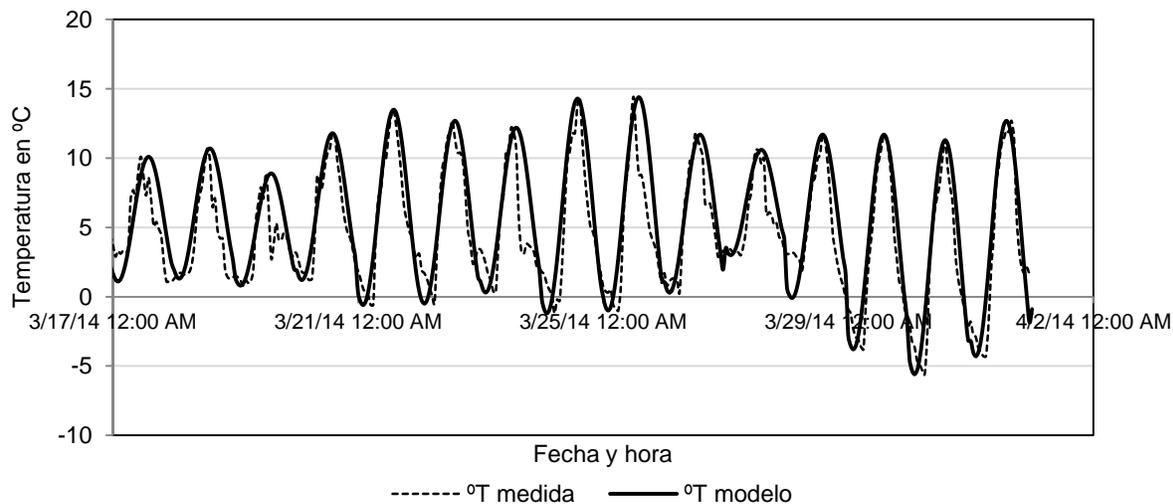


Figura 3. Comparación entre la temperatura ambiente horaria medida y la calculada para el tramo 1

En el siguiente gráfico se presenta la comparación entre las mediciones horarias de la velocidad del viento y las obtenidas mediante la expresión sinusoidal ajustada. Se aprecia que existe una buena consistencia entre la expresión y los datos medidos.

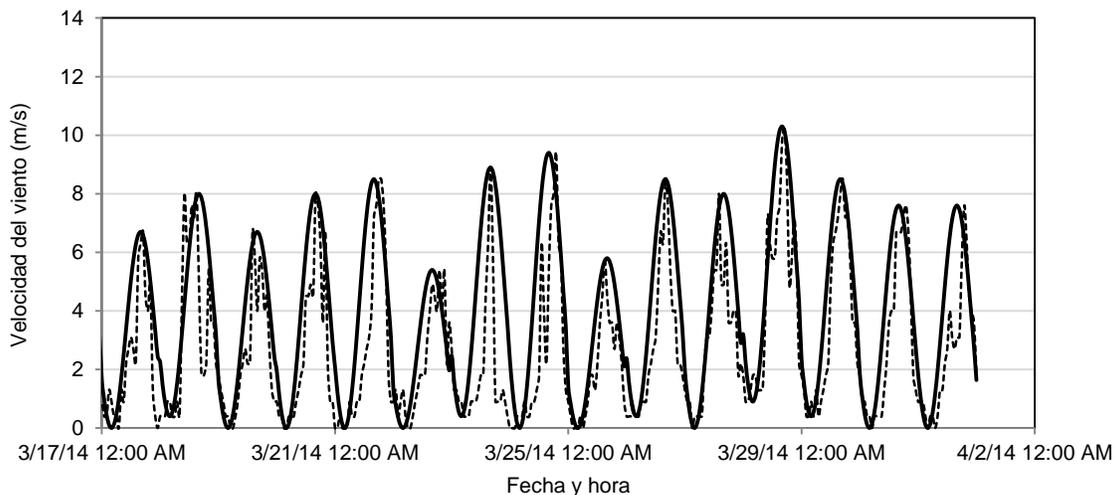


Figura 4. Comparación entre la velocidad del viento horaria medida y la calculada para el tramo 1

Luego de resolver la ecuación de balance de energía en la superficie del pavimento se obtuvo la temperatura en la superficie del pavimento. Luego aplicando la ley de difusividad térmica se obtuvo el perfil de temperatura en toda la profundidad de la estructura del pavimento. Este cálculo se repite para cada hora durante un año completo. En la siguiente figura se presentan los resultados de las energías para dos días completos de análisis del tramo 1. La de mayor incidencia es la energía por radiación solar mientras que la de menor incidencia es la radiación solar de onda larga.

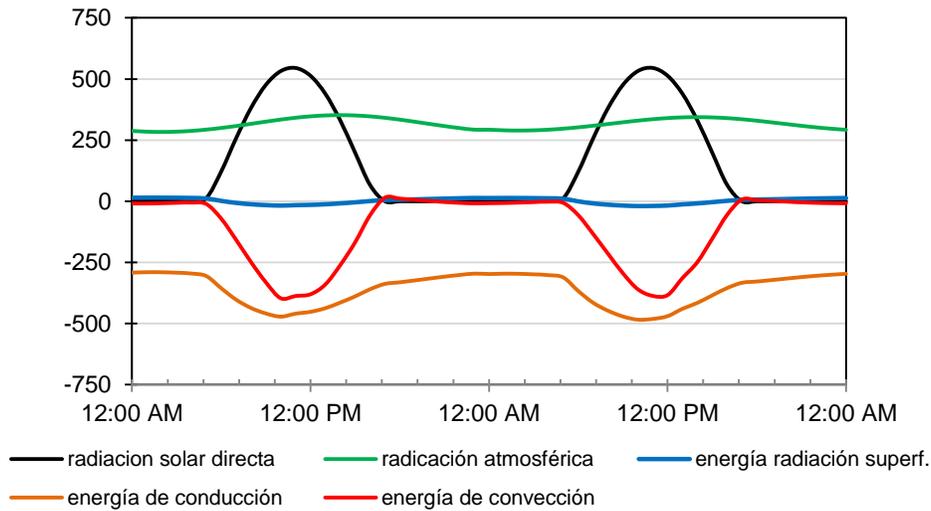


Figura 5. Balance de energía en la superficie del pavimento para el tramo 1

En la siguiente figura se presentan las temperaturas a lo largo del año tanto del aire como a nivel superficial del pavimento. Se puede apreciar que como es de esperar la temperatura en la superficie del pavimento es mayor que del aire y que es aproximadamente paralela a esta con una diferencia para el tramo 1 de 6 a 8 grados. En el caso del tramo 1 las estaciones son más marcadas siendo evidente la baja temperatura en los meses de mayo a agosto. Mientras que en el tramo 2 las temperaturas son más estables a lo largo del año y la diferencia entre la temperatura del aire y del pavimento está entre 4 y 8 grados.

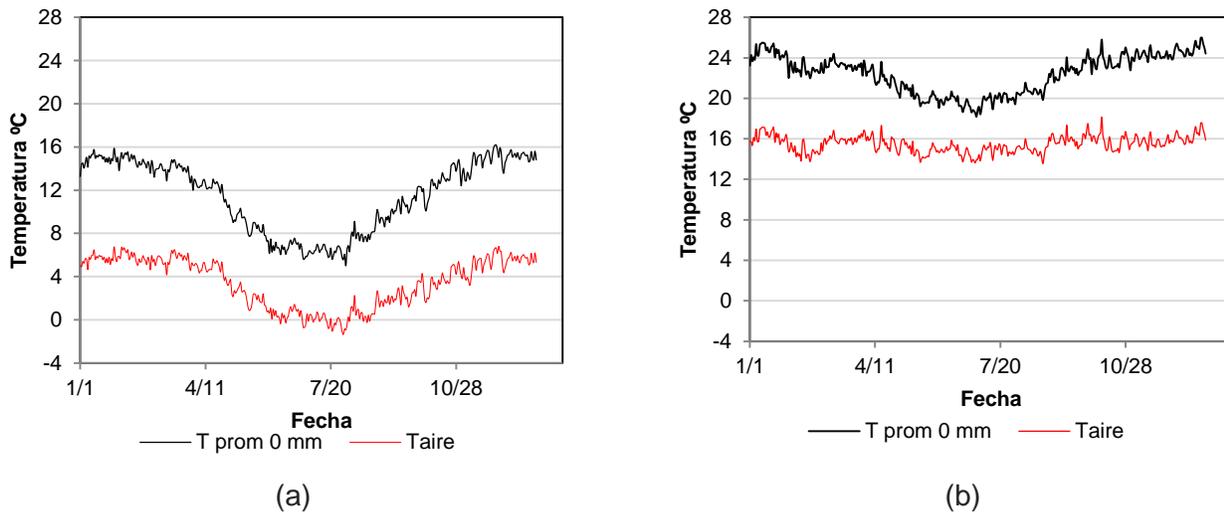


Figura 6. Temperatura del aire y de la superficie del pavimento, (a) Tramo 1, (b) Tramo 2

En la siguiente figura se muestra la variación de la temperatura con respecto a la profundidad para 6 momentos a lo largo de un día. Para el tramo 1 la temperatura superficial oscila de -8°C a 35°C . Mientras que para el tramo 2 la temperatura varía de 10° a 42°C . Siendo claro que los gradientes térmicos son considerablemente mayores para el tramo 1.

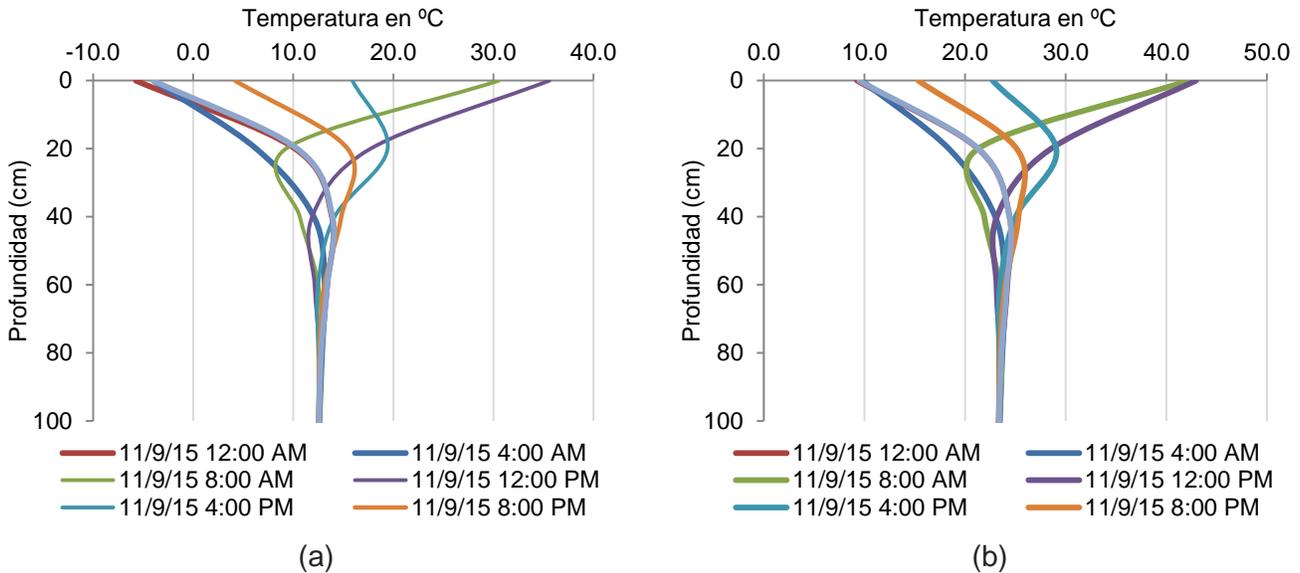


Figura 7. Distribución de la temperatura al interior del pavimento para el día 11/09, (a) Tramo 1, (b) Tramo 2

4.2 Módulo dinámico

En la siguiente figura se presentan los resultados de laboratorio así como la curva maestra tanto para frecuencia reducida como tiempo reducido. Este ensayo fue ejecutado en una mezcla tipo MAC-1 del MTC (Ref. 23) con un cemento asfáltico PEN 120-150. Las proporciones óptimas de la mezcla fueron obtenidas mediante el método Marshall.

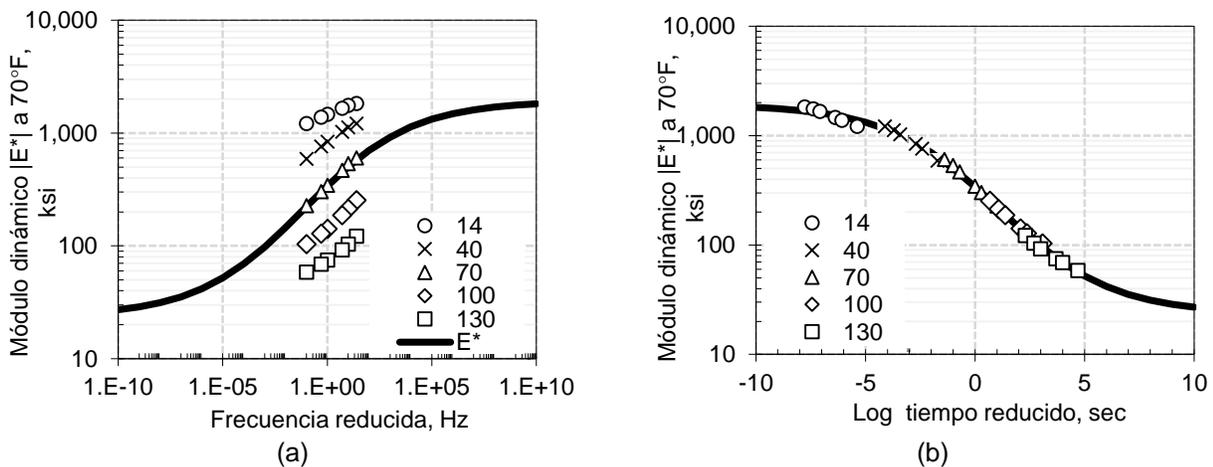


Figura 8. Curva maestra del módulo dinámico graficado contra la frecuencia reducida y log tiempo reducido

Con los datos de laboratorio, se aplicó el procedimiento descrito líneas arriba para calcular los parámetros de la ecuación sigmoïdal. Estos se obtuvieron en Excel® empleando la función Solver, para minimizar las diferencias entre el modelo y los datos medidos.

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log t_r)}} = 1.3762 + \frac{1.70}{1 + e^{-0.4296 + 0.3917(\log t_r)}}$$

La frecuencia de carga fue calculada para la estructura descrita y una velocidad de los vehículos de 30 km/h. Conociendo el perfil de temperaturas se calculó el valor horario del módulo dinámico del concreto asfáltico a diferentes profundidades (20 mm, 40 mm, 80 mm y 100 mm) tal como se aprecia en la figura 4.

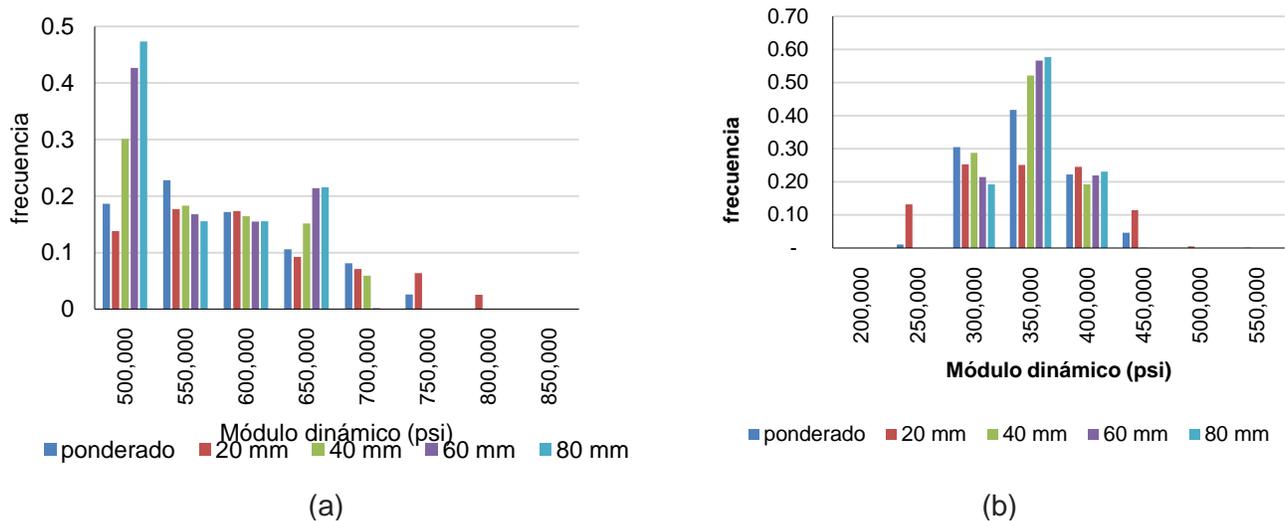


Figura 9. Distribución de frecuencias de E* para diferentes profundidades, (a) tramo 1, (b) tramo 2

En la figura anterior se puede apreciar que se presenta una diferencia importante entre el rango de valores de módulo dinámico del tramo 1 y del tramo 2.

4.3 Coeficiente capa

En base a los resultados obtenidos mediante la relación indicada en el punto anterior se puede obtener los coeficientes de capa cada hora a lo largo de todo el año. La siguiente figura muestra los resultados obtenidos para el tramo 1 y 2. El rango de variación en el tramo 1 es significativamente mayor que el del tramo 2. Se aprecia que en los meses donde se presenta la menor temperatura, como es de esperar el coeficiente de capa es mayor debido a la rigidización de la carpeta a bajas temperaturas.

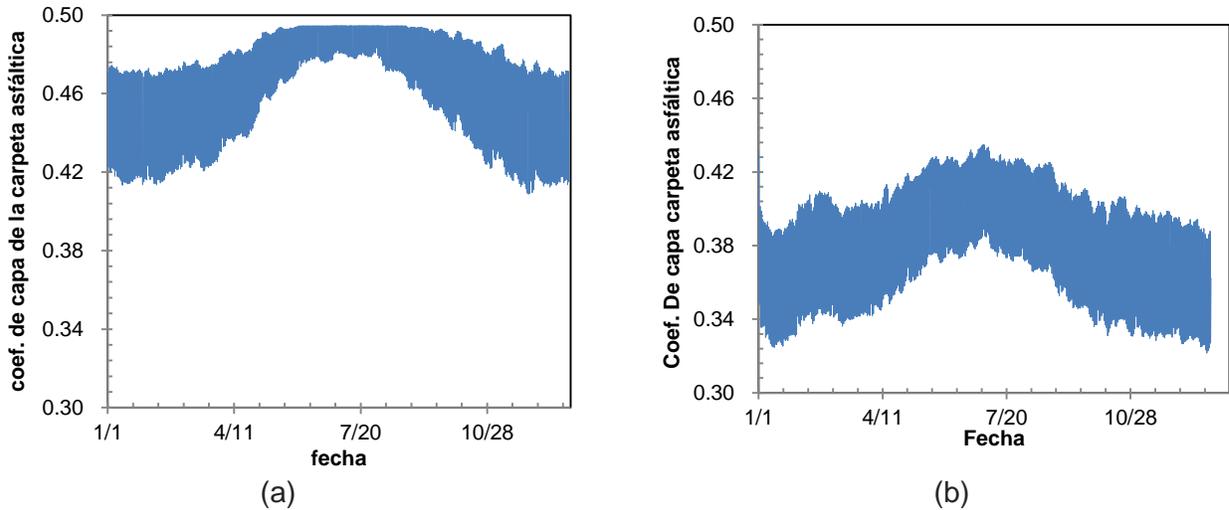


Figura 10. Variación horaria del coeficiente de capa, (a) Tramo 1, (b) Tramo 2

Con los resultados obtenidos se procedió a analizar la distribución de frecuencias (PDF) y la distribución acumulada de frecuencias (CDF) que se presentan en la siguiente figura. En el tramo 1 debido a que se restringió el valor máximo en 0.46 (el mayor valor mostrado en el gráfico de AASHTO) los resultados se concentran en el rango de 0.45 a 0.48. Mientras que para el tramo 2 hay una mayor concentración de resultados en el rango de 0.38 a 0.40.

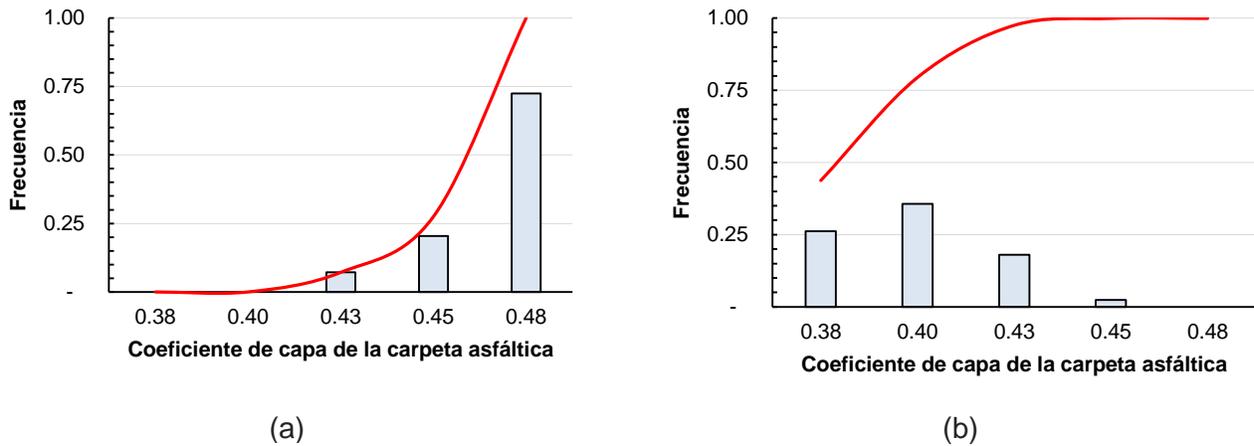


Figura 11. Distribución de frecuencias PDF y CDF del coeficiente de capa, (a) Tramo 1, (b) Tramo 2

Con la distribución de frecuencias mostrada el diseñador puede definir qué valor desea emplear en el diseño que corresponda al nivel de confiabilidad que desea alcanzar. A mayor confiabilidad esperada menor debe ser el valor de coeficiente de capa. En la siguiente tabla se resumen los parámetros estadísticos de los valores de coeficiente de capa para ambos tramos.

Tabla 4. Parámetros estadísticos

Parámetro	Tramo 1	Tramo 2
Mínimo	0.409	0.322
Máximo	0.464	0.435
Promedio	0.455	0.378
Desv. Estándar	0.014	0.025
Coef. Variación	3.19%	6.72%

5. CONCLUSIONES

- El método de diseño de pavimentos AASHTO 93{{57 AASHTO 1993}} y MTC {{686 MTC 2014}} emplean el coeficiente de capa como una forma indirecta de caracterizar las propiedades mecánicas de los materiales.
- En el Perú se suele asignar un valor de coeficiente de capa de la carpeta único sin tomar en cuenta la influencia de las características de la mezcla, cargas actuantes y clima. Las características de clima y topografía del Perú son complejas por lo tanto las condiciones climatológicas deben ser consideradas al momento de determinar el valor representativo del coeficiente de capa tomando en cuenta que la mezcla asfáltica es un material viscoelástico dependiente de la temperatura y frecuencia de carga.
- El cálculo de la temperatura al interior del pavimento es un procedimiento complejo que implica resolver el balance de energía en la superficie. Este procedimiento se emplea actualmente en los modelos climáticos del MEPDG denominados EICM. Luego de calcular las temperaturas al interior del pavimento se calcula el valor de módulo dinámico a diferentes profundidades y luego el valor promedio ponderado. El procedimiento se repite para cada hora durante un año.
- Se aplicó la metodología desarrollada en el presente trabajo a dos tramos ubicados en el departamento de Arequipa. El primero a 4,400 msnm mientras que el segundo a 2,850 msnm. Con la información climática disponible en las estaciones cercanas se calcularon las temperaturas diarias como resultado del promedio de los últimos cinco años. En base a la temperatura máxima y mínima diaria se calculó la distribución de temperaturas al interior del pavimento de forma horaria durante un año completo.
- A partir de los resultados de módulo dinámico obtenidos en laboratorio para una mezcla asfáltica elaborada con cemento asfáltico PEN 120-150 se obtuvo la curva maestra. Conociendo las temperaturas al interior de la carpeta, las frecuencias de carga y las deformaciones por tensión a diferentes profundidades se calculó el promedio ponderado del módulo dinámico de la mezcla. Dicho valor se relacionó con el coeficiente de capa para ambos tramos y para cada hora durante un año.
- El valor promedio del coeficiente de la capa asfáltica para el tramo 1 fue de 0.455 mientras que para el tramo 2 fue de 0.378. Se debe notar que en ambos casos se empleó una sola curva maestra. Sin embargo, en condiciones reales de diseño para el tramo 2 se tendría que analizar si el cemento asfáltico PEN 120-150 es adecuado o más bien debe ser empleado uno de tipo PEN 85-100.
- Se debe indicar que el incremento en el coeficiente de capa no necesariamente conduce a una reducción de espesor de la capa asfáltica puesto que se debe verificar el cumplimiento de los espesores mínimos de acuerdo al tráfico así como otros requerimientos tales como ahuellamiento y área fisurada.
- El aporte de este trabajo es mostrar el procedimiento racional a fin de sustentar el empleo de determinado coeficiente de capa cuando se cuenta con información del módulo dinámico de laboratorio y las condiciones climáticas del tramo.

6. REFERENCIAS

- [1] MTC. Sección De Suelos y Pavimentos, R.D.Nº10-2014-MTC/14. Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, Lima, Perú, 2014, Vol. R.D. Nº10-2014-MTC/14, pp. 1-302.
- [2] AASHTO. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1993.
- [3] ———. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, Volume 2*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1986.
- [4] Highway Research Board. *The AASHO Road Test, Report 2 Materials and Construction*. Special Report 61B, Highway Research Board, Washington, D.C., 1962.
- [5] Van Til, C. J., B. F. McCullough, B. A. Vallerga, and R. G. Hicks. *Evaluation of AASHTO Interim Guides for Design of Pavement Structures*. Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1972.
- [6] Peters-Davis, K., and D. H. Timm. *Recalibration of the Asphalt Layer Coefficient*. NCAT Report 09-03, National Asphalt Center for Asphalt Technology, Auburn, AL, 2009.
- [7] Brown, E. R., L. A. Cooley, D. I. Hanson, C. Lynn, B. Powell, B. Prowell, and D. Watson. *NCAT Test Track Design, Construction and Performance*. NCAT Report 02-12, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, AL., 2002.
- [8] Ballim, Y. A Numerical Model and Associated Calorimeter for Predicting Temperature Profiles in Mass Concrete. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, No. 6, 2004, pp. 695-703.
- [9] Menendez, J. R. *Pavement Engineering, 4ta Edition (in Spanish)*. Instituto de la Construcción y Gerencia ICG, Lima, Perú, 2013.
- [10] Lytton, R. L., D. E. Pufahl, C. H. Michalak, H. S. Liang, and B. J. Dempsey. *An Integrated Model of the Climatic Effects on Pavements*. FHWA-RD-90-033, Texas Transportation Institute, Federal Highway Administration, College Station, TX, 1993.
- [11] Dempsey, B. J., W. A. Herlache, and A. J. Patel. Climatic-Materials-Structural Pavement Analysis Program. *Transportation Research Record*, Vol. 1095, No. 1, 1986, pp. 111-123.
- [12] Larson, G., and B. J. Dempsey. *Enhanced Integrated Climatic Model, Version 2.0*. DTFA MN/DOT 72114, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, 1997.
- [13] Zapata, C. E., and W. N. Houston. *Calibration and Validation of the Enhanced Integrated Climatic Model for Pavement Design*. NCHRP Report 602, Arizona State University, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2008.
- [14] AASHTO. *Software Help System, AASHTOWare Pavement ME Design™ v.2.0, Mechanistic-Empirical Pavement Design Software*. American Association of Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2014.
- [15] Yavuzturk, C., K. Ksaibati, and A. D. Chiasson. Assessment of Temperature Fluctuations in Asphalt Pavements due to Thermal Environmental Conditions using a Two-Dimensional, Transient Finite-Difference Approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 17, No. 4, 2005, pp. 465-475.
- [16] Solaimanian, M., and T. W. Kennedy. Predicting Maximum Pavement Surface Temperature using Maximum Air Temperature and Hourly Solar Radiation. *Transportation Research Record*, Vol. 1417, No. 1, 1993, pp. 1-11.

- [17] Bentz, D. P. *A Computer Model to Predict the Surface Temperature and Time-of-Wetness of Concrete Pavements and Bridge Decks*. NISTIR 6551, US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, Washington, D.C., 2000.
- [18] Janke, B., W. Herb, O. Mohseni, and H. Stefan. *Quasi-2D Model for Runoff Temperature from a Paved Surface*. Project Report N°477, St. Anthony Falls Laboratory, St. Paul, MN, 2006.
- [19] Yavuzturk, C., and K. Ksaibati. *Assessment of Thermal Stresses in Asphalt Pavements due to Environmental Conditions*. MPC-06-181, Mountain-Plains Consortium, Laramie, WY, 2006.
- [20] Kim, J., and R. C. West. Effect of Thermal Stresses on Pavement Performance Under Mild Climate Conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2181, No. 1, 2010, pp. 44-54.
- [21] Ullidtz, P. *Modelling Flexible Pavement Response and Performance*. Polyteknisk Forlag, Lyngby, Denmark, 1998.
- [22] Huang, Y. H. *Pavement Analysis and Design*. Pearson/Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2004.
- [23] MTC. *Manual De Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales Para Construcción EG-2013*. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, Lima, Perú, 2013.