

EVALUACIÓN DEL MÉTODO SUD - AFRICANO DE DISEÑO Y DEL SOFTWARE DE DISEÑO mePADS EN PAVIMENTOS V REGIÓN.

CARLOS WAHR DANIEL Ingeniero Civil

Profesor Depto. Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María
carlos.wahr@ociv.utfsm.cl

JUAN VIVANCO MORALES, Ingeniero Civil

Profesor Depto. Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María
juan.vivanco@ociv.utfsm.cl

RODRIGO WINKLER TOIRKENS, Alumno Memorista Ingeniería Civil

Universidad Técnica Federico Santa María

RESUMEN

Se presenta el método de diseño sudafricano y su software mePADS, analizándose las especificaciones y ensayos de materiales requeridos. Este es un método que emplea la teoría de capas elásticas para obtener las tensiones y deformaciones críticas cuyos criterios de falla se obtienen de ecuaciones de transferencia obtenidas en ensayos de HVS (Heavy Vehicle Simulator). Su novedad es que presenta numerosas ecuaciones de transferencia para diversos casos considerando la posibilidad de falla en cualquier capa de la estructura. Se analiza la posibilidad de su aplicabilidad en nuestro país. Se comparan vías diseñadas por el método AASHTO en la V Región con diseños alternativos como el método Sud – Africano (SAMDM), evaluándose el cambio de especificación que este método requiere.

1.- INTRODUCCIÓN

El procedimiento empírico mecanicista sudafricano básico consta fundamentalmente de los siguientes componentes: ingreso de las propiedades de los materiales, caracterización de las cargas, (Eje equivalente 80 kN con separación entre centros de rueda de 350 mm y una presión uniforme de contacto de 580 kPa.), análisis estructural (se realiza mediante un método lineal elástico y se obtiene la respuesta del pavimento en términos de σ y ϵ), modelo de desempeño del pavimento (funciones de transferencia) y la estimación de la capacidad de soporte del pavimento.

Los parámetros críticos de respuesta del pavimento sirven como entrada de las funciones de transferencia de determinados tipos de material y modos de falla. Las funciones de transferencia relacionan la condición esfuerzo / deformación con el número de cargas que pueden ser soportadas a ese nivel de esfuerzo / deformación antes de que sea alcanzada una condición terminal para un modo particular de deterioro.

2.- CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Material asfáltico: Distintos autores han propuesto valores para el módulo elástico para materiales asfálticos, estos se resumen en el Anexo 1, tablas 1 y 2. Existe una diferencia entre los valores obtenidos por Jordaan¹ y por Freeme, siendo estos últimos los más utilizados. El valor del módulo de Poisson usado en materiales asfálticos corresponde a 0.44.

Material granular: La tabla 3 del Anexo 1 muestra los valores del módulo elástico para material granular. El valor del módulo de Poisson usado en materiales granulares corresponde a 0.35.

Material cementado: El SAMDM y su software mePADS consideran el diseño de pavimentos usando materiales cementados, pero no se presentará en esta oportunidad.

Material de la subrasante: La tabla 4 del Anexo 1 muestra los valores del módulo elástico para la subrasante. El valor del módulo de Poisson usado en materiales de la subrasante corresponde a 0.35.

3.- ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Este tipo de análisis generalmente se realiza de manera estática con un programa multicapas lineal-elástico.

La máxima deformación unitaria horizontal en tensión en la parte inferior de las capas asfálticas y la máxima deformación unitaria horizontal en tensión en la parte inferior de las capas cementadas, son utilizadas como parámetros críticos, en la determinación de la fatiga en estos dos tipos de materiales. La posición de la máxima deformación en una capa en particular no necesariamente ocurre en la parte inferior de ésta. La posición de la máxima deformación horizontal es más bien determinada por la razón entre los módulos de las diferentes capas analizadas en una estructura de pavimentos. Las funciones de transferencia para estos materiales, se desarrollaron como función de la deformación unitaria en tensión en la parte inferior de la capa.

Muy a menudo, el análisis estructural de un pavimento con base y subbase granular dará como resultado en el diseño mecanicista, que en la base o subbase granular no exista resistencia a la falla por corte. Esto se debe a que en el modelo lineal elástico utilizado en el análisis estático, la solución del procedimiento multicapas permite el desarrollo de esfuerzos de tensión en materiales granulares. La ocurrencia de esfuerzos de tensión en capas granulares es determinada por la razón modular entre la rigidez de la capa granular y la rigidez de la capa que la soporta.

Sin embargo, los análisis elásticos actuales no están “diseñados” para analizar este tipo de materiales, es por ello que se está investigando la posibilidad de incorporar materiales granulares con el análisis de elementos finitos de pavimentos.

¹ Estos valores fueron obtenidos mediante un retrocálculo de deflexiones de terreno.

Una solución provisional es no permitir el desarrollo de esfuerzos de tensión en materiales granulares. Si un esfuerzo principal (menor) es obtenido en un material granular, se reemplaza este valor por cero. Esto significa que en la práctica, las capas granulares sólo soportan esfuerzos de compresión. Si el esfuerzo principal (menor) es igualado a cero se origina un reordenamiento de esfuerzos para transferir las cargas por compresión. El esfuerzo principal (mayor) es ajustado bajo la condición de que la tensión desviatoria permanece constante. Sin embargo este ajuste de esfuerzos no ha sido probado teóricamente, pero proporciona diseños de pavimento más significativos comparados a lo probado en la práctica.

4.- ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE DEL PAVIMENTO

El SAMDM es en esencia un modelo en el cual la capa más crítica determina la capacidad de soporte del pavimento. Existen tres conceptos relacionados con el proceso de estimar la capacidad de soporte del pavimento. El primero está relacionado con estimar la capacidad de soporte de cada una de las capas de la estructura del pavimento. El segundo, la ocurrencia de grietas en las capas cementadas debe ser investigada y por último, el tercero, está relacionado con estimar la capacidad de soporte del pavimento (basado en el análisis de cada capa en particular).

Generalmente se habla de “vida” de una capa, cuando se refiere al número de repeticiones de carga que ésta puede soportar antes de alcanzar su condición terminal. Esto no es estrictamente correcto, dado que el método mecanicista no predice la vida ni de las capas, ni de la estructura del pavimento. El término “vida” de una capa se emplea en este documento, como una manera conveniente de referirse a la capacidad de soporte de una de ellas en particular.

5.- MODO DE FALLA, PARÁMETROS CRÍTICOS Y FUNCIONES DE TRANSFERENCIA USADAS EN LOS MATERIALES DEL PAVIMENTO

Cada tipo de material exhibe un único modo de falla. Este último se encuentra relacionado con un parámetro crítico, calculado en una determinada posición en la estructura del pavimento sometido a cargas. Las funciones de transferencia proporcionan una relación entre el valor de dicho parámetro y el número de aplicaciones de carga que pueden ser soportadas con ese valor antes que algún tipo de falla (dependiendo el material) ocurra.

5.1.- Material granular

El material granular exhibe deformación debido a densificación y corte gradual bajo repeticiones de carga. Maree desarrolló el concepto de “Factor de Seguridad” para fallas por corte en material granular, y representa la razón entre la fuerza de corte del material y el esfuerzo aplicado que causa dicho corte. El factor de seguridad fue correlacionado con la deformación gradual permanente de los materiales granulares, bajo carga dinámica triaxial, a niveles específicos del factor de seguridad. El factor de seguridad para la falla debido al corte para materiales granulares, viene dado por:

$$F = \frac{\sigma_3 \cdot \left[K \cdot \left(\tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right) \right] + 2 \cdot K \cdot C \cdot \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad F = \frac{\sigma_3 \cdot \phi_{term} + C_{term}}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$$

donde:

σ_1 y σ_3 =	corresponden a los esfuerzos principales, mayor y menor respectivamente, actuando en un punto de la capa granular (esfuerzo de compresión es positivo y el de tracción es negativo).		
C =	Cohesión		
ϕ =	Ángulo de fricción interna		
K =	constante	=	0.65 para condiciones saturadas
			0.8 para condiciones moderadas de humedad
			0.95 para condiciones normales de humedad

Factores de seguridad menores que 1 implican que los esfuerzos de corte exceden la resistencia de corte y que una falla repentina (por corte) ocurrirá para el caso estático de carga. Bajo condiciones dinámicas reales de carga, el esfuerzo de corte sólo excede la resistencia al corte por un período muy corto de tiempo, y la falla por corte no ocurrirá bajo la aplicación de una carga, pero la deformación por corte se acumulará rápidamente bajo repeticiones de ella. Si el factor de seguridad es mayor que 1, la deformación se irá acumulando gradualmente con el aumento de aplicaciones de carga. En ambos casos el modo de falla será la deformación de la capa granular, y la tasa de deformación, será controlada por la magnitud del factor de seguridad relacionado con la falla por corte.

El factor de seguridad o los esfuerzos principales (mayor y menor) se consideran como los parámetros críticos para capas granulares. Los esfuerzos principales (mayor y menor) se calculan en la mitad de la capa granular. Valores sugeridos para C y ϕ se encuentran en el Anexo 1 tabla 5. Las funciones de transferencia que relacionan el factor de seguridad con el número de repeticiones de carga que pueden ser soportadas con este valor, se resumen en las ecuaciones 1 a 4, para diferentes niveles de servicio requeridos.

$$N_A = 10^{(2.605122 \cdot F + 3.480098)} \quad \text{para caminos de categoría tipo A} \quad (1)$$

$$N_A = 10^{(2.605122 \cdot F + 3.707667)} \quad \text{para caminos de categoría tipo B} \quad (2)_1$$

$$N_A = 10^{(2.605122 \cdot F + 3.983324)} \quad \text{para caminos de categoría tipo C} \quad (3)$$

$$N_A = 10^{(2.605122 \cdot F + 4.510819)} \quad \text{para caminos de categoría tipo D} \quad (4)$$

5.2.- Material asfáltico

El material asfáltico, falla debido al agrietamiento por fatiga bajo repeticiones de carga, como resultado de deformaciones debido a las tensiones internas ϵ_t ($\mu\epsilon$) en la parte inferior de la capa

¹ Las Categorías de camino vienen dadas por el nivel de confiabilidad requerido o deseado, i.e, un camino de categoría A tiene una confiabilidad del 95 %; uno de categoría B, 90 %; uno de categoría C, 80 % y por último uno de categoría D, 50 %.

analizada. Funciones de transferencia son entregadas para capas de superficie de granulometría continua y discontinua con módulos de rigidez que varían entre 1000 MPa y 8000 MPa.

Las funciones de transferencia se dan solamente para aquellas capas asfálticas de superficie con granulometría continua a pesar que el software mePADS, entrega funciones para granulometrías discontinuas.

Capas asfálticas continuamente graduadas.

$$N_f = 10^{17.40 \cdot \left(1 - \frac{\log \varepsilon_t}{3.40}\right)} \text{ para caminos de categoría A} \quad (5)$$

$$N_f = 10^{17.46 \cdot \left(1 - \frac{\log \varepsilon_t}{3.41}\right)} \text{ para caminos de categoría B} \quad (6)$$

$$N_f = 10^{17.54 \cdot \left(1 - \frac{\log \varepsilon_t}{3.42}\right)} \text{ para caminos de categoría C} \quad (7)$$

$$N_f = 10^{17.71 \cdot \left(1 - \frac{\log \varepsilon_t}{3.46}\right)} \text{ para caminos de categoría D} \quad (8)$$

5.3.- Bases asfálticas gruesas

La forma general para las funciones de transferencia para el inicio de las grietas producidas por fatiga para bases asfálticas gruesas, se encuentra en la ecuación 9. La tabla 6 en el Anexo 1 contiene los coeficientes de regresión para esta ecuación, para combinaciones de categorías de camino y distintos valores de rigidez de las mezclas asfálticas en caliente.

$$N_f = 10^{A \cdot \left(1 - \frac{\log \varepsilon_t}{B}\right)} \text{ para toda las categorías de camino} \quad (9)$$

5.4.- Material de la subrasante

El modo de falla para el material de la subrasante es la deformación permanente de esta capa, resultando una deformación en las superficies de rodadura. El parámetro crítico para este tipo de materiales corresponde a la deformación unitaria vertical (ε_v) en la parte superior de la capa. Las funciones de transferencia están diseñadas para dos condiciones terminales, 10 o 20 mm de ahuellamiento superficial debido a la deformación del material de la subrasante.

La ecuación 10 entrega la forma general de la función de transferencia para los materiales de la subrasante con los coeficientes de regresión para 10 o 20 mm de ahuellamiento terminal y se muestran en la tabla 7 del Anexo 1 para diferentes niveles de servicio/categoría de caminos.

$$N = 10^{(A - 10 \cdot \text{Log} \varepsilon_v)} \text{ para todas las categorías} \quad (10)$$

6.- COMPARACIÓN ENTRE ESTRUCTURAS AASHTO Y ESTRUCTURAS PROPUESTAS MEDIANTE EL USO DEL SOFTWARE MEPADS. (TABLAS 8 A 12 ANEXO 1)

En las tablas siguientes se realiza la comparación entre diferentes estructuras AASHTO y estructuras propuestas mediante el uso del software mePADS.

Los módulos elásticos de las capas granulares utilizados en el análisis de estas estructuras se detallan en las tablas 3 y 4 del Anexo 1 obtenidas de estudios sudafricanos. Para el caso de las capas asfálticas se utilizaron los siguiente módulos elásticos:

Material	Módulo elástico (MPa) ¹
Carpeta asfáltica	4000
Capa intermedia	6000
Base Asfáltica	7500

Las ecuaciones de transferencia son válidas si las especificaciones de los materiales, el método constructivo y el clima son similares tanto en Chile como en Sud-Africa. En general las modificaciones a bases y subbases son leves como se puede apreciar en el punto 6.1.

El Método de Diseño Sudafricano en este trabajo, se empleará usando tipos de materiales similares a los empleados por las estructuras que se comparan. Este método permite usar otros materiales por ejemplo tratamientos superficiales y materiales estabilizados con los que resultan estructuras más económicas. En una segunda parte de este trabajo se presentará ese análisis.

6.1.- Bases y Subbases

Las características de los materiales utilizados en Sud-Africa así como los materiales utilizados en Chile tanto en bases como en subbases se resumen a continuación:

	Chile	Sud-Africa
Bases	CBR > 80; Limite Líquido < 25; IP <6; tamaño máximo 50 mm; 95min AASHTO modificado	Nombre: G4 CBR ≥ 80; tamaño máximo 53 mm; 98 – 100 AASHTO modificado.; IP<6; hichamiento 0,2 @ 100 % AASHTO modificado
Subbases	CBR ≥ 40; tamaño máximo 50 mm; 95min AASHTO modificado y a 0,2'' de penetración; Limite Líquido < 35; IP <8; tamaño máximo 50 mm.	Nombre: G5 CBR ≥ 45; tamaño máximo 63 mm o 2/3 del espesor de la capa; la densidad debe ser como la prescrita para el uso de la capa; IP < 10; hichamiento 0,5 @ 100 % AASHTO modif.

¹ Obtenidas como un promedio entre los valores propuestos por Freeme y por Jordaan (Tablas 1 y 2 del Anexo 1) y verificadas según la norma de Andalucía, la que recomienda utilizar un módulo promedio de 6000 Mpa en el caso de que existan varias capas.

7.- COMENTARIOS Y CONCLUSIONES.

7.1.- Diseño AASHTO v/s diseño propuesto utilizando software mePADS (Tablas 8-11 Anexo 1)

Las estructuras propuestas presentan un espesor relativamente similar a las estructuras AASHTO originales, salvo para aquellas estructuras que presentaban un comportamiento deficiente. Es claro observar que se presentan deficiencias notorias en estructuras de bajo tránsito y CBR 5% y 10%, es por ello, que las estructuras propuestas en estos casos, poseen un espesor mayor que las estructuras originales. Para estructuras de CBR 10 % y tránsito superior a 10 millones de EE, se puede apreciar que estas poseen un espesor similar al original, sólo que en estos casos los espesores de cada capa sufrieron una reestructuración debido a que se busca que las capas inferiores a la capa de rodadura, deban resistir la totalidad del tránsito de diseño en toda la vida útil, debido a que una reparación de estas capas, resulta muy compleja de realizar. Las estructuras con CBR 20% y 40% y tránsito superior a 10 millones de EE, poseen una estructuración idéntica a la original, lo que significa que estas poseen un comportamiento óptimo antes de ser analizadas con mePADS.

El manual de diseño sudafricano TRH 4 propone la incorporación de capas de suelo para mejorar el suelo de soporte de la estructura. Sugiere la incorporación de dos capas (una superior, G 7 y una inferior, G 9) de 150 mm de espesor con módulos elásticos mostrados en la Tabla 4 del Anexo 1 para el caso de un suelo de soporte con un CBR entre 3% y 7%. Para el caso de un suelo de soporte con CBR entre 7% y 15%, el manual sugiere la incorporación de una sola capa (G 7) de 150 mm de espesor con los módulos elásticos mostrados en la Tabla 4 del Anexo 1. Esto último se resume en la Tabla 10 y Tabla 11 del Anexo 1, en donde se muestran ambos diseños, los originales v/s los sugeridos por la norma TRH 4. Se puede observar que para los CBR 5% y 10%, los diseños propuestos por la norma TRH 4, son mayores que los propuestos originalmente, presentando los diseños propuestos por el TRH 4 generalmente un estado de sobredimensionamiento. Es por esto último que el análisis se realizó sólo de manera comparativa y los valores no son propuestos para un diseño final.

7.2.- Diseño estructuras MOP v/s diseño propuesto utilizando software mePADS (Tabla 12 Anexo 1)

Se aprecia claramente que las estructuras 1, 2 y 3 presentan falla en una o dos de sus capas. En el caso de la estructura 1, la falla se encuentra en dos de sus capas, siendo éstas el concreto asfáltico y el suelo. Es por ello que un incremento en su capa asfáltica, así como una disminución del espesor de la base granular y la incorporación de subbase granular, ayuda a incrementar la durabilidad de este tipo de estructura. Con esta nueva disposición de capas, se puede apreciar que el concreto asfáltico presentará falla en la mitad de su vida útil, siendo necesaria una mantención de esta última. Las estructuras 2 y 3 presentan falla en la base asfáltica, es por ello que se sugiere la disposición de capas de la Tabla 12 del Anexo 1. Con esta nueva estructura se logra que la base asfáltica no presente ningún tipo de falla en toda su vida útil. Las estructuras 4 y 5 presentaban una condición de sobredimensionamiento es por ello que se realizaron pequeñas correcciones en los espesores de sus capas, principalmente para lograr que la base asfáltica no presente falla en toda su vida útil. No se incorporaron los suelos 1 y 2 propuestos por el manual TRH 4 debido que las estructuras resultantes eran exageradamente grandes. Los módulos elásticos utilizados se presentan en la Tabla 12 del Anexo 1. Su justificación es idéntica al caso anterior.

ANEXO 1

Tabla 1
Módulos elásticos para capas asfálticas sugeridos por Freeme

Tipo de Material	Profundidad desde la superficie (mm)	Valores del Modulo de Rigidez (MPa) basado en la temperatura y en la condición del material					
		Condición buena, o material nuevo		Rígido, mezcla seca		Agrietado	
		20° C	40° C	20° C	40° C	20° C	40° C
Graduación discontinua	0 – 50	4000	1500	5000	1800	1000	500
	50 – 150	6000	3500	7000	4000	1000	500
	150 – 250	7000	5500	8000	6000	1000	500
Graduación continua	0 – 50	6000	2200	7000	4000	750	500
	50 – 150	8000	5500	9000	6000	1000	750
	150 – 250	9000	7500	10000	8000	1000	750

Tabla 2
Módulos elásticos para capas asfálticas sugeridos por Jordaan

Tipo de Material	Profundidad desde la superficie (mm)	Valores del Modulo de Rigidez (MPa) basado en la temperatura y en la condición del material					
		Condición buena, o material nuevo		Rígido, mezcla seca		Agrietado	
		20° C	40° C	20° C	40° C	20° C	40° C
Graduación discontinua	0 – 50	1000	200	2000	300	600	200
	50 – 150	2000	300	3000	400	750	300
	150 – 250	3000	400	4000	500	800	400
Graduación continua	0 – 50	2000	300	3000	300	750	300
	50 – 150	4000	400	5000	600	800	400
	150 – 250	6000	1000	7000	1500	1000	750

Tabla 3
Rangos sugeridos del módulo elástico para materiales granulares (MPa) con los valores esperados entre paréntesis

Código del Material	Descripción del Material	Capa cementada superior en el estado de losa	Capa granular superior o equivalente	Condición de humedad (buen soporte)	Condición de humedad (soporte pobre)
G1	Piedra chancada de alta calidad	250 – 1000 (450)	150 – 600 (300)	50 – 250 (250)	40 – 200 (200)
G2	Piedra chancada	200 – 800 (400)	100 – 400 (250)	50 – 250 (250)	40 – 200 (200)
G3	Piedra chancada	200 – 800 (350)	100 – 350 (230)	50 – 200 (200)	40 – 150 (150)
G4	Grava natural (calidad base)	100 – 600 (300)	75 – 350 (225)	50 – 200 (200)	30 – 150 (150)
G5	Grava natural	50 – 400 (250)	40 – 300 (200)	30 – 150 (150)	20 – 120 (120)
G6	Grava natural (calidad sub-base)	50 – 200 (200)	30 – 200 (150)	20 – 150 (150)	20 – 120 (120)

Tabla 4
Valores sugeridos del módulo elástico para material de la subrasante (MPa)

Código del material	CBR sumergido	Descripción del material	Valor sugerido del módulo elástico	
			Condición seca	Condición mojada
G7	≥ 15	Grava – Suelo	30 – 200	20 – 120
G8	≥ 10	Grava – Suelo	30 – 180	20 – 90
G9	≥ 7	Suelo	30 – 140	20 – 70
G10	≥ 3	Suelo	20 - 90	10 - 45

Tabla 5
Valores sugeridos para C_{term} y ϕ_{term} para material granular

Código del Material	Condición de Humedad					
	Seca		Moderada		Mojada	
	ϕ_{term}	C_{term}	ϕ_{term}	C_{term}	ϕ_{term}	C_{term}
G1	8.61	392	7.03	282	5.44	171
G2	7.06	303	5.76	221	4.46	139
G3	6.22	261	5.08	188	3.93	115
G4	5.50	223	4.40	160	3.47	109
G5	3.60	143	3.30	115	3.17	83
G6	2.88	103	2.32	84	1.76	64
EG4	4.02	140	3.50	120	3.12	100
EG5	3.37	120	2.80	100	2.06	80
EG6	1.63	100	1.50	80	1.40	60

Tabla 6
 Coeficientes de regresión para la función de transferencia que indica el inicio del agrietamiento por fatiga para bases asfálticas gruesas

Rigidez para mezclas asfálticas calientes (MPa)	Categoría del camino/Nivel de servicio	A	B
1000	A	16.44	3.378
	B	16.81	3.453
	C	17.25	3.543
	D	17.87	3.671
2000	A	16.09	3.357
	B	16.43	3.248
	C	16.71	3.487
	D	17.17	3.583
3000	A	15.78	3.334
	B	16.11	3.403
	C	16.26	3.435
	D	16.68	3.524
5000	A	15.52	3.317
	B	15.73	3.362
	C	15.83	3.383
	D	16.10	3.441
8000	A	15.09	3.227
	B	15.30	3.272
	C	15.39	3.291
	D	15.65	3.346

Tabla 7
 Coeficientes de regresión para la función de transferencia de la deformación general de la subrasante

Condición terminal de ahuellamiento (mm)	Categoría del camino/Nivel de servicio	A
10	A	33.30
	B	33.38
	C	33.47
	D	33.70
20	A	36.30
	B	36.38
	C	36.47
	D	36.70

Tabla 8
Diseño Propuesto (mm) mePADS v/s diseño original

Diseño propuesto (mm) mePADS v/s diseño original AASHTO												
Estr.	Ahuellamiento de la subrasante 10 mm										Espesor total (mm)	
	CR AC		CI AC		BA BC		BG G4		SB G5			
E-5-1 ¹	100 ²	60 ³	---	---	---	---	150	150	200	150	450	360
E-5-2	50	60	70	---	---	---	150	150	150	200	420	410
E-5-5	60	60	80	---	---	---	150	200	150	250	440	510
E-5-10	60	60	90	90	---	---	150	150	150	150	450	450
E-5-20	70	70	100	100	---	---	150	150	200	200	520	520
E-5-40	50	50	60	60	110	100	150	200	150	200	520	610
E-5-60	50	50	70	70	110	100	150	200	150	200	530	620
E-5-80	50	50	50	80	130	100	200	200	200	200	630	630
E-10-1	100	60	---	---	---	---	150	150	150	150	400	360
E-10-2	50	60	60	---	---	---	150	150	150	150	410	360
E-10-5	50	60	80	---	---	---	150	150	150	200	430	410
E-10-10	60	60	90	90	---	---	150	150	150	150	450	450
E-10-20	70	70	100	100	---	---	150	150	150	150	470	470
E-10-40	50	50	50	60	110	100	150	150	150	150	510	510
E-10-60	50	50	50	70	120	100	150	150	150	150	520	520
E-10-80	50	50	60	80	120	100	150	150	150	150	530	530
E-20-1	100	60	---	---	---	---	160	200	---	---	260	260
E-20-2	50	60	60	---	---	---	150	250	---	---	260	310
E-20-5	60	60	70	---	---	---	150	150	---	150	280	360
E-20-10	60	60	90	90	---	---	150	150	---	---	300	300
E-20-20	70	70	100	100	---	---	150	150	---	---	320	320
E-20-40	50	50	60	60	100	100	150	150	---	---	360	360
E-20-60	50	50	70	70	100	100	200	200	---	---	420	420
E-20-80	50	50	80	80	100	100	200	200	---	---	430	430
E-40-1	100	60	---	---	---	---	150	150	---	---	250	210
E-40-2	50	60	60	---	---	---	150	200	---	---	260	260
E-40-5	60	60	70	---	---	---	150	250	---	---	280	320
E-40-10	60	60	90	90	---	---	150	150	---	---	300	300
E-40-20	70	70	100	100	---	---	150	150	---	---	320	320
E-40-40	50	50	60	60	100	100	150	150	---	---	360	360
E-40-60	50	50	70	70	100	100	150	150	---	---	370	370
E-40-80	50	50	80	80	100	100	150	150	---	---	380	380

¹ E-5-1 corresponde a una estructura con un suelo de CBR 5 % y un tránsito de diseño de 1.000.000 de EE

² Valores propuestos utilizando software mePADS

³ **Valores de diseño original**

* requiere doble tratamiento

Tabla 9

Solicitaciones admisibles (x 10⁶ EE) propuesto utilizando mePADS v/s solicitudes diseño original Aashto

Solicitaciones admisibles (x 10 ⁶ EE) propuesto utilizando mePADS v/s solicitudes diseño original Aashto										
Estr.	Ahuellamiento de la subrasante 10 mm									
	CR + CI AC		BA BC		BG G4		SB G5		Suelo	
	Prop.	Orig.	Prop.	Orig.	Prop.	Orig.	Prop.	Orig.	Prop.	Orig.
E-5-1	0.659	0.176 ¹	---	--	159	5.426	1134	85.67	2.4	0.03034
E-5-2	1.82	0.187	---	--	3297	5.68	103916	236.9	6.28	0.135
E-5-5	4.59	0.23	---	--	37626	12.68	1909780	4308	29.4	2.50
E-5-10	4.81	4.81²	---	--	69819	69819	4647950	4647950	45.6	45.6
E-5-20	11.89	11.89	---	--	1308330	1308330	8.1 E 8	8.1 E 8	422.76	422.76
E-5-40	676584	351752 ³	44.6	33.2	1 E 9	1 E 9	1 E 9	1 E 9	8189	15528
E-5-60	327951	187275	61.5	45.7	1 E 9	1 E 9	1 E 9	1 E 9	14516	26630
E-5-80	2.1 E 6	131549	84.1	62.3	1 E 9	1 E 9	1 E 9	1 E 9	43969	44530
E-10-1	0.82	0.225	---	--	220	6.71	1076	44.19	12	0.578
E-10-2	1.49	0.224	---	--	1601	6.71	6135	44.19	40.9	0.578
E-10-5	4	0.235	---	--	20511	6.89	71329	111	199.5	2.71
E-10-10	6.46	6.46	---	--	124119	124119	418254	418254	589	589
E-10-20	15	15	---	--	2158420	2158420	7159360	7159360	2284	2284
E-10-40	970080	296952	42	37.45	1 E 9	1 E 9	1 E 9	1 E 9	52562	52825
E-10-60	1251370	169152	64	51.7	1 E 9	1 E 9	1 E 9	1 E 9	96332	96736
E-10-80	725089	124060	87	70.9	1 E 9	1 E 9	1 E 9	1 E 9	172510	172186
E-20-1	0.80	0.189	---	--	378	17.5	---	--	14	1.55
E-20-2	1.56	0.197	---	--	320	37.7	---	--	7.3	9.34
E-20-5	4.21	0.329	---	--	3897	122.8	---	16.18	414	87.85
E-20-10	7.25	7.25	---	--	332823	332823	---	--	1615	1615
E-20-20	17.1	17.1	---	--	6583390	6583390	---	--	7127	7127
E-20-40	224028	224028	44	44	1 E 9	1 E 9	---	--	262782	262782
E-20-60	142718	142718	63	63	1 E 9	1 E 9	---	--	1172990	1172990
E-20-80	112188	112188	86	86	1 E 9	1 E 9	---	--	2178980	2178980
E-40-1	0.87	0.191	---	--	685	19.2	---	--	36	0.539
E-40-2	1.7	0.198	---	--	8041	24	---	--	181	3.97
E-40-5	4.6	0.202	---	--	91018	38	---	--	998	23.6
E-40-10	7.9	7.9	---	--	746308	746308	---	--	3778	3778
E-40-20	18.65	18.65	---	--	1.34 E 7	1.34 E 7	---	--	16246	16246
E-40-40	212085	212085	48	48	1 E 9	1 E 9	---	--	569195	569195
E-40-60	137868	137868	66	66	1 E 9	1 E 9	---	--	1098040	1098040
E-40-80	110027	110027	91	91	1 E 9	1 E 9	---	--	2065340	2065340

¹ Estructura deficiente

² Estructura óptima

³ Estructura sobredimensionada

Tabla 10

Diseño Propuesto (mm) mePADS v/s diseño original AASHTO utilizando suelos propuestos por TRH 4																
Estr.	Ahuellamiento de la subrasante 10 mm															
	CR AC		CI AC		BA BC		BG G4		SB G5		Suelo 2 ¹ G7		Suelo 1 G9		Espesor total (mm)	
	Prop	Orig	Prop	Orig	Prop	Orig	Prop	Orig	Prop	Orig	Prop	Orig	Prop	Orig	Prop	Orig
E-5-1	100	60	---	---	---	---	250	150	---	150	150	---	150	---	650	360
E-5-2	50	60	70	---	---	---	150	150	---	200	150	---	150	---	570	410
E-5-5	60	60	80	---	---	---	150	200	---	250	150	---	150	---	590	510
E-5-10	60	60	100	90	---	---	150	150	---	150	150	---	150	---	610	450
E-5-20	50	70	60	100	100	---	150	150	---	200	150	---	150	---	660	520
E-5-40	50	50	50	60	120	100	150	200	---	200	150	---	150	---	670	610
E-5-60	50	50	50	70	130	100	150	200	---	200	150	---	150	---	680	620
E-5-80	50	50	70	80	120	100	150	200	---	200	150	---	150	---	690	630
E-10-1	100	60	---	---	---	---	180	150	---	150	150	---	---	---	430	360
E-10-2	50	60	60	---	---	---	150	150	---	150	150	---	---	---	410	360
E-10-5	50	60	80	---	---	---	150	150	---	200	150	---	---	---	430	410
E-10-10	60	60	90	90	---	---	200	150	---	150	150	---	---	---	500	450
E-10-20	50	70	50	100	100	---	150	150	---	150	150	---	---	---	500	470
E-10-40	50	50	50	60	110	100	200	150	---	150	150	---	---	---	560	510
E-10-60	50	50	50	70	120	100	170	150	---	150	150	---	---	---	540	520
E-10-80	50	50	60	80	120	100	150	150	---	150	150	---	---	---	530	530

Tabla 11

Solicitaciones admisibles (x 10⁶ EE) propuesto utilizando mePADS v/s solicitudes diseño original AASHTO utilizando suelos propuestos por TRH 4												
Estr.	Ahuellamiento de la subrasante 10 mm											
	CR + CI AC		BA BC		BG G4		SB G5		Suelo * ²		Suelo	
	Prop.	Orig.	Prop.	Orig.	Prop.	Orig.	Prop.	Orig.	Prop.	Orig.	Prop.	Orig.
E-5-1	0.59³	0.176	---	--	335	5.426	---	85.67	23	---	120	0.0303
E-5-2	1.51	0.187	---	--	16886	5.68	---	236.9	21	---	83	0.135
E-5-5	3.91	0.23	---	--	288982	12.68	---	4308	129	---	323	2.50
E-5-10	6.5	4.811	---	--	3895130	69819	---	4.6 E 6	562	---	900	45.6
E-5-20	348060	11.89	26	--	1 E 9	1.3 E 6	---	8.1 E 8	57243	---	26244	422.76
E-5-40	2042020	351752	45	33.2	1 E 9	1 E 9	---	1 E 9	115899	---	44168	15528
E-5-60	2591810	187275	68	45.7	1 E 9	1 E 9	---	1 E 9	226981	---	73361	26630
E-5-80	511112	131549	90	62.3	1 E 9	1 E 9	---	1 E 9	814392	---	189289	44530
E-10-1	0.52	0.225	---	--	793	6.71	---	44.19	2.5	---	157	0.578
E-10-2	1.29	0.224	---	--	1191	6.71	---	44.19	22	---	36	0.578
E-10-5	3.6	0.235	---	--	15205	6.89	---	111	152	---	499	2.71
E-10-10	6.46	6.46	---	--	332458	124119	---	418254	1836	---	1480	589
E-10-20	1242440	15	20	--	1 E 9	2.2 E 6	---	7.2 E 6	50771	---	26215	2284
E-10-40	1016690	296952	40	37.45	1 E 9	1 E 9	---	1 E 9	169101	---	72883	52825
E-10-60	132589	169152	60	51.7	1 E 9	1 E 9	---	1 E 9	334270	---	133004	96736
E-10-80	756548	124060	80	70.9	1 E 9	1 E 9	---	1 E 9	476921	---	186493	172186

¹ Suelo 2: Estructura propuesta por manual sudafricano TRH 4 que posee un módulo elástico de 120. Suelo 1: idéntico al caso anterior teniendo un módulo elástico de 70 Mpa. Si un suelo posee un CBR entre 3 y 7 % manual TRH 4 recomienda incorporar ambas estructuras a la estructura final de diseño. Si el suelo posee un CBR entre 7 y 15 % manual propone incorporar solo el suelo 2

² Suelo * corresponde a la suma de los suelos 1 y 2

³ Estructura deficiente, Estructura óptima, estructura sobredimensionada.

Estructuras MOP V Región

Tabla 12

Estructura	Tráfico de diseño	CBR de diseño	Material	Diseño Original			Diseño Propuesto			Cargas Admisibles (x 10 ⁶ EE)	
				Espesor (mm)	E (Mpa)	Poisson	Espesor (mm)	E (Mpa)	Poisson	Original	Propuesto
Estructura 1	626.124 (ES 1)	10 %	Concreto Asfáltico AC	50	4000	0.44	100	4000	0.44	0.0374	0.841
			Base granular G4	200	150	0.35	150	225	0.35	10	230
			Subbase granular G5	---	---	---	150	180	0.35	---	844
			Suelo	0	77 ¹	0.35	0	77	0.35	0.0032	12
Estructura 2	7.850.641 (ES 10)	11.7 %	Concreto Asfáltico AC	60	4000	0.44	70	4000	0.44	1 E 9	1 E 9
			Base asfáltica BC	70	7500	0.44	90	7500	0.44	1.46	8.3
			Base granular G4	240	170	0.35	150	225	0.35	2081330	4.6 E 6
			Subbase granular G5	---	---	---	150	180	0.35	---	4.8 E 6
			Suelo	0	85	0.35	0	85	0.35	95	3343
Estructura 3	7.850.641 (ES 10)	20 %	Concreto Asfáltico AC	60	4000	0.44	70	4000	0.44	1 E 9	1 E 9
			Base asfáltica BC	70	7500	0.44	90	7500	0.44	1.88	7.85
			Base granular G4	180	200	0.35	180	200	0.35	165228	2.3 E 7
			Suelo	0	115	0.35	0	115	0.35	185	2226

¹ Los valores correspondientes a los módulos elásticos del suelo fueron calculados dependiendo del CBR de la siguiente manera:

$$E = 17.6 \cdot CBR^{0.64} \quad \text{si } 2 < CBR < 12$$

$$E = 22.1 \cdot CBR^{0.55} \quad \text{si } 12 \leq CBR \leq 80$$

Tabla 12 (continuación)

Estructura	Tráfico de diseño	CBR de diseño	Material	Diseño Original			Diseño Propuesto			Cargas Admisibles (x 10 ⁶ EE)	
				Espesor (mm)	E (Mpa)	Poisson	Espesor (mm)	E (Mpa)	Poisson	Original	Propuesto
Estructura 4	10.700.000 (ES 30)	5 %	Concreto Asfáltico AC	50	4000	0.44	50	4000	0.44	246841 ¹	246908
			Capa intermedia AC	50	6000	0.44	50	6000	0.44		
			Base asfáltica BC	80	7500	0.44	80	7500	0.44	12.39	11.8
			Base granular G4	150	225	0.35	150	225	0.35	1.6 E 8	1.5 E 8
			Subbase granular G5	200	120	0.35	150	120	0.35	1 E 9	1 E 9
			Suelo	0	50	0.35	0	50	0.35	1827	880
Estructura 5	16.400.000 (ES10)	4.2 %	Concreto Asfáltico AC	50	4000	0.44	50	4000	0.44	107619	743715
			Capa intermedia AC	60	6000	0.44	50	6000	0.44		
			Base asfáltica BC	80	7500	0.44	90	7500	0.44	18.4	17
			Base granular G4	200	225	0.35	150	200	0.35	1 E 9	1 E 9
			Subbase granular G5	250	100	0.35	150	100	0.35	1 E 9	1 E 9
			Suelo	0	43	0.34	0	43	0.35	5358	1721

¹ Por características de manejo del software mePADS, el cual permite el análisis de una estructura de máximo 5 capas, se procedió transformar las capas concreto asfáltico, capa intermedia y base asfáltica a una sola capa equivalente utilizando la siguiente relación:

$$E_{ca} = \left(\frac{\sum_i h_i \cdot \sqrt[3]{E_i}}{\sum_i h_i} \right)^3$$

8.- REFERENCIAS

- Department of Transport, Pretoria “Structural Design of Interurban and Rural Road Pavements”, 1985
- Department of Transport, Pretoria “Guidelines for Road Construction Materials”, 1985
- Csir Transportek, Pretoria Software mePADS 2002
- Thenoux, G. y Gaete R. “Análisis Mecanicista de Estructuras de Pavimentos utilizados en Chile diseñados por el método Aashto-93”. 10º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Sevilla 1999
- Theyse, H. L. “Overview of the south african mechanistic pavement design method”, 1996
- Department of Transport, Pretoria “Structural Design of Interurban and Rural Road Pavements”, Draft 1996