

Título del trabajo

**INFLUENCIA DEL TIPO DE AGREGADO EN LA SEPARACIÓN ENTRE JUNTAS EN
PAVIMENTOS DE HORMIGÓN SIMPLE**

Nombre y Apellido de los autores

Diego H. Calo, Matias J. Camueira, Maria Paz Iribarren.

Dirección postal completa

San Martín Nº 1137 – 1º Piso – Ciudad Autónoma de Buenos Aires

Número de teléfono / fax

(54-11) 4576 7690

Dirección de correo electrónico

diego.calo@icpa.org.ar

INFLUENCIA DEL TIPO DE AGREGADO EN LA SEPARACIÓN ENTRE JUNTAS EN PAVIMENTOS DE HORMIGÓN SIMPLE

Diego H. Calo, Matias J. Camueira, María Paz Iribarren

Departamento Técnico de Pavimentos, Instituto del Cemento Portland Argentino

Palabras clave: coeficiente expansión térmica; alabeo; separación entre juntas

RESUMEN

Un aspecto muy significativo a tener en cuenta en el diseño de juntas de los pavimentos de hormigón simple es el tipo de agregado utilizado en su ejecución. Esto se debe específicamente a la marcada influencia que tiene el agregado en el módulo de elasticidad y en el coeficiente de expansión térmica del hormigón, parámetros que son preponderantes en el desarrollo de las tensiones de alabeo, originadas por los cambios de temperatura a los que se encuentran sometidas las losas de pavimento.

Para la determinación de la separación de juntas más conveniente existen diferentes reglas prácticas que permiten establecer, en función de la experiencia global disponible, una estimación a partir del espesor de calzada y del tipo de base empleado en el diseño estructural y no tienen en consideración la implicancia de los materiales en uso.

Este trabajo analiza la influencia de las características de distintos agregados típicamente empleados en nuestro país, en el desarrollo de las tensiones de alabeo y, a partir de allí, se presenta una metodología simplificada que permite orientar al diseñador en la determinación de la separación entre juntas más apropiada, teniendo en cuenta el tipo de agregado empleado en la elaboración del hormigón.

INTRODUCCIÓN

En el diseño de pavimentos de hormigón, un parámetro importante a tener en cuenta es la separación de juntas ya que ellas determinan el tamaño de las losas de calzada, permitiendo controlar el desarrollo de tensiones de alabeo por cambios de temperatura y de humedad.

Múltiples factores influyen en la determinación de separación entre juntas más convenientes, tales como la rigidez de la base, el espesor de calzada, el módulo de elasticidad del hormigón, las condiciones climáticas y el tránsito. A raíz de esto, resulta una buena práctica observar el comportamiento de vías de características similares en el lugar de ejecución de la obra, con el fin de tener en cuenta las características de los materiales locales y las condiciones climáticas presentes en el sitio de emplazamiento. Cuando no se cuenta con

dicha información, la American Concrete Pavement Association [1] recomienda la utilización de una regla práctica (ec-1) para la determinación de la máxima separación entre juntas.

$$Sep.max=K \cdot e$$

ec-1

Siendo:

e: espesor de calzada.

$$K = \begin{cases} 21 & \text{para bases tratadas (con cemento o asfalto);} \\ 24 & \text{para bases no tratadas o granulares.} \end{cases}$$

Según puede observarse, la regla propuesta tiene en cuenta la influencia de la rigidez de la base en el fenómeno, aunque no tiene en consideración el Coeficiente de Expansión Térmica y el Módulo de Elasticidad del Hormigón. Sendos parámetros intervienen en el comportamiento del pavimento de hormigón en servicio ya que afectan las tensiones que se producen por alabeo térmico de las losas de pavimento.

En este sentido, podría adoptarse que la fórmula propuesta es válida únicamente para un conjunto de materiales mientras que, para hormigones elaborados con agregados de diferentes mineralogías, esta relación podría variar en función de sus características.

INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DE HORMIGONES ELABORADOS CON AGREGADOS DE DISTINTOS ORIGENES EN LAS TENSIONES DE ALABEO

Las propiedades físicas y mecánicas del hormigón se ven alteradas, entre otros parámetros, por las características de los agregados empleados en su elaboración. Esto se refleja en el trabajo “Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de hormigones elaborados con distintos tipos de agregados para su empleo en calzada de hormigón” [2] donde se elaboraron hormigones con idéntico objetivo de resistencia a la compresión a 28 días de edad, utilizando distintos tipos de agregados gruesos utilizados comúnmente en Argentina.

Se presentan en la Tabla 1 los Módulos de elasticidad y los Coeficientes de expansión térmica obtenidos para los diferentes hormigones en el estudio mencionado. Allí se puede observar que a igual resistencia a compresión existen significativas variaciones (de hasta 30%) en el Módulo de elasticidad y en el Coeficiente de expansión térmica.

Tabla 1: Módulo de elasticidad y coeficiente de expansión térmica del hormigón empleando agregados gruesos de distinto origen [2].

Agregado Grueso	E [GPa]	CET [10⁻⁶1/°C]
Canto Rodado Silíceo (CRS)	43,7	12,3
CRS triturado (CRST)	38,1	11,7
P. Partida Granítica (PPG)	34,2	9,3
P. Partida Basáltica (PPB)	36,5	8,8
P. Partida Dolomítica (PPD)	41,1	10,4
C. Rodado Patagonia (CRP)	41,6	8,9
CRP Triturado (CRPT)	36,7	9,0
CRS + Basalto (CR + B)	41,0	10,7

Luego, a modo de ejemplificar la incidencia de las propiedades antes descritas en las tensiones interiores de alabeo, se ha procedido a efectuar una estimación de las mismas, considerando un determinado caso de estudio y el empleo de los distintos tipos de agregados gruesos mencionados en la Tabla 1. Al efecto, se ha modelado una losa de 25 cm de espesor con una separación entre juntas transversales de 4,5 m y un ancho de losa de 3,65 m; la que se encuentra sometida a un gradiente lineal de temperatura de 10°C.

Para la evaluación se han considerado dos escenarios alternativos en función de la rigidez de apoyo. Se ha adoptado, por un lado, un módulo de reacción correspondiente a una condición donde el pavimento cuenta con una base no tratada o granular ($k= 60$ MPa/m) y, alternativamente, un valor correspondiente a una base tratada con cemento ($k= 120$ MPa/m). Este análisis se condujo sin tener en cuenta los fenómenos de fluencia del material.

Para la estimación de las tensiones de alabeo generadas por cambio de temperatura se empleó la fórmula propuesta por Bradbury [3] para la determinación de las tensiones interiores de alabeo.

$$\sigma_x = \frac{E \cdot CET \cdot \Delta T}{2 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot (C_x + \mu \cdot C_y) \quad \text{ec-2}$$

Siendo:

E: Módulo de elasticidad del hormigón

CET: Coeficiente de Expansión Térmica

ΔT : Diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo de la losa

μ : Relación de Poisson (~0.2)

C_x, C_y : Coeficiente de corrección para losa de dimensión finita (función de B_x/L y B_y/L)

Bx, By : Máxima dimensión en la dirección x, y

L: radio de rigidez relativa

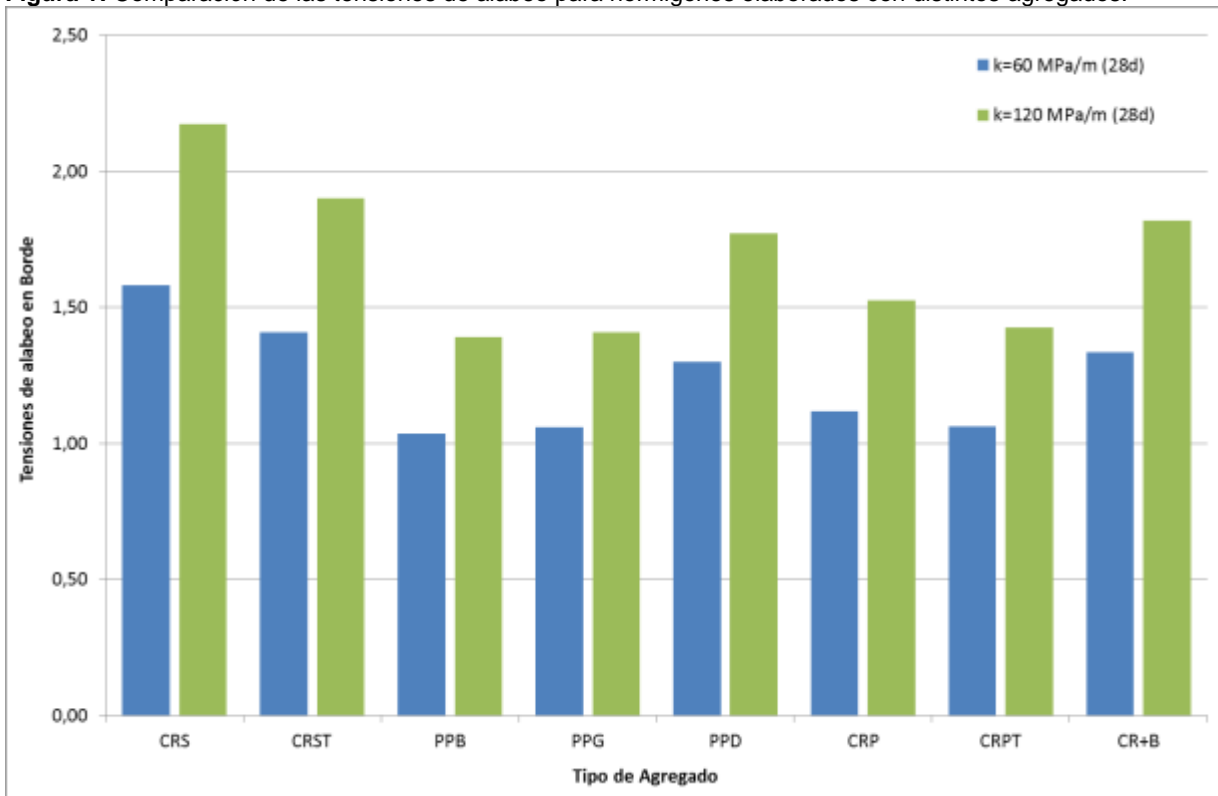
$$L = \sqrt[4]{\frac{E \cdot e^3}{12 \cdot (1 - \mu^2) \cdot k}} \quad \text{ec-3}$$

e: espesor de calzada

k: Módulo de reacción en el plano de apoyo

En la Figura 1 se representan las tensiones de alabeo determinadas para cada tipo de agregado grueso analizado, para ambas condiciones de rigidez de apoyo mencionadas anteriormente.

Figura 1: Comparación de las tensiones de alabeo para hormigones elaborados con distintos agregados.



Según puede observarse, el desarrollo de tensiones por este fenómeno presenta variaciones muy significativas en función del tipo de agregado empleado, poniendo en evidencia la fuerte incidencia del Coeficiente de Expansión Térmica (CET) y del Módulo de Elasticidad (E). Si se compara el caso del Canto Rodado Silíceo (CRS) con la Piedra Partida Granítica o Basáltica, los mayores valores de CET y E del hormigón elaborado con CRS se traducen también en el desarrollo de tensiones de alabeo un 60% superiores a las correspondientes a los hormigones con PPG y PPB.

INFLUENCIA DEL TIPO DE AGREGADO EN LA SEPARACIÓN ENTRE JUNTAS DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN SIMPLE

En función de lo anteriormente descrito, el objetivo del presente trabajo es incorporar una metodología para el diseño de juntas que tenga en consideración la influencia del tipo de agregado empleado en la elaboración del hormigón y, de este modo, controlar eficazmente el desarrollo de tensiones de alabeo.

Para ello, y considerando el análisis de tensiones efectuado en el punto anterior, se ha propuesto adoptar que la relación propuesta por la American Concrete Pavement Association (Ec-1) es válida para el caso de Piedra Partida Granítica, ya que con este agregado (al igual que con la Piedra Partida Basáltica) se obtienen los menores valores de tensiones de alabeo, en comparación con el resto de los agregados analizados. Esto permite ubicarnos del lado de la seguridad para el análisis del universo de casos restantes.

Adoptando a la Piedra Partida Granítica como material de comparación, se propone determinar la separación de juntas que debería adoptarse con el resto de los agregados, para que las tensiones de alabeo coincidan con las originadas por este material de referencia.

Para ello, se analizaron losas cuadradas y 4 espesores de losas distintos (15 cm, 20 cm, 25 cm y 30 cm), apoyadas sobre bases no tratadas o granulares ($k= 60$ MPa/m) y bases tratadas con cemento ($k= 120$ MPa/m). Se ha adoptado además, como condición de estudio, que en todos los casos las losas se encuentran sometidas a un gradiente lineal de temperatura de 10 °C en la sección de hormigón.

En este sentido, se ha establecido como condición base de comparación que las losas ejecutadas con Piedra Partida Granítica cuentan con un tamaño de losa donde se cumple la condición establecida en la ecuación 1, tanto para la condición de base granular como cementada.

Luego, el trabajo consistió en determinar las tensiones de alabeo inducido mediante la aplicación de la fórmula de Bradbury para la condición base y a continuación los tamaños de losa necesarios para los distintos agregados restantes que permitirían equiparar el nivel de tensiones de alabeo con la determinada para el agregado granítico.

Las separaciones entre juntas (o largo de las losas) determinados mediante esta metodología para los distintos tipos de agregados analizados en este estudio, se resumen en las Tablas 2 y 3, considerando la condición de base cementada y granular respectivamente.

Tabla 2: Separación entre juntas para pavimentos de hormigón sobre base cementada, con distintos agregados y similar tensión de alabeo que utilizando PPG (calculadas con la fórmula de Bradbury).

Cementada	Separación [m]							
Espesor [m]	PPG	PPD	CRP	CRPT	CRS	CRST	CR+B	PPB
0,150	3,15	2,74	2,98	3,11	2,48	2,63	2,70	3,17
0,200	4,20	3,55	3,90	4,12	3,20	3,41	3,50	4,22
0,250	5,25	4,34	4,80	5,12	3,89	4,15	4,27	5,26
0,300	6,30	5,10	5,67	6,10	4,54	4,87	5,01	6,30

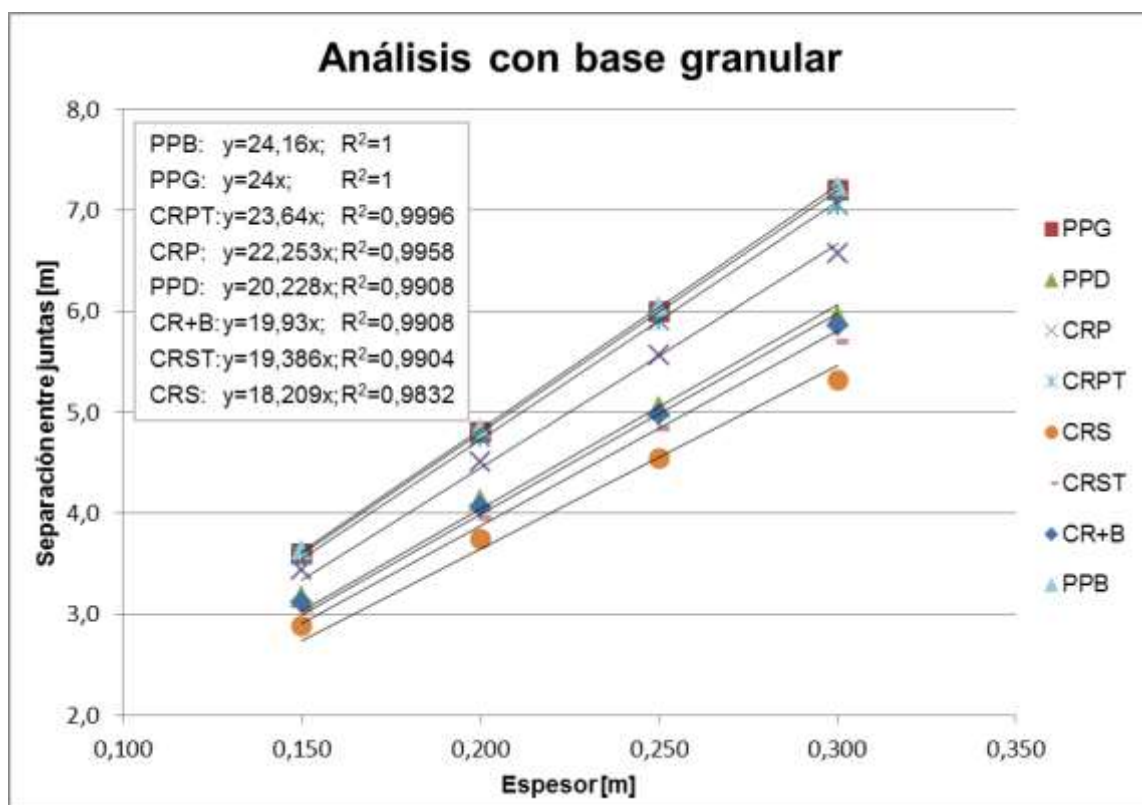
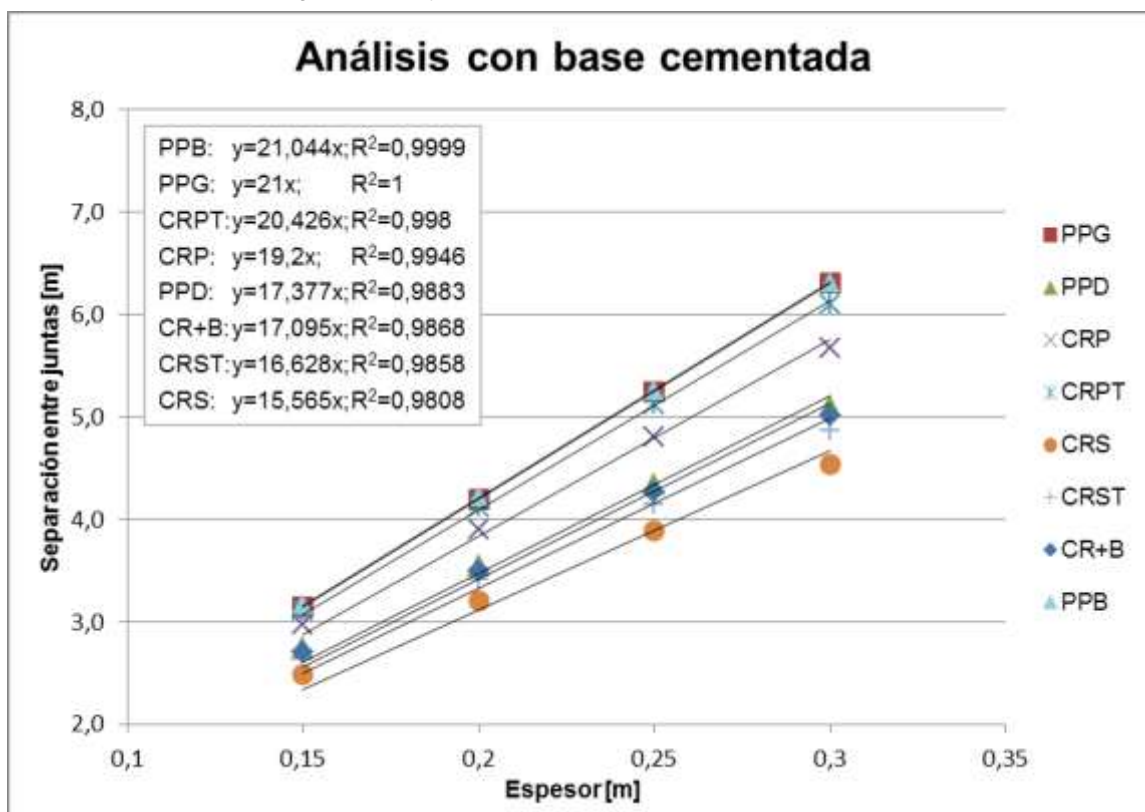
Tabla 3: Separación entre juntas para pavimentos de hormigón sobre base granular, con distintos agregados y similar tensión de alabeo que utilizando PPG (calculadas con la fórmula de Bradbury).

Granular	Separación [m]							
Espesor [m]	PPG	PPD	CRP	CRPT	CRS	CRST	CR+B	PPB
0,150	3,60	3,17	3,44	3,58	2,89	3,04	3,12	3,63
0,200	4,80	4,13	4,51	4,75	3,74	3,96	4,07	4,84
0,250	6,00	5,05	5,57	5,91	4,55	4,84	4,98	6,04
0,300	7,20	5,95	6,58	7,06	5,32	5,70	5,86	7,24

En la Figura 2 se representan gráficamente los valores de separación entre juntas en función del espesor de calzada analizado para la condición de base cementada y granular respectivamente. Según puede observarse, para cada tipo de agregado, la máxima separación entre juntas determinada conserva una variación perfectamente lineal con el espesor de calzada. La pendiente de dicha recta representaría entonces el factor K “ajustado” en función de las características del agregado empleado, para condición de base cementada y granular según corresponda.

Se destaca que para determinar la línea de tendencia que mejor ajusta a estos valores, se ha establecido como condición que la misma debe ajustarse también al origen al igual que lo hace la condición base de comparación.

Figura 2: Relación espesor vs separación entre juntas, para pavimentos hormigón sobre base cementada (arriba) y base granular (abajo), elaborados con distintos agregados, con similares tensiones de alabeo que utilizando PPG, calculadas según Bradbury.



Mediante el análisis de regresión lineal de la separación entre juntas en función del espesor de losa, se obtuvo el coeficiente “K” que relaciona estas variables, para cada tipo de agregado. Estos valores se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4: Valores de “K” obtenidos gráficamente para pavimentos de hormigón elaborados con distintos agregados, adoptando la PPG como base para igualar las tensiones de alabeo.

	K: relación (separación entre juntas) / (espesor de losa)							
	PPG	PPD	CRP	CRPT	CRS	CRST	CR+B	PPB
Base cementada	21*	17,38	19,20	20,43	15,57	16,63	17,10	21,04
Base granular	24**	20,23	22,25	23,64	18,21	19,39	19,93	24,16

(*) K=21 valor propuesto por la ACPA para bases cementadas

(**) K=24 valor propuesto por la ACPA para bases granulares o no tratadas

Asimismo, y con el objetivo de validar los resultados obtenidos, se repitió el mismo análisis utilizando el programa EverFE de elementos finitos [4], el cual es un software desarrollado conjuntamente por las Universidades de Maine y Washington para la modelación 3D de losas de hormigón que permite simular la respuesta de un pavimento de hormigón simple sometido a cargas de tránsito y ambientales.

Los resultados obtenidos por este medio se resumen en las Tablas 5 y 6, y se presentan gráficamente mediante la Figura 3.

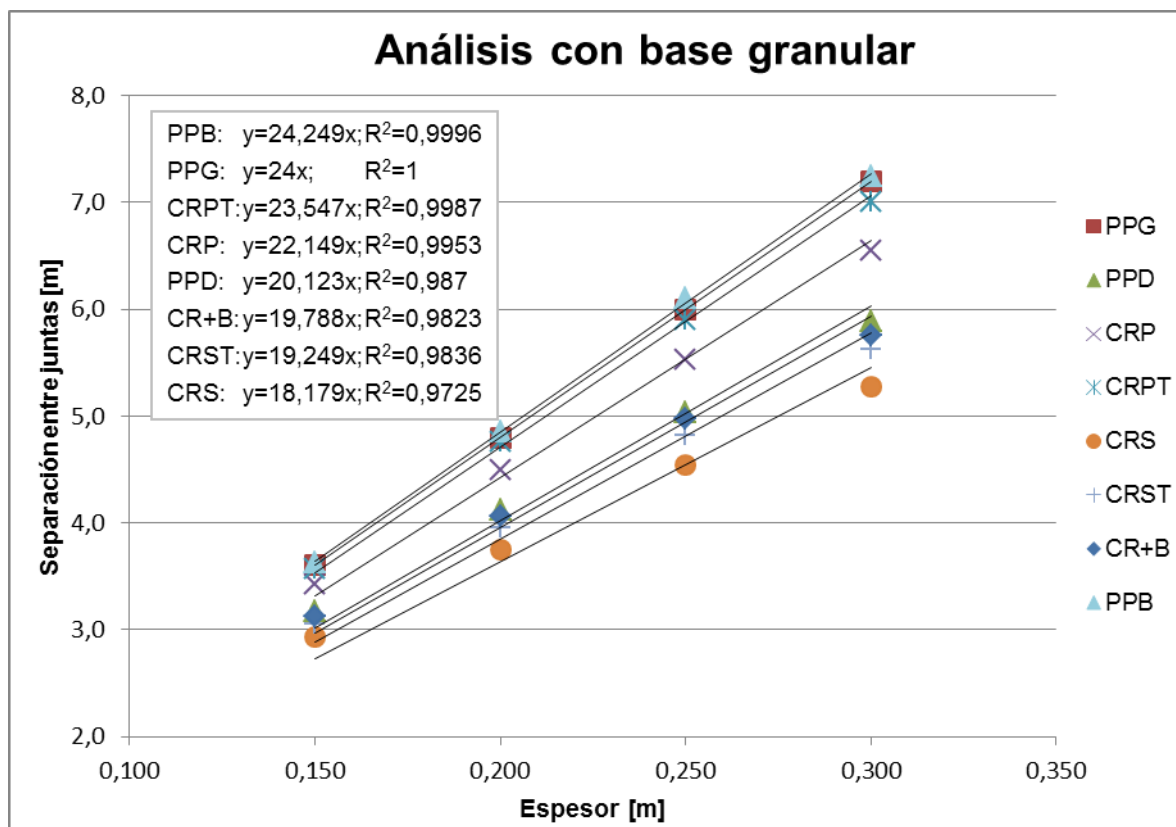
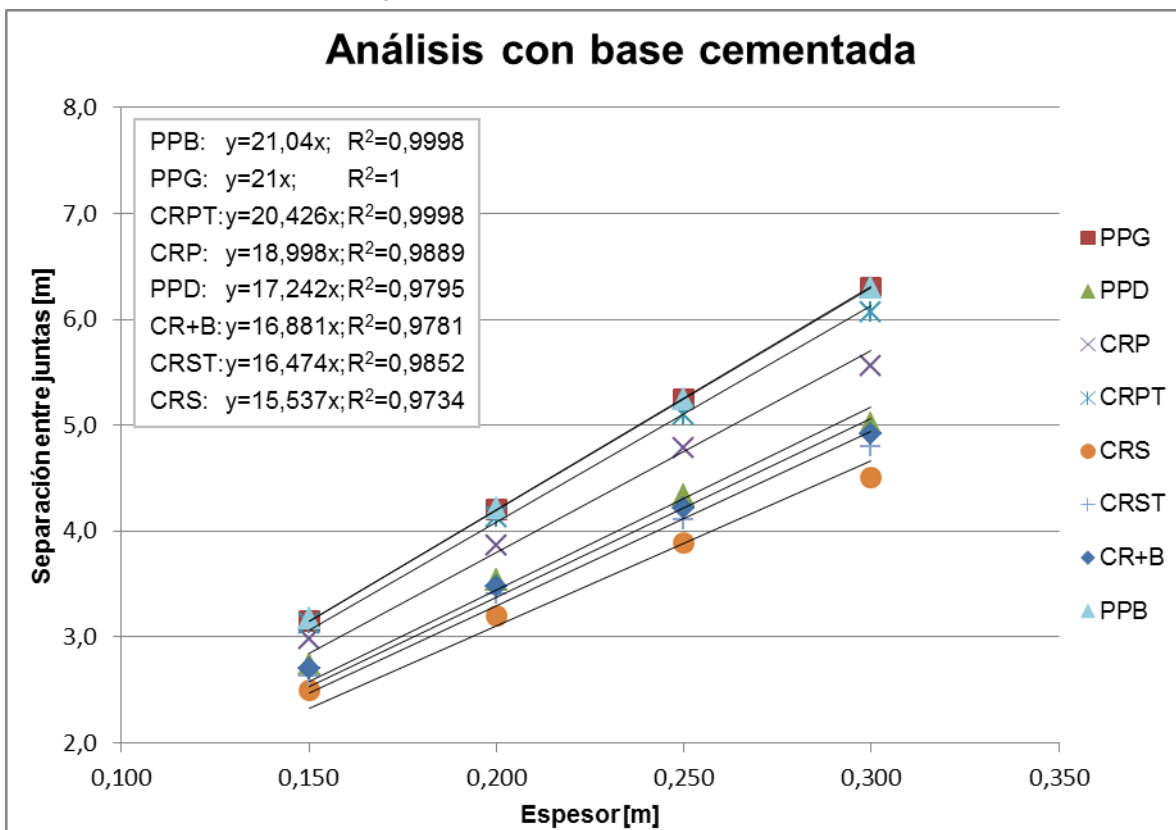
Tabla 5: Separación entre juntas para pavimentos de hormigón sobre base cementada, con distintos agregados y similar tensión de alabeo que utilizando PPG (obtenidas con el programa EverFE).

Cementada	Separación [m]							
Espesor [m]	PPG	PPD	CRP	CRPT	CRS	CRST	CR+B	PPB
0,150	3,15	2,74	2,98	3,13	2,500	2,63	2,70	3,18
0,200	4,20	3,54	3,86	4,13	3,200	3,40	3,48	4,22
0,250	5,25	4,34	4,79	5,10	3,890	4,11	4,21	5,25
0,300	6,30	5,01	5,56	6,07	4,510	4,80	4,92	6,30

Tabla 6: Separación entre juntas para pavimentos de hormigón sobre base granular, con distintos agregados y similar tensión de alabeo que utilizando PPG (obtenidas con el programa EverFE).

Granular	Separación [m]							
Espesor [m]	PPG	PPD	CRP	CRPT	CRS	CRST	CR+B	PPB
0,150	3,60	3,17	3,43	3,57	2,93	3,05	3,13	6,63
0,200	4,80	4,12	4,50	4,76	3,75	3,95	4,06	4,86
0,250	6,00	5,04	5,53	5,90	4,54	4,82	4,98	6,10
0,300	7,20	5,89	6,55	7,00	5,28	5,62	5,76	7,24

Figura 3 : Relación espesor vs separación entre juntas, para pavimentos hormigón sobre base cementada (arriba) y base granular (abajo), elaborados con distintos agregados, con similares tensiones de alabeo que utilizando PPG, obtenidas con el programa EverFE.



Nuevamente, mediante el análisis por regresión lineal se determinaron los coeficientes “K” que relacionan la separación entre juntas con el espesor para cada tipo de agregado (Tabla 7).

Tabla 7: Valores de “K” obtenidos para pavimentos de hormigón elaborados con distintos agregados, adoptando la PPG como base para igualar las tensiones de alabeo (análisis con programa EverFE).

	K: relación (separación entre juntas) / (espesor de losa)							
	PPG	PPD	CRP	CRPT	CRS	CRST	CR+B	PPB
Base cementada	21*	17,24	19,00	20,43	15,54	16,47	16,88	21,04
Base granular	24**	20,12	22,15	23,55	18,18	19,25	19,79	24,25

(*) K=21 valor propuesto por la ACPA para bases cementadas

(**) K=24 valor propuesto por la ACPA para bases granulares o no tratadas

De la comparación de los resultados obtenidos en los análisis realizados con la fórmula de Bradbury y con el programa EverFe para la determinación de los coeficientes K (Tablas 4 y 7), puede observarse claramente que con ambas metodologías se arriba a resultados muy similares. Es por ello que en los análisis siguientes se utilizará la fórmula de Bradbury dado que resulta más sencilla su aplicación para la determinación de las tensiones de alabeo.

CASO PRÁCTICO

Los análisis teóricos hasta aquí analizados, se realizaron considerando losas perfectamente cuadradas, sin embargo, en el caso habitual de pavimentos para tránsito canalizado, las losas suelen ajustarse al ancho de carril. A raíz de ello, con el fin de validar los factores ajustados en la metodología anterior, se desarrollaron una serie de casos prácticos con el objetivo de corroborar los valores de K previamente obtenidos. Para ello se consideraron espesores de losa de 15, 20, 25 y 30 cm y se obtuvieron los largos de losas empleando el valor de K correspondiente según el tipo de agregado y base, y empleando anchos de losa fijos dentro del rango habitualmente empleado en la práctica: 3,00, 3,50 y 4,00 m.

Para cada caso se determinaron las tensiones de alabeo generadas por un gradiente térmico de 10 °C (Tablas 8 y 9) y se compararon los resultados de las tensiones de alabeo de cada caso con las de referencia (PPG). Como puede observarse en los gráficos de la Figura 4, para los distintos análisis efectuados, pudo controlarse adecuadamente las tensiones de alabeo, ajustándolas a la condición base con diferencias porcentuales que en todos los casos se ubicaron por debajo del 10%.

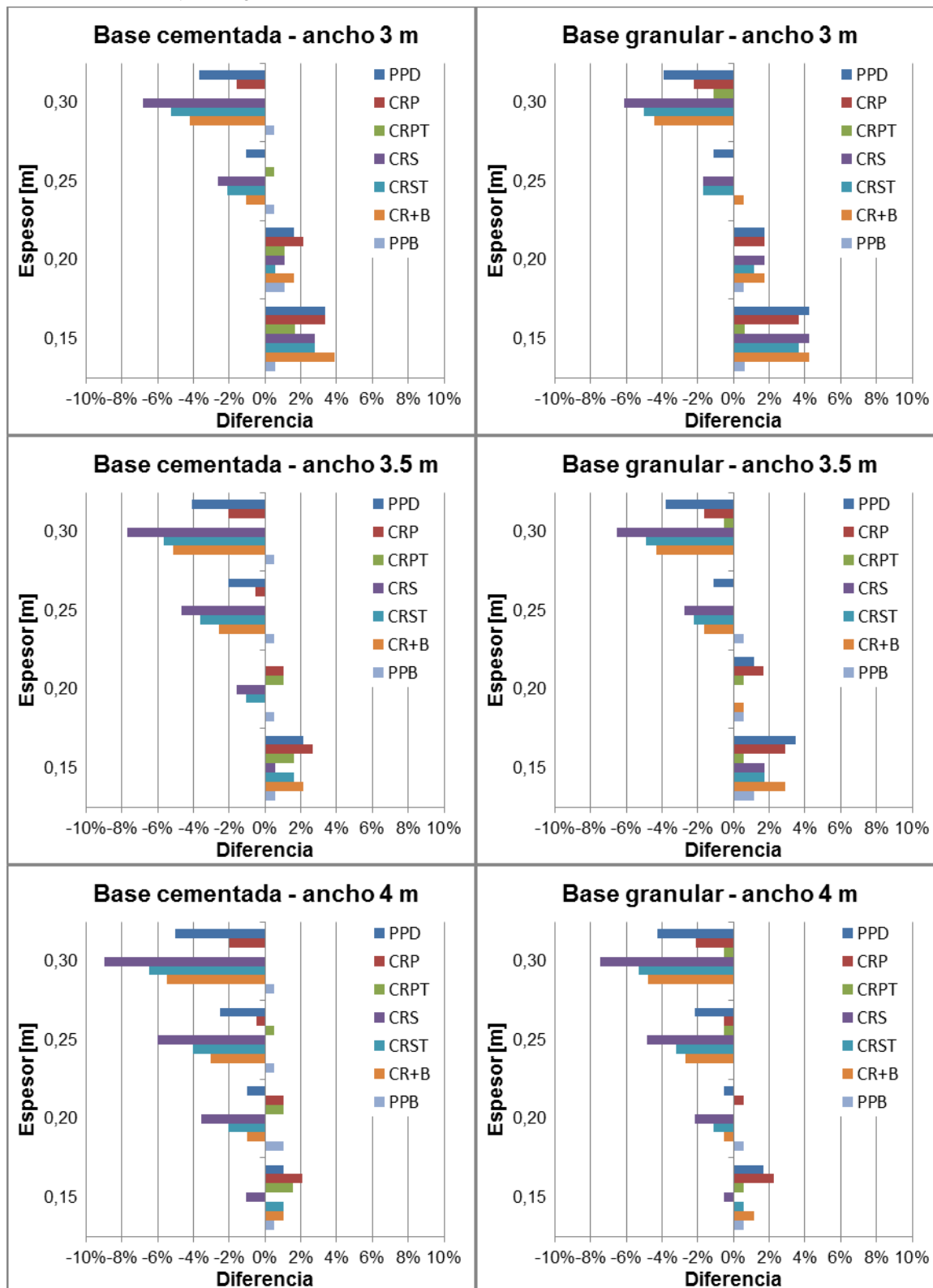
Tabla 8: Tensiones de alabeo para el caso práctico de una losa de hormigón con base cementada.

Cementada		PPG (referencia)		PPD		CRP		CRPT		CRS		CRST		CR+B		PPB	
Espesor [m]	Ancho [m]	Sep [m]	Talabeo [MPa]	Sep [m]	Talabeo [MPa]	Sep [m]	Talabeo [MPa]	Sep [m]	Talabeo [MPa]	Sep [m]	Talabeo [MPa]	Sep [m]	Talabeo [MPa]	Sep [m]	Talabeo [MPa]	Sep [m]	Talabeo [MPa]
0,150	3,0	3,15	1,80	2,61	1,74	2,88	1,74	3,06	1,77	2,33	1,75	2,49	1,75	2,56	1,73	3,16	1,79
	3,5		1,86		1,82		1,81		1,83		1,85		1,83		1,82		1,85
	4,0		1,90		1,88		1,86		1,87		1,92		1,88		1,88		1,89
0,200	3,0	4,20	1,85	3,48	1,82	3,84	1,81	4,09	1,83	3,11	1,83	3,33	1,84	3,42	1,82	4,21	1,83
	3,5		1,91		1,91		1,89		1,89		1,94		1,93		1,91		1,90
	4,0		1,97		1,99		1,95		1,95		2,04		2,01		1,99		1,95
0,250	3,0	5,25	1,88	4,34	1,90	4,80	1,88	5,11	1,87	3,89	1,93	4,16	1,92	4,27	1,90	5,26	1,87
	3,5		1,93		1,97		1,94		1,93		2,02		2,00		1,98		1,92
	4,0		1,99		2,04		2,00		1,98		2,11		2,07		2,05		1,98
0,300	3,0	6,30	1,90	5,21	1,97	5,76	1,93	6,13	1,90	4,67	2,03	4,99	2,00	5,13	1,98	6,31	1,89
	3,5		1,95		2,03		1,99		1,95		2,10		2,06		2,05		1,94
	4,0		2,00		2,10		2,04		2,00		2,18		2,13		2,11		1,99

Tabla 9: Tensiones de alabeo para el caso práctico de una losa de hormigón con base granular.

Granular		PPG (referencia)		PPD		CRP		CRPT		CRS		CRST		CR+B		PPB	
Espesor [m]	Ancho [m]	Sep [m]	Talabeo [MPa]	Sep [m]	Talabeo [MPa]	Sep [m]	Talabeo [MPa]	Sep [m]	Talabeo [MPa]	Sep [m]	Talabeo [MPa]	Sep [m]	Talabeo [MPa]	Sep [m]	Talabeo [MPa]	Sep [m]	Talabeo [MPa]
0,150	3,0	3,60	1,65	3,03	1,58	3,34	1,59	3,55	1,64	2,73	1,58	2,91	1,59	2,99	1,58	3,62	1,64
	3,5		1,72		1,66		1,67		1,71		1,69		1,69		1,67		1,70
	4,0		1,77		1,74		1,73		1,76		1,78		1,76		1,75		1,76
0,200	3,0	4,80	1,71	4,05	1,68	4,45	1,68	4,73	1,71	3,64	1,68	3,88	1,69	3,99	1,68	4,83	1,70
	3,5		1,77		1,75		1,74		1,76		1,77		1,77		1,76		1,76
	4,0		1,82		1,83		1,81		1,82		1,86		1,84		1,83		1,81
0,250	3,0	6,00	1,76	5,06	1,78	5,56	1,76	5,91	1,76	4,55	1,79	4,85	1,79	4,98	1,75	6,04	1,76
	3,5		1,81		1,83		1,81		1,81		1,86		1,85		1,84		1,80
	4,0		1,85		1,89		1,86		1,86		1,94		1,91		1,90		1,85
0,300	3,0	7,20	1,80	6,07	1,87	6,68	1,84	7,09	1,82	5,46	1,91	5,82	1,89	5,98	1,88	7,25	1,80
	3,5		1,84		1,91		1,87		1,85		1,96		1,93		1,92		1,84
	4,0		1,88		1,96		1,92		1,89		2,02		1,98		1,97		1,88

Figura 4: Diferencia porcentual de las tensiones de alabeo para losas de hormigones con distintos agregados, para base cementada y base granular, con respecto al caso de la PPG.



METODOLOGÍA SIMPLIFICADA

Con el fin de brindar un espectro más amplio de los valores de K, se extendió el mismo análisis para distintos módulos de elasticidad y coeficientes de expansión térmica, considerando la siguiente amplitud de valores para ambos parámetros:

- Módulos de elasticidad [GPa]: 30,0; 32,5; 35,0; 37,5; 40,0; 42,5 y 45,0
- Coeficientes de expansión térmica [10^{-6} 1/°C]: 8,5; 9,0; 10,0; 11,0; 12,0; 13,0 y 14,0

Del mismo modo que se ha determinado el factor K ajustado para los 7 agregados usados, se ha procedido con los 49 casos propuestos que se representan mediante la Tabla 10 y 11 para el caso de base cementada y granular respectivamente.

Tabla 10: Valores de K para base cementada

		E [GPa]						
		30,0	32,5	35,0	37,5	40,0	42,5	45,0
CET [10^{-6} 1/°C]	8,5	30,64	26,88	23,17	21,37	20,37	19,64	19,11
	9,0	28,03	23,32	21,30	20,18	19,28	18,81	18,37
	10,0	21,95	20,22	19,40	18,52	17,99	17,57	17,23
	11,0	19,48	18,53	17,86	17,37	16,96	16,61	16,35
	12,0	18,07	17,36	16,86	16,46	16,14	15,87	15,65
	13,0	17,03	16,49	16,09	15,75	15,49	15,26	15,06
	14,0	16,22	15,79	15,44	15,16	14,93	14,74	14,57

Tabla 11: Valores de K para base granular

		E[GPa]						
		30,0	32,5	35,0	37,5	40,0	42,5	45,0
CET [10^{-6} 1/°C]	8,5	35,22	29,45	26,15	24,52	23,52	22,79	22,19
	9,0	30,62	26,33	24,53	23,30	22,49	21,88	21,39
	10,0	24,84	23,25	22,24	21,49	20,91	20,46	20,10
	11,0	22,44	21,47	20,76	20,20	19,76	19,42	19,10
	12,0	20,93	20,20	19,65	19,21	18,86	18,54	18,30
	13,0	19,79	19,20	18,88	18,40	18,10	17,85	17,63
	14,0	18,88	18,41	18,03	17,74	17,46	17,31	17,06

Luego con el fin de simplificar la metodología, en lugar de utilizar distintos valores de K en función del tipo de base y agregado, se propone incorporar a la ec-1 un coeficiente “A” que tenga en cuenta únicamente la influencia del agregado, manteniendo los valores de K propuestos por la ACPA:

$$Sep.max = A.K.e$$

ec-4

Siendo:

e: espesor de calzada.

K= 21 para bases tratadas (con cemento o asfalto) o 24 para bases no tratadas o granulares.

A = factor de ajuste según el tipo de agregado.

Para ello se dividieron los valores de las Tablas 10 y 11 por el K correspondiente en función del tipo de base: 21 para cementadas y 24 para no tratadas o granulares (Tablas 12 y 13). Como era de esperarse, estos valores obtenidos resultan ser muy similares entre sí, por lo que se establece el coeficiente A como el promedio de los valores determinados para ambos casos (Tabla 14).

Tabla 12: Valores de Tabla 10 divididos por K=21.

		E [GPa]						
		30,0	32,5	35,0	37,5	40,0	42,5	45,0
CET [10 ⁻⁶ 1/°C]	8,5	1,46	1,28	1,10	1,02	0,97	0,94	0,91
	9,0	1,33	1,11	1,01	0,96	0,92	0,90	0,87
	10,0	1,05	0,96	0,92	0,88	0,86	0,84	0,82
	11,0	0,93	0,88	0,85	0,83	0,81	0,79	0,78
	12,0	0,86	0,83	0,80	0,78	0,77	0,76	0,75
	13,0	0,81	0,79	0,77	0,75	0,74	0,73	0,72
	14,0	0,77	0,75	0,74	0,72	0,71	0,70	0,69

Tabla 13: Valores de Tabla 11 divididos por K=24.

		E [GPa]						
		30,0	32,5	35,0	37,5	40,0	42,5	45,0
CET [10 ⁻⁶ 1/°C]	8,5	1,47	1,23	1,09	1,02	0,98	0,95	0,92
	9,0	1,28	1,10	1,02	0,97	0,94	0,91	0,89
	10,0	1,04	0,97	0,93	0,90	0,87	0,85	0,84
	11,0	0,94	0,89	0,87	0,84	0,82	0,81	0,80
	12,0	0,87	0,84	0,82	0,80	0,79	0,77	0,76
	13,0	0,82	0,80	0,79	0,77	0,75	0,74	0,73
	14,0	0,79	0,77	0,75	0,74	0,73	0,72	0,71

Tabla 14: Valores del coeficiente A

		E [GPa]						
		30,0	32,5	35,0	37,5	40,0	42,5	45,0
CET [10 ⁻⁶ 1/°C]	8,5	1,46	1,25	1,10	1,02	0,98	0,94	0,92
	9,0	1,31	1,10	1,02	0,97	0,93	0,90	0,88
	10,0	1,04	0,97	0,93	0,89	0,86	0,84	0,83
	11,0	0,93	0,89	0,86	0,83	0,82	0,80	0,79
	12,0	0,87	0,83	0,81	0,79	0,78	0,76	0,75
	13,0	0,82	0,79	0,78	0,76	0,75	0,74	0,73
	14,0	0,78	0,76	0,74	0,73	0,72	0,71	0,70

CONCLUSIONES

Las propiedades de los agregados tienen una marcada incidencia en el comportamiento de los pavimentos de hormigón, pues afectan sensiblemente las tensiones de alabeo generadas por cambios de temperatura.

Es por esto que se considera que la regla práctica de separación entre juntas puede ser mejorada teniendo en cuenta el tipo de agregado a utilizar, ya que, para agregados con elevados coeficientes de expansión térmica y módulos de elasticidad, las tensiones interiores debidas a cargas ambientales son mayores.

A partir de las modelaciones con Bradbury y el programa de elementos finitos EverFE se ha logrado determinar, sin mayor grado de error, un factor K ajustado en función del tipo de agregado a utilizar y el tipo de base del pavimento.

Por otro lado, a fin de simplificar la metodología y ampliar el uso a todo el espectro de agregados posibles se ha sumado una matriz que permite cubrir el rango total de variación de ambos parámetros. Se propuso la incorporación de un coeficiente "A" en la fórmula propuesta por la ACPA, para tener en cuenta la influencia del tipo de agregado en la determinación de la separación entre juntas a partir del espesor del hormigón de calzada.

Satisfactoriamente, se ha determinado que la utilización de dicho coeficiente de ajuste permite controlar aproximadamente las tensiones de alabeo en función del tipo de agregado propuesto.

REFERENCIAS

- [1] **ACPA TB010P**. Design and Construction of Joints for Concrete Highways. American Concrete Pavement Association. 1991.
- [2] **ICPA-LEMIT**, Calo, Souza, Camueira, Tobes, Zerbino, Giaccio. Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de hormigones elaborados con distintos tipos de agregados para su empleo en calzada de hormigón. XV Congreso de Vialidad y Tránsito. Septiembre, 2009. Mar del Plata.
- [3] **Yoder Witczak**. Principles of Pavement Design. Second Edition. 1975. ISBN 0-471-97780-2.
- [4] **EverFE**. Software for the 3D Finite Element Analysis of Jointed Plain Concrete Pavements, version 2.24. The University of Maine.
<http://external.informer.com/civil.umaine.edu/everfe>
- [5] **ICPA**. Manual de diseño y construcción de pavimentos de hormigón. D.Calo, E.Marcolini, E.Souza. Noviembre 2014. ISBN 978-956-8852-01-6.
- [6] **Norbert Delatte**. Concrete Pavement Design Construction and Performance. 2008. ISBN 978-0-203-96108-7.