

ORIGINAL ARTICLE / ARTÍCULO ORIGINAL

FACTORIAL DESIGN APPLIED TO MECHANISTIC-EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN METHODS

DISEÑO FACTORIAL APLICADO AL DISEÑO DE PAVIMENTOS MEDIANTE MÉTODOS MECANÍSTICO-EMPÍRICOS

Alberto Esteban Ciria¹ & Carlos M. Chang²

1 Consultor, España, aestecir@ciccp.es

2 University of Texas at El Paso, Texas, U.S.A.

Author for correspondence: cchangalbitres2@utep.edu

ABSTRACT

The present work describes the utility that has the application of the method of factorial design in the design of pavements, previously calculated by the mechanistic-empirical method. This methodology allows to establish design parameters and calculate the interaction between them, considering the thickness of hot asphalt mix layers, thickness of the granular layer and bearing capacity of the subgrade or subgrade, thus achieving the optimization of the pavement section and cost of each of the layers; optimizing in this way the total cost of pavement section or other variables that are considered necessary to combine in the application of the methodology. The method also allows to analyze the performance and causes of failure of a pavement section, with an adequate calibration of the parameters involved in the model, either by varying these or adding new parameters. The application of this methodology has a great potential in the optimization of resources, generating economic and environmental benefits, and could also be applied to asphalt mix design, among others. Standards and mechanistic-empirical analytical methods used in Spain and the United States for pavement evaluation are considered in the analysis presented in this paper, demonstrating the applicability of the factorial design method.

Keywords: Calculation of improvement of subgrade – Factorial Design – Mechanistic-Empirical Method – Pavement Design

RESUMEN

El presente trabajo describe la utilidad que tiene la aplicación del método de diseño factorial en el diseño de pavimentos, calculados previamente por el método mecanístico-empírico. Esta metodología permite establecer parámetros de diseño y calcular la interacción entre ellos, considerando los espesores de las capas de mezclas asfálticas en caliente, espesor de la capa granular y capacidad portante de la explanada o subrasante, consiguiendo así, optimizar la sección de firme y costo de cada una de las capas; optimizando de esta manera el costo total de la sección de firme u otras variables que se consideren necesarias combinar en la aplicación de la metodología. El método también permite analizar el desempeño y las causas de falla de una sección de firme, con una calibración adecuada de los parámetros implicados en el modelo, bien variando éstos ó añadiendo parámetros nuevos. La aplicación de esta metodología tiene un gran potencial en la optimización de recursos, generando beneficios económicos y medioambientales, y podría también aplicarse al diseño de mezclas asfálticas entre otros. Normas y métodos analíticos mecanístico-empíricos utilizados, vigentes en España y Estados Unidos para la evaluación de firmes son considerados en el análisis presentado en este trabajo, demostrando la aplicabilidad del método de diseño factorial.

Palabras clave: Cálculo de mejora de explanadas – Diseño de pavimentos – Diseño Factorial – Método Mecanístico-Empírico

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo describe la utilidad de la aplicación de la técnica del método de diseño factorial en el campo del dimensionamiento de pavimentos calculados previamente por el método mecanístico-empírico.

El diseño factorial es de amplia aplicación y se ha utilizado para definir factores relevantes utilizando modelos de simulación en la toma de decisiones. Criterios de diseño experimental pueden ser empleados en combinación con los diseños factoriales incrementando el nivel de confiabilidad y la relación entre los

objetivos y resultados (Allem *et al.*, 2009).

En España, la norma vigente obliga a dimensionar las secciones de firmes en base a catálogos y normativas autonómicas. En otros países, como en los Estados Unidos, se utilizan métodos mecanístico-empíricos como el AASHTO (2015) y otros procedimientos analíticos para verificar el desempeño estructural y funcional de una estructura de pavimento pre-dimensionada. El pre-dimensionamiento del pavimento usualmente debe cumplir los mínimos requisitos técnicos y dentro de los

costos estimados para el proyecto, evaluando las propiedades de los materiales existentes en la zona para la ejecución de obra comparativamente con alternativas que involucran la descompensación entre las unidades de movimiento de tierras de desmonte y terraplén, o de exceso de roca apta para ser utilizada en las diferentes capas del firme.

El método de diseño factorial permite fijar parámetros de cálculo y determinar la interacción entre ellos, pudiéndose tener en cuenta, por ejemplo, los espesores de las capas de mezclas asfálticas en caliente (MAC) con respecto a la capacidad portante necesaria de la explanada o subrasante para optimizar la sección; así como el espesor de la capa granular y el costo de cada una de las capas. De esta manera, se puede optimizar el costo de la sección o las variables que se consideren necesarias combinar.

Los siguientes temas son presentados en este trabajo:

Cálculo de una sección de pavimento, incluyendo la mejora de la explanada o subrasante, mediante el método analítico o mecanístico-empírico para estimar la vida útil. En el presente caso, se han considerado como parámetros de cálculo los definidos en la última norma editada en España, Norma para el Dimensionamiento de Firmes de la Red de Carreteras del País Vasco (2012), así como los parámetros de cálculo recomendados por el Centro de Experimentaciones de Obras Públicas de España (CEDEX), el Instituto Técnico de la Vialidad y del

Transporte (INTEVÍA) y la Instrucción de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía, 2007 (COPT, 2007).

Cálculo mediante diseño factorial, obteniendo la fórmula que define la sección de pavimento permitiendo fijar variables como; espesor de las mezclas asfálticas en caliente, capacidad portante de la explanada o subrasante y volumen de tráfico soportado, pudiendo así calcular la sección más conveniente, optimizando los recursos económicos y medioambientales.

Resumen de las conclusiones de los cálculos obtenidos.

Por lo tanto, el presente trabajo describe la utilidad que tiene la aplicación del método de diseño factorial en el diseño de pavimentos, calculados previamente por el método mecanístico-empírico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño de Sección de Pavimento Mediante el Cálculo Analítico o Mecanístico-Empírico

En España, la técnica de dimensionamiento de secciones de firme es mediante catálogo, es decir, existe una Instrucción redactada por el Ministerio de Fomento del Gobierno de España (MF, 2003), así como varias normativas autonómicas y recomendaciones.

De esta manera, con el tráfico de proyecto (TP) en función de una intensidad media diaria (IMD) se establece una categoría de tráfico, y con una explanada o subrasante definida en función de su capacidad portante, se obtiene la sección del

firme de diseño de una tabla o figura.

Se pueden consultar, las diferentes categorías de tráfico definidas en la última norma autonómica editada en España, “Norma para el Dimensionamiento de Firmes de la Red de Carreteras del País Vasco”(GV, 2012).

Calculándose el tráfico de proyecto (T.P) mediante la ecuación 1 expresada a continuación:

$$T.P. = IMD_p^{APS} * 365 * F * \gamma_T \quad 1$$

Donde; IMD_p^{APS} es la Intensidad Media Diaria de Vehículos Pesados que se prevee circularán por el carril de proyecto en el año de puesta en

servicio, F es el factor de crecimiento del tráfico de vehículos pesados durante el periodo de proyecto y es el coeficiente de ponderación de cargas de tráfico. Una vez obtenido el tráfico de proyecto (TP) y definida la categoría de la explanada en función de su capacidad soporte, se elige la sección que cumple con los parámetros definidos.

Se muestra a continuación en la tabla 1, la sección que corresponde según dicha Norma a un tráfico de proyecto definido como categoría T0 (TP entre 21,9 y 43,8 en millones) y una explanada con una capacidad de soporte de 125 MPa, definida como EX2. Obteniendo del catálogo la sección de firme:

Tabla 1. Cálculo de la Sección Tipo 1.1 T0-EX2, Norma para el dimensionamiento de Firmes de la Red de Carreteras del País Vasco, 2012.

SECCIÓN TIPO 1.1 T0 EX2		
COMPOSICIÓN DEL FIRME	ESPESOR (cm)	SECCIÓN
MAC tipo discontinua BBTM 11 B	3	M.A.C.
MAC tipo AC bin y base S	30	
ZAHORRA ARTIFICIAL (Base Granular)	25	B.G.
EXPLANADA EX2 (125 Mpa)	-	SUBRASANTE

Si se procediese a realizar los cálculos que sustentan dicho dimensionamiento por el método mecanístico-empírico, en el cual está basada dicha norma, se seguirían los siguientes pasos:

Una vez obtenido el tráfico de proyecto (TP) debe definirse la carga tipo de cálculo. Por una carretera circulan una amplia variedad de vehículos

con diferentes cargas, diferente distribución de cargas por ejes, y otras características. En España se adopta ó se suele adoptar el denominado tráfico equivalente (TE), ejes equivalentes (EE) ó tráfico equivalente de proyecto (TEP) que modela el tráfico acumulado de vehículos pesados durante el periodo del proyecto considerando un eje simple con ruedas gemelas, distancia

entre éstas, radio de carga, presión de contacto y carga.

Para poder estimar los (EE) se deben tener los siguientes datos:

- Intensidad Media Diaria de Vehículos Pesados (IMD_P^{APS}) que circularán por el tramo de carretera a diseñar y su distribución en el año de puesta en servicio.
- Estimación del número acumulado de vehículos pesados (TP) que circularán por el tramo de carretera a diseñar en un periodo de tiempo definido teniendo en cuenta la tasa de crecimiento.
- Coeficiente de equivalencia (CE) en función de la tipología del pavimento; flexible, semiflexible ó semirrígido.

Los parámetros de carga adoptados por el Centro de Experimentaciones de Obras Públicas de España (CEDEX) y el Instituto Técnico de la Vialidad y del Transporte (INTEVÍA) son:

- Tipo de eje: Simple de ruedas gemelas.
- Carga: 128 kn.
- Radio: 11,35 cm.
- Distancia entre ruedas gemelas: 37,50 cm.
- Presión de contacto: 0,80 Mpa.

Los Coeficientes de Equivalencia adoptados por CEDEX-INTEVÍA (CEDEX-INTEVIA, 2010) son para secciones de pavimentos flexibles y semiflexibles de 0,6 y para secciones de pavimentos semirrígidos de 0,8, de acuerdo con “Norma para el Dimensionamiento de Firmes de la Red de Carreteras del País Vasco” (GV, 2012). De esta manera, desarrollando

la ecuación 2 se obtienen los Ejes Equivalentes (EE) del tráfico en función de la tipología del firme:

$$EE (128 \text{ kN}) = TP \cdot CE \quad 2$$

En los Estados Unidos, en el método de diseño de MEPDG-AASHTO 2015, el diseñador tiene la posibilidad de plantear pre-diseños de pavimento que deben ser verificados estructural y funcionalmente para las condiciones de tráfico y medio ambiente durante su vida útil. Con este objetivo se utilizan modelos de predicción de tráfico basados en espectros de carga en vez de Ejes Equivalentes, medio ambiente, caracterización de materiales, respuesta estructural, evolución del deterioro o fallas, y predicción del desempeño (AASHTO, 2015). En el caso de los firmes con superficie de concreto asfáltico en caliente, los modelos de desempeño incluyen:

- Fisuramiento Longitudinal: Falla por fatiga por cargas de tránsito en que las fisuras aparecen usualmente en las huellas del neumático.
- Fisuramiento piel de cocodrilo: Falla estructural por fatiga en donde las fisuras evolucionan de abajo hacia arriba y se manifiestan inicialmente en las huellas del neumático para luego extenderse a lo ancho del carril de tránsito.
- Fisuramiento transversal: Falla que ocurre cuando el pavimento es sometido a cambios bruscos en el gradiente térmico.

- Ahuellamiento o deformación permanente: El ahuellamiento puede ocurrir a nivel de la capa de mezcla asfáltica, base, subbase, o subrasante, por efecto del clima y/o tráfico.
- International Roughness Index (IRI): Este índice representa la regularidad en el perfil longitudinal del pavimento. Estos modelos de desempeño son complejos y requieren de un proceso de calibración para ser adaptados a condiciones locales. Es por ello que para que el MEPDG pueda ser aplicado a una realidad específica con un nivel de confiabilidad adecuado, es necesario contar con una base de datos potente (información climática horaria, caracterización de materiales, tráfico, etc.) y modelos de calibración acordes con el clima, suelos, tráfico y materiales de una región particular (Chang *et al.*, 2008; Chang *et al.*, 2013).

En contraste, el método de diseño de firmes en base a la normativa del País Vasco, incorpora conceptos mecanísticos en su metodología pero utiliza datos y modelos de desempeño más simplificados.

En el dimensionamiento de firmes se pueden dar tres situaciones con respecto a la explanada:

- Que esté definida como un macizo semi-indefinido, de características dadas.
- Que se calcule la explanada mejorada mediante un cálculo independiente.

- Que se calcule la explanada mejorada como parte del firme.

De los planteamientos anteriores los más usuales son los dos primeros.

La tendencia ó regla seguida por las principales Normativas, Agencias e Instituciones españolas en el primer planteamiento es catalogar la explanada y darle una categoría en función del ensayo de Placa de Carga calculando su Módulo de Elasticidad en su segundo ciclo de carga (E_{v2}) ó del Módulo de Young.

Siendo la ecuación 3 que relaciona estos parámetros la siguiente:

$$E = \frac{\pi (1-\nu)}{3} * E_2 \quad 3$$

Siendo para explanadas con materiales sin tratar ó tratadas con S-EST 1, la ecuación 4:

$$E (\nu = 0,35) = 0,9189 * E_2 \quad 4$$

Y para explanadas tratadas con materiales S-EST 2 ó S-EST 3, la ecuación 5:

$$E (\nu = 0,30) = 0,9529 * E_2 \quad 5$$

Con respecto al segundo planteamiento; se mide su capacidad por el ensayo de "Californian Bearing Ratio" (CBR) y se establece una correlación entre éste y el Módulo de Young en función de un coeficiente (C). Siendo la ecuación 6, la que relaciona estos parámetros:

$$E = C * CBR \quad 6$$

Según la Instrucción de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía en el 2007 (COPT, 2007) en el caso de tener que mejorar la explanada bien sea aportando materiales naturales de mejores características, ó bien capas tratadas se procede al cálculo del módulo equivalente del cimientto mediante la expresión 7:

$$E_e = \frac{13150}{d_e \left(\frac{mm}{100}\right)} \quad 7$$

Dónde:

E_e Módulo Equivalente del Cimientto.
 $d_e \left(\frac{mm}{100}\right)$ Deflexión superficial en el centro de la carga obtenida del cálculo analítico con el modelo elástico multicapa, sobre la estructura multicapa formada por las capas de asiento apoyadas en el macizo semi-indefinido de apoyo.

Siendo las propiedades mecánicas de los materiales, las definidas en la “Norma para el Dimensionamiento de Firmes de la Red de Carreteras del País Vasco” (GV, 2012). Por medio del modelo de respuesta y en función del Módulo de Elasticidad y coeficiente de Poisson del material ó los materiales de los cuales está constituida la explanada ó explanada mejorada se calcula la deformación vertical de ésta y posteriormente se calcula la deformación permanente que va sufriendo por las cargas del tráfico

a las cuales va siendo sometida por medio de una Ley de Fatiga.

La ley de fatiga de la explanada se adapta a la ecuación 8 siguiente:

$$\epsilon_v = f_1 * N_d^{-f_2} \quad 8$$

Dónde:

ϵ_v Deformación vertical elástica por compresión de la explanada.
 N_d Número admisible de repeticiones de carga limitado por el valor de la deformación vertical elástica.

f_1 y f_2 Constantes determinadas de pruebas experimentales.

Cada Normativa, Agencia ó Institución estima conveniente utilizar unas constantes determinadas en base a ensayos realizados fijando unos parámetros de carga, propiedades de los materiales, climatología, etc.

A continuación, se describen las propiedades de los materiales que conforman el resto de la estructura del pavimento:

El módulo de elasticidad de la capa granular, que en España se le denomina zavorra artificial, es definido con ensayos de laboratorio y es asumido constante en el tiempo.

Sin embargo, éste varía en función de la capa subyacente aumentando proporcionalmente hasta alcanzar su propio valor máximo.

En España, sirve el ejemplo del CEDEX-INTEVÍA para fijar el módulo de elasticidad de cada capa de material granular acorde al módulo de la capa subyacente se aplica la ecuación 9:

$$E_i = c * E_{i-1}$$

Donde E_i es el Módulo de la capa i en MPa, c es el coeficiente de proporcionalidad en función del tipo de material granular y E_{i-1} es el Módulo de la capa $i-1$ situada debajo de la anterior en MPa. Siendo su límite máximo, el propio valor máximo obtenido en laboratorio. Los valores recomendados por CEDEX-INTEVÍA son para base granular tipo zahorra artificial:

- $c = 3$
- $E_{máx} = 600 \text{ Mpa}$
- $= 0,35$

Con respecto al resto de parámetros, características de los materiales

9 utilizados y leyes de fatiga utilizadas se pueden consultar dichos parámetros en la Norma para el dimensionamiento de firmes de la red de carreteras del País Vasco 2012 “*Secciones de firme en calzada. Definición de materiales.*”

Cálculo de Explanada Mejorada por Deflexión en la Superficie.

Se muestra a continuación en la tabla 2, el cálculo analítico a modo de ejemplo de una de las explanadas mejoradas existentes, tanto con suelos estabilizados como con materiales granulares siguiendo la Norma para el dimensionamiento de Firmes de la Red de Carreteras del País Vasco. 2012:

Explanada Mejorada TIPO EX3

Tabla 2. Cálculo Explanada Mejorada Tipo EX3, Terreno Subyacente Tolerable (0). (Gobierno Vasco, 2012).

TERRENO SUBYACENTE TOLERABLE (0)				
COMPOSICIÓN EXPLANADA	ESPELOR (cm)	E (Mpa)	POISSON	SECCIÓN
SUELO ESTABILIZADO (3)	20	2000	0,25	S-EST 3
SUELO ESTABILIZADO (3)	20	2000	0,25	S-EST 3
SUELO ESTABILIZADO (1)	20	200	0,35	S-EST 1
SUELO TOLERABLE (0)	> 100	30	0,35	0
DEFLEXIÓN (mm/100)				46,70
MÓDULO EXPLANADA E (Mpa)				282
COMPOSICIÓN EXPLANADA	ESPELOR (cm)	E (Mpa)	POISSON	SECCIÓN
SUELO SELECCIONADO (4)	100	400	0,35	4
SUELO ESTABILIZADO (1)	20	200	0,35	S-EST 1
SUELO TOLERABLE (0)	> 100	30	0,35	0
DEFLEXIÓN (mm/100)				54,25
MÓDULO EXPLANADA E (Mpa)				252

Cálculo de Secciones de Pavimento por el Método *Mecanístico-Empírico*

Sección de Pavimento T0-EX3 vida útil del firme con los parámetros
 Se calcula la durabilidad de la definidos. La tabla 3 muestra los
 sección, obteniendo así el periodo de resultados de dichos cálculos:

Tabla 3. Cálculo sección tipo 1.1 T0-EX3, Norma para el dimensionamiento de firmes de la red de carreteras del País Vasco (2012).

SECCIÓN TIPO 1.1 T0 EX3 ^(*)				
CARACTERÍSTICAS DEL TRÁFICO				
IMD _p ^{APS} (por carril de proyecto en el año de puesta en servicio)				4.001
n (vida útil en años)				20
r (tasa de crecimiento)				4%
F (factor de crecimiento)				29,78
Y _T (coef. de ponderación cargas de tráfico)				1
C.E (coef. de equivalencia)				0,6
T.P. (tráfico de proyecto)				4.35E+07
E.E. (ejes equivalentes de 128 KN)				2.61E+07
COMPOSICIÓN DEL FIRME	ESPESOR (cm)	E (Mpa)	COEF. POISSON	SECCIÓN
MAC DISC. BBTM 11 B	3	4000	0,35	M.A.C
MAC AC bin y base S	25	6000	0,33	
ZAHORRA ARTIFICIAL	25	600	0,35	B.G.
EXPLANADA EX3 ^(*)	-	250	0,35	EX3 ^(*)
DEFORMACIONES Y LEYES DE FATIGA				
MBC TIPO S		EXPLANADA EX3 (S.S. TIPO 4)		
ϵ_T	N	ϵ_z	N	
5.990E-05	3.727E+07	1.300E-04	2.182E+08	
PORCENTAJES FATIGAS CONSUMIDAS				
MBC TIPO S		EXPLANADA EX3 (S.S. TIPO 4)		
70,00%		11,96%		

(*) Sólo Secciones de Explanada Mejorada con coronación de suelo seleccionado tipo 4.

Sección de Pavimento T0-EX2. vida útil del firme con los parámetros
 Se calcula la durabilidad de la definidos. Los resultados de dichos
 sección, obteniendo así el periodo de cálculos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Cálculo de la sección Tipo 1.1 T0-EX2, Norma para el dimensionamiento de firmes de la red de carreteras del País Vasco, 2012.

SECCIÓN TIPO 1.1 T0 EX2				
CARACTERÍSTICAS DEL TRÁFICO				
IMD _p ^{APS} (por carril de proyecto en el año de puesta en servicio)				3.952
n (vida útil en años)				20
r (tasa de crecimiento)				4%
F (factor de crecimiento)				29,78
ϵ_r (coef. de ponderación cargas de tráfico)				1
C.E (coef. de equivalencia)				0,6
T.P. (tráfico de proyecto)				4.30E+07
E.E. (ejes equivalentes de 128 KN)				2.58E+07
COMPOSICIÓN DEL FIRME	ESPESOR (cm)	E (Mpa)	COEF. POISSON	SECCIÓN
MAC DISC. BBTM 11 B	3	4000	0,35	M.A.C
MAC AC bin y base S	30	6000	0,33	
ZAHORRA ARTIFICIAL	25	375	0,35	B.G.
EXPLANADA EX2	-	125	0,35	EX2
DEFORMACIONES Y LEYES DE FATIGA				
MBC TIPO S		EXPLANADA EX2		
ϵ_r	N	ϵ_z	N	
6.010E-05	3.682E+07	1.540E-04	1.108E+08	
PORCENTAJES FATIGAS CONSUMIDAS				
MBC TIPO S		EXPLANADA EX2		
70,00%		23,26%		

Diseño de Sección de Pavimento Mediante el Cálculo de Diseño Factorial

El método de diseño factorial, es el estudio en conjunto de las diferentes variables o factores que afectan el desempeño del pavimento. Consideran la interacción entre estas variables, con el objeto, de optimizar la respuesta o variable dependiente.

De acuerdo con el Análisis Crítico del Diseño Factorial 2^k sobre Casos

Aplicados, los diseños factoriales son ampliamente utilizados en experimentos en los que intervienen varios factores para estudiar el efecto conjunto de éstos sobre una variable de interés (Medina & López, 2011)

Según, Diseño Factorial Completo 2^k , para optimizar procesos de fabricación, condiciones de reacción y métodos de análisis entre otros, es necesario conocer que variables influyen significativamente en el

sistema y como lo afectan (Ferré, 2004).

Conforme con Diseños experimentales, las ventajas de la experimentación factorial cuando los factores no son independientes, los efectos simples de un factor varían de acuerdo con la combinación particular de otros factores, con los cuales estos se producen (Cochran & Cox, 1990).

El método basado en el diseño factorial de pavimentos brinda las siguientes ventajas:

- Economía en el material experimental al obtener información sobre todos los factores que intervienen en el diseño.
- Estudio de las diferentes condiciones representadas por un factor en relación con los niveles de otros factores.
- Análisis del estudio de la interacción, es decir, estudio del grado y forma en la cual se modifica el efecto de un factor por los niveles de los otros factores.

Como se ha comentado en la introducción, la hipótesis del presente trabajo consiste en obtener una ecuación que defina la sección de diseño del firme pudiéndose aplicar a un rango definido de parámetros predeterminados. De esta manera, se podría obtener en la etapa de diseño una variedad de secciones alternativas para finalmente elegir la más apropiada para el tráfico esperado y las características de la explanada o subrasante.

Variables de Diseño

En primer lugar, para diseñar el modelo, elegimos las variables que

influyen en el cálculo y dimensión de la matriz. Se establecen como constantes, la capa de MAC tipo discontinua BBTM 11B de 3 cm de espesor y la capa intermedia de base granular de 25 cm de espesor, puesto que son constantes en todas las secciones tipo 1.1 del catálogo en las categorías de tráfico de T00 a T2.

Las variables seleccionadas son:

- Espesor de las MAC de las capas intermedia y de base.
- Módulo de elasticidad de la explanada o subrasante.

Respuesta:

- IMD_p^{APS} correspondiente al tráfico de proyecto (TP) según los parámetros definidos en el ítem 2.

Formación de Matriz de Cálculo Mediante Diseño Factorial

En la sección diseñada mediante métodos mecanístico-empíricos, con dos factores y dos niveles en cada factor, el experimento factorial tendrá, en total cuatro combinaciones de tratamiento y se le denomina “*diseño factorial de $K=2$* ” siendo el número de combinaciones $2^K=2^2=4$.

Es posible incluir más variables en el experimento factorial completo, siendo el número de variables n , el número de combinaciones será $2^K=2^n$.

Se muestran en la tabla 5 los valores requeridos para formar la matriz.

Se fija para las mezclas asfálticas en caliente de las capas intermedias y de base el valor de (+1) que corresponde a un espesor de 30 cm; y como el valor de (-1) que corresponde a un espesor de 25 cm.

De igual manera, se fija como valor de (+1) el que corresponde a una explanada o subrasante $E_3 = 250$ MPa y como valor de (-1) el correspondiente a una explanada o subrasante $E_2 = 125$ MPa.

Tabla 5. Valores necesarios de cálculo según variables para formación de matriz mediante diseño factorial.

MAC capas intermedias y base (cm)	Explanada (MPa)	
(-1)	(+1)	4,001
(-1)	(-1)	-
(+1)	(-1)	3,952
(+1)	(+1)	-

A continuación, se calculan los valores de IMD_p^{APS} , por medio del método mecanístico-empírico, obteniendo los valores mostrados en la tabla 6.

Tabla 6. Valores de cálculo según variables de la matriz mediante diseño factorial.

MAC capas intermedias y base (cm)	Explanada (MPa)	
25	250	4,001
25	125	1,744
30	125	3,952
30	250	8,684

Cálculo de Coeficientes e Interacción entre Variables Mediante Diseño Factorial

Obtenida la matriz necesaria requerida, e ingresando los valores en el programa de software para cálculo mediante diseño factorial, Statgraphic,

se obtienen los coeficientes de la ecuación deseada, así como la interacción existente entre las capas de las mezclas asfálticas en caliente y la explanada o subrasante, ecuación 10 y Fig.1:

$$IMD_p^{APS} = 4595,25 + 1722,75 * MAC + 1747,25 * Explanada + 618,75 * MAC * Explanada$$

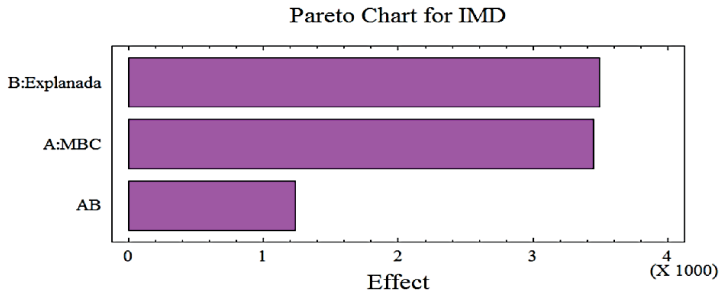


Figura 1. Gráfico de Pareto de interacción de las variables de la ecuación de la sección de firme mediante diseño factorial.

En cuanto a los efectos principales; mezcla asfáltica en caliente y explanada con respecto a la variable a calcular se puede apreciar según la ecuación 10:

Un efecto positivo de la MAC con un valor de 1.722,75 por unidad y un efecto del 37,49% sobre la media.

Un efecto positivo de la explanada o subrasante con un valor positivo de 1.747,25 por unidad y un efecto del 38,02% sobre la media.

Y con respecto a las interacciones entre variables; mezcla asfáltica en caliente y explanada con respecto a la variable a calcular se puede apreciar un efecto positivo en la interacción conjunta de MAC y explanada con un valor de 618,75 por unidad, lo que indica una buena relación entre variables.

Luego, bajo estas premisas, utilizando la ecuación 10 es posible obtener el espesor de la capa de mezcla asfáltica en caliente a partir del tráfico obtenido de una estación de aforo en el intervalo considerado y de los ensayos de capacidad portante de la explanada o subrasante.

Utilizando la ecuación 10 también es posible estimar en qué valor se desea mejorar la capacidad portante de la explanada o subrasante para un tráfico determinado y espesor de mezcla asfáltica; o estimar el tráfico que soportará la sección de firme a partir de la capacidad portante de la explanada y espesor de la mezcla asfáltica.

Al haber limitado los valores a (+1, -1) para homogeneizar las unidades, se deben interpolar los valores reales, y luego de interpolar por Lagrange se obtiene:

- Explanada:
 - E3 (250 MPa) = +1
 - E2 (125 MPa) = -1
- MAC bin y base:
 - 30 cm = +1
 - 29 cm = 0,6
 - 28 cm = 0,2
 - 27 cm = -0,2
 - 26 cm = -0,6
 - 25 cm = -1

Nótese, que en la ecuación 10 cuando los valores de las variables son cero (0), el resultado será el término

independiente puesto que el valor concedido al rango superior es (+1) y el inferior a (-1) correspondiendo este valor a la media aritmética de ambos extremos.

Aspectos éticos

Desde una perspectiva de ética, la aplicación del método factorial en el diseño de pavimentos contribuirá al uso responsable de los recursos disponibles, optimizando las soluciones al implementar, y simplificando al mismo tiempo los procedimientos de cálculo sin poner en riesgo la seguridad de los usuarios o el medio ambiente. La implementación de soluciones óptimas de diseño de pavimentos implica el uso racional de los recursos existentes aplicando de una manera responsable los procesos de ingeniería con la finalidad de contribuir al desarrollo socio-económico sostenible que incluye la protección del medio ambiente. De esta manera, los autores declaran que en el desarrollo de los conceptos y métodos descritos en este artículo se cumplió con toda normatividad ética nacional e internacional.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se muestra en la Tabla 7, los resultados obtenidos de las diferentes secciones en función del espesor de la capa intermedia y de base de las MAC aplicando la ecuación 10 calculada mediante diseño factorial, comprobando la predicción de fatiga para las MAC mediante el método mecanístico-empírico y la estimación de su vida útil.

La primera columna en la Tabla 7 corresponde al espesor de la mezcla asfáltica en caliente (al cual habría que añadir el espesor constante de la capa de rodadura de tres cm. de espesor tipo BBTM 11 B, puesto que al ser constante no se ha considerado al desarrollar la ecuación al no tener valores extremos, pero sí en el diseño de la sección) así como su valor a introducir en la fórmula, puesto que para homogeneizar todas las unidades se han considerado los valores extremos (+1) y (-1) en la ecuación, interpolando los valores intermedios.

La segunda columna corresponde al espesor de la capa granular, que al ser constante no se ha considerado al desarrollar la ecuación, puesto que no tendría valores extremos, pero sí está considerada en el diseño.

Tabla 7. Secciones de firme en función del espesor de las MAC intermedia, base y explanada.

Secciones de Firme en función del espesor de las MAC intermedia y de base mediante Diseño Factorial					
MAC (cm)	Base granular (cm)	Explanada (MPa)	(V_p/d)	Fatiga MAC según M-E (%)	Vida Útil Fatiga MAC 70% según M-E (años)
30,00	25,00	250	8.684	70,00	20,00
1,00		1,00			
30,00	25,00	125	3.952	70,00	20,00
1,00		-1,00			
29,00	25,00	250	7.747	72,43	19,53
0,60		1,00			
29,00	25,00	125	3.510	72,62	19,59
0,60		-1,00			
28,00	25,00	250	6.811	74,47	19,24
0,20		1,00			
28,00	25,00	125	3.069	74,96	19,16
0,20		-1,00			
27,00	25,00	250	5.874	74,63	19,22
-0,20		1,00			
27,00	25,00	125	2.627	75,21	19,11
-0,20		-1,00			
26,00	25,00	250	4.938	73,41	19,44
-0,60		1,00			
26,00	25,00	125	2.186	74,00	19,33
-0,60		-1,00			
25,00	25,00	250	4.001	70,00	20,00
-1,00		1,00			
25,00	25,00	125	1.744	70,00	20,00
-1,00		-1,00			

La tercera columna corresponde a la capacidad portante de la explanada o subrasante y sus valores extremos (+1) y (-1) en la ecuación 10.

La cuarta columna corresponde al resultado de la ecuación 10 sustituyendo los valores de las columnas primera y tercera.

Las columnas quinta y sexta corresponden a una comprobación de la exactitud y validez de la ecuación 10 calculada por el método de diseño factorial analizando la sección por el método mecanístico-empírico según lo

explicado en el ítem 2 con los datos de las columnas primera y segunda.

Los resultados demuestran la similitud de los dos métodos en los resultados, así como la validez y utilidad de dicha ecuación puesto que permite realizar diversos análisis para optimizar el diseño de la sección de firme en función de:

Espesores de las distintas capas que conforman la sección dependiendo de la disponibilidad de estos.

Espesores de las distintas capas que conforman la sección dependiendo

del importe económico de los mismos.

Espesores de las distintas capas que conforman la sección dependiendo de la capacidad portante de la explanada o subrasante mejorando ésta mediante diversos o diferentes procedimientos.

A continuación, discutimos la utilidad y beneficios de implementar el diseño factorial mediante métodos mecanístico-empírico aplicado a pavimentos. De los resultados del análisis realizado, se destaca que se puede obtener cualquier variable utilizando las ecuaciones que son resultado del análisis factorial y aplicarlas para el diseño de pavimentos. Es posible integrar más variables que se consideren como relevantes por el diseñador, y de esta manera analizar la interacción existente entre ellas, con el propósito de obtener una solución optimizada del diseño. Es así, que fijando las variables consideradas como relevantes, se puede obtener la variable deseada de una manera sencilla. La metodología de diseño MEPDG – AASHTO 2015 podría ser aplicada siempre y cuando se cuente con los datos suficientes. Por ejemplo, datos climáticos horarios (temperatura, precipitaciones, radiación solar, velocidad el viento, etc.), parámetros de caracterización del material (propiedades térmicas de ligante, fisuramiento térmico de la mezcla asfáltica, etc.), entre otros. Es importante calibrar los modelos utilizados a las condiciones de tráfico, clima y materiales locales para obtener diseños confiables.

Existen también otros campos de aplicación de la técnica de diseño

factorial que se enumeran, sin ser limitativos. A continuación, a modo de ejemplo:

Cálculo de costos en el periodo de explotación: el método también permite analizar las posibles causas de falla en una sección de firme si se realiza una calibración adecuada de los parámetros implicados, bien variando éstos ó añadiendo parámetros nuevos. También se podrían considerar otras variables como relaciones costo-unidad en peaje en concesiones de carreteras que se pueden combinar con el deterioro del firme por tránsito de vehículos para establecer los periodos óptimos de renovación estructural del firme.

Ensayos de laboratorio: Diseño de mezclas de materiales para optimizar los resultados variando las dosificaciones de cada uno de los componentes hasta obtener una mejor respuesta con el número mínimo de ensayos necesarios.

Dado que hasta la fecha no se tiene conocimiento de la utilización de esta técnica, en los campos mencionados, su aplicación puede tener un gran potencial, permitiendo de esta manera optimizar recursos y obtener mayores beneficios económicos y ambientales en los proyectos en donde sea empleada. Como resultado de su implementación, se logrará ahorrar en las inversiones y garantizará al mismo tiempo el desempeño funcional y estructural de los pavimentos y por consiguiente se mejorará el nivel de seguridad de los usuarios en las redes viales.

Considerando el compromiso ético-social en la práctica profesional de la ingeniería, el mayor de beneficio de aplicar métodos racionales es el de contribuir de una manera responsable y sostenible al bienestar global de la sociedad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). 2015. *Mechanistic-empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice*. American Association of State Highway and Transportation Officials Washington, DC.
- Allen, T.; Chantararat, N. & Taslim, C. 2009. Fractional Factorial Designs that Maximize the Probability of Identifying the Important Factors. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 4: 133-150.
- CEDEX-INTEVIA. 2010. *Dimensionamiento Analítico de Firms*. Madrid.
- Chang-Albitres, C.; Bustos, M.; Delgadillo, R. & Loria, G. 2013. *Aplicabilidad del Método Mecanístico-Empírico de Diseño de Pavimentos (MEPDG) AASHTO 2008 en Latinoamérica*. XVII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Guatemala.
- Chang, C.; Mejia, S.; Valencia, J. Mena, W. & Jaña, C. 2008. *Implementación de la Guía de Diseño Mecanístico- Empírico (MEPDG) – AAHSTO 2008 en Colombia y Perú*. VIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Argentina.
- Cochran, G. & Cox, G. 1990. *Diseños Experimentales*. Ed. Trillas, cap 5, pp.177-182. México.
- Consejería de Obras Públicas y Transportes (COPT). 2007. *Instrucción para el Diseño de Firms de la Red de Carreteras de Andalucía*. COPT. Andalucía.
- Ferré, J. 2004. *El diseño factorial completo 2^k*. *Técnicas de Laboratorio*, 292: 430-434.
- Gobierno Vasco (G:V). 2012. *Norma para el Dimensionamiento de Firms de la Red de Carreteras del País Vasco*. Departamento de Vivienda, Obras Públicas y Transporte. Vitoria-Gasteiz.
- Medina, P. & López, A. 2011. *Análisis Crítico del Diseño Factorial 2^k sobre Casos Aplicados*. *Sciencia et Technica*, 18: 101-106.
- Ministerio de Fomento (MF). 2003. *Orden FOM/3460/2003 de 28 de noviembre por la que se aprueba la Norma 6.1 IC Secciones de Firme de la Instrucción de Carreteras* Secretaría de Estado de Infraestructuras. Dirección General de Carreteras. BOE núm. 297. Madrid.

Received February 12, 2019.

Accepted March 31, 2019.