

DIMENSIONAMIENTO ANALITICO DE FIRMES DE CARRETERA

RAMON CRESPO DEL RIO
Centro de Estudios de Carreteras (CEDEX)

1. INTRODUCCION.

La ingeniería de firmes constituye una rama fundamental de la ingeniería de carreteras. Actualmente, y a nivel mundial, considerar el firme como una estructura resistente, analizando las tensiones y deformaciones que se producen en ella, es el camino más fructífero y potente para poder acceder a un mayor y mejor conocimiento del mismo. Cualquier Administración, Agencia u Organización dedicada al tema ha elaborado y desarrollado su propio método de dimensionamiento analítico; incluso organizaciones tan proclives al empirismo como el Instituto del Asfalto, o la Administración Federal Americana, han dedicado importantes esfuerzos al dimensionamiento analítico o estructural.

En nuestro país se ha avanzado poco en este camino; salvo aislados esfuerzos de diversos profesionales llevados a cabo de forma individual, no se ha utilizado hasta la fecha el dimensionamiento analítico como una metodología de trabajo para el diseño y construcción de los firmes de carreteras.

Este recelo o ausencia de dedicación a esta técnica viene motivado porque, al nivel actual del conocimiento, resulta difícil predecir la duración del firme, debido a la dificultad de elegir un modelo y unos parámetros adecuados. A pesar de estas incertidumbres, los métodos racionales permiten, a nivel de comparación entre diseños alternativos, predecir la estructura más competente o la solución más adecuada a las necesidades de proyecto o constructivas existentes.

Intentando corregir y modificar esta situación, el Centro de Estudios de Carreteras (CEC) del CEDEX, se ha planteado la utilización y sistematización de los métodos analíticos para el dimensionamiento de firmes.

En estos momentos el CEC ha comenzado a desarrollar las siguientes fases de actuación:

- Recopilación y análisis de la técnica;
- Selección y estudio de programas de cálculo;
- Adaptación y puesta a punto de programas disponibles;
- Preparación de una metodología de dimensionamiento española;
- Aplicación a diversos trabajos.

Estas fases se van elaborando, sin dejar de atender a las necesidades puntuales o sistemáticas de colaboración con otros organismos de la Administración Central o con otras Administraciones u Organizaciones, en particular con la Dirección General de Carreteras del MOPU a través de su Área de Tecnología.

2. APLICACIONES ACTUALES

Los programas de cálculo disponibles y operativos en los soportes informáticos del CEDEX son:

- Programa J.B.B.
- Programa VARIS/PME
- Programa CEC (Chevron)

El más potente entre ellos es el CEC (Chevron), que es una adaptación del programa Chevron NL con una serie de mejoras, aún no totalmente desarrolladas, consistentes en la posibilidad de introducir:

- Cargas dobles o múltiple,
- Subrutinas para calcular módulos variables en función de características de los tipos de capas,
- Subrutinas para determinar número de ejes equivalentes (N) en función de leyes de fatiga,
- Mejora de los formatos de salida y presentación de resultados.

El programa CEC (Chevron) es el que se ha utilizado en la elaboración y comprobación del

"Catálogo de firmes para Autovías", de reciente difusión, incluido dentro del un trabajo más amplio de revisión de las instrucciones 6.1.L.C., 6.2.1.C. y 6.3.1.C., actualmente en desarrollo. Mediante el programa CEC (Chevron) se han modelizado y analizado más de 120 secciones tipo, para finalmente obtener 20, estructuralmente próximas dentro de cada categoría de tráfico y explanada consideradas. También se ha procedido a realizar un análisis de sensibilidad tensional de tres tipos de estructuras a las variaciones de la capacidad de soporte de la explanada del firme.

3. SISTEMATICA DEL DIMENSIONAMIENTO ANALITICO

En la mayor parte de los análisis y/o dimensionamientos de firmes realizados en el Centro de Estudios de Carreteras, se procede de la siguiente manera:

1. Selección de alternativas de diseño, definiendo:
— Tipos de capas o materiales que constituyen la sección.
— Variación de espesores posibles y/o recomendables.

2. Caracterización de las capas, definiendo o calculando:
— Módulo de elasticidad y/o rigidez.
— Coeficiente de Poisson.
— Espesor de cálculo a comprobar.

3. Decisión sobre parámetros de carga, ambientales y otras consideraciones:
— Tipo y valor de la carga (carga única, carga múltiple, eje standard, otro).
— Valor más representativo de la presión de contacto (respecto a la presión de inflado).
— Condiciones sobre la unión entre capas (Adherencia total, parcial o nula).
— Condiciones climáticas (influencia y profundidad del gradiente de temperaturas en las mezclas bituminosas, y de la variación de la humedad en la explanada).

4. Determinación de las coordenadas r, z de los puntos donde interesa evaluar el estado tensional:
— Bajo el centro de la carga, entre cargas, en el borde de la carga.
— En las fibras superiores e inferiores de las capas.
— En fibras intermedias en función de las relaciones entre módulos.

5. Análisis tensional de los resultados del cálculo, evaluando:
— Deformación máxima horizontal a tracción en la fibra inferior de las mezclas bituminosas.

— Deformación máxima vertical a compresión en la explanada y en las capas granulares.

— tensión máxima a tracción en las fibras inferiores de las capas tratadas con ligantes hidráulicos.

— Deflexión máxima en superficie.

6. Aplicación de leyes de fatiga y de hipótesis de Miner para la estimación de la duración de la vida de la estructura analizada:

— Ley de fatiga para mezclas bituminosas.

— Ley de fatiga de la explanada.

— Ley de fatiga o relación porcentual entre tensión máxima y tensión admisible para materiales tratados con cemento.

4. VALORES Y CARACTERISTICAS INTRODUCIDAS EN EL CALCULO DE SECCIONES DE FIRMES DE AUTOVIAS

En el trabajo a que nos venimos refiriendo se han utilizado los siguientes tipos y características de los materiales:

4.1. TIPOS DE CAPAS

— Mezclas Bituminosas en Caliente.

• Rodadura.

• Intermedia.

• Base.

— Hormigón Compactado.

— Grava-cemento.

— Suelo-cemento.

— Zahorra artificial.

— Zahorra natural.

4.2. ESPESORES.

— Mezclas Bituminosas 8-15-20-22-25-30-35 cm.

— Capas con Cemento 12-20-22-25 cm.

— Materiales Granulares 20-25-40 (2 × 20)-50 (2 × 25) cm.

4.3. MODULOS Y COEFICIENTES DE POISSON.

— Mezclas bituminosas.

• E = 3.000 Mpa para 25 °C.

• E = 6.000 Mpa para 15 °C o profundidades mayores a 15 cm.

• E = 10.000 Mpa para 5 °C.

• Coeficiente de Poisson, 0,35.

— Materiales tratados con cemento.

• Hormigón compactado, E = 25.000 Mpa.

• Grava-cemento, E = 15.000 Mpa.

• Suelo-cemento, E = 6.000 Mpa.

• Coeficiente de Poisson, 0,25.

— Materiales Granulares.

• El módulo de una capa se determina en función de su espesor y del módulo de la capa inferior; E = f (h, E_i) limitando su valor máximo a 1.000 Mpa.

• Coeficiente de Poisson, 0,35.

— Explanada

• El módulo se determina en función de la capacidad soporte estimada mediante el índice CBR del material que constituye la explanada; $E = k \cdot \text{CBR}$.

• Coeficiente de Poisson, 0,40.

5. EJEMPLO DE SALIDA Y DE ANALISIS DE RESULTADOS

Se adjunta una salida tipo de un caso estudiado mediante el programa CEC (Chevron) correspondiente a una sección de 35 centímetros de mezcla bituminosa sobre 20 centímetros de zorra artificial apoyada sobre una explanada caracterizada por un CBR de 8.

La mezcla bituminosa se ha dividido en dos capas, la superior de 15 cm afectada por las condiciones climáticas previstas (Hipótesis de verano 25 °C) con un módulo de rigidez de 30.000 Kp/cm²; el resto del espesor (20 cm) se caracteriza por un módulo de 60.000 Kp/cm².

La hipótesis de carga corresponden a una carga única (rueda simple) de 6.500 Kg. con una presión de contacto de 9 Kp/cm².

Los valores máximos de los parámetros se obtienen para $r = 0$ y son:

$$\epsilon_r = 84 \times 10^{-4} \text{ (mm/mm)}$$

$$\epsilon_z = 212 \times 10^{-4} \text{ (mm/mm)}$$

Las leyes de fatiga aplicadas para obtener el número de repeticiones de carga admisible fueron:

— Mezclas bituminosas: Ley de la Shell

$$\times (0,856 \times V_b + 1,08) S_{mix}^{-0,36} \times N^{-0,12}$$

aplicada a una base asfáltica con las siguientes características:

% de betún B = 4,0

% huecos en mezcla h = 10, que con unos áridos de densidad relativa 2,65 T/m³, betún de 1,02 T/m³ y para un módulo de 60.000 Kp/cm², proporciona la siguiente expresión de la ley de fatiga:

$$\epsilon = 2,523 \times 10^{-3} \times N^{-0,12}$$

— Explanada: Se adoptó la ley de Brown y Pell cuya expresión es:

$$\epsilon = 2,16 \times 10^{-3} \times N^{-0,28}$$

Estas leyes aplicadas a los valores obtenidos del cálculo tensional, proporcionan los siguientes valores de N:

$$N_{adm} = 24,4 \times 10^6 \text{ (M.B)}$$

$$N_{adm} = 13,9 \times 10^6 \text{ (Exp)}$$

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se ha esbozado resumidamente la metodología de trabajo seguida en el Centro de Estudios de Carreteras en la práctica del dimensionamiento analítico de firmes de carretera.

Conviene concluir diciendo que esta sistemática se está depurando y refinando para:

— Adaptarse a las últimas innovaciones y mejoras técnicas del cálculo estructural de firmes.

— Confeccionar un procedimiento español de aplicación general al dimensionamiento.

PARAMETROS DE ENTRADA			
NUMERO DE CAPAS	4		
TIPO DE CARGA	RUEDA SIMPLE		
CARGA POR RUEDA	6500.00 KP		
PRESION DE CONTACTO	9.00 KP/CM²		
RADIO DE CARGA	15.16 CM		
SISTEMA MULTICAPA			
CAPA	E (KP/CM²)	POISS.	H (CM.)
1	30000.0	0.35	15.00
2	60000.0	0.35	20.00
3	1700.0	0.35	20.00
EXPL.	800.0	0.40	INFINITO

CUADRO 1. Secciones estructurales de firmes de autovía

CARRETERAS Y AEROPUERTOS

CAPA	TENSIONES (KP/CM ²)						DEFLEXIONES (MM/100)	DEFORMACIONES (MICRAS/METRO)				
	R	Z	TZ	TT	TR	TRZ	DEFX	DZ	DT	DR	DRZ	DMT
1	0.00	0.00	9.0000	9.6401	9.6401	0.0000	38.090550	75.06	103.87	103.87	0.00	75.06
	0.00	-15.00	-5.8231	-3.0159	-3.0159	0.0000	35.891750	-123.73	-2.59	-2.59	0.00	-2.59
2	0.00	15.00	-5.8231	-2.8964	-2.8964	0.0000	35.891750	-63.26	-2.59	-2.59	0.00	-2.59
	0.00	-35.00	-0.3336	7.5488	7.5488	0.0000	34.596590	93.63	83.72	83.72	0.00	83.72
3	0.00	35.00	-0.3336	0.0393	0.0393	0.0000	34.596600	-212.43	83.72	83.72	0.00	83.72
	0.00	-55.00	-0.1824	0.1097	0.1097	0.0000	31.183880	-152.46	79.50	79.50	0.00	79.50
EXP	0.00	55.00	-0.1824	-0.0156	-0.0156	0.0000	31.183870	-212.39	79.50	79.50	0.00	79.50

CUADRO 2. Resultados del análisis tensional.



**Librería
Ciencia-Industria, S. L.**

Plaza de San Juan de la Cruz, 3
Teléfonos: 234 85 56 y 233 75 43
28003 Madrid

PEDIDOS: Contra reembolso ☐ — Cheque adjunto ☐

FUNDAMENTALS OF TRANSPORTATION ENGINEERING.

Papacostas, C.S. —1993—
1987 Ed. 458 págs. 10.282 IVA INCLUIDO

CONTENIDO: Introduction - Vehicle Motion, Human Factors, and Geometric Design - Vehicular Flow Models - Capacity analysis of Actual Systems - Flow Interruptions - Probability, Queuing, and Simulation Models - Transportation Planning - Sequential Demand-Forecasting Models - Alternative Planning Models and structures - Air Quality, Noise, and Energy Impacts - Evaluation and Choice - Appendix - Index.

HIGHWAY ENGINEERING. 5ed.

Wright, P.H. —1997—
1987 ed. 717 págs. 13.992 IVA INCLUIDO

CONTENIDO: Introduction - Highway administration - Driver, Pedestrian, and vehicle characteristics - Highway evaluation - Traffic characteristics - Transportation Planning - Computer Application in Highway engineering - Geometric design of highways - Intersections, interchanges, terminals - Highway mass transit facilities - Drainage and drainage structures - Etc.

HYDROSOFT. 86 - HYDRAULIC ENGINEERING SOFTWARE.

RADOJKOVIC, M.C.A. BREBBIA —1984—
1986 523 págs. 16.430 IVA INCLUIDO

CONTENIDO: Software for Hydraulics, Open Channel Flow, Flood Plains & Routing, Total Flow and Circulation Problem Hydraulic Structures, Computer Aided Experimenting & Control, Groundwater Flow, Hydraulic Software Codes, Water Supply & Sewer Networks.

BANCO ESTADISTICO DE COSTES DE LA CONSTRUCCION. Precios 1987

Pasarin Ruiz, S. —20124—
1987 Ed. 1.227 págs. 16.000 IVA INCLUIDO

CONTENIDO: Transportes - Derrivos - Estudios geotécnicos - Movimientos de tierras - Cimentaciones - Pavimentos de base - Muros de hormigón - Estructuras de hormigón - Estructuras de acero y maderas - Estructuras de madera - Cubiertas - Paredes de Cerámica - Paredes de obra silicocalcareas - Paredes de Mampostería - Paredes de bloques de mortero - Arcos y bóvedas - Etc.