



Received: 24-05-2018
Accepted: 28-07-2018

Anales de Edificación
Vol. 4, Nº 2, 25-31 (2018)
ISSN: 2444-1309
Doi: 10.20868/ade.2018.3775

Propiedades del hormigón reciclado para el uso como soleras de hormigón en pavimentos industriales. Properties of recycled concrete to use as concrete slabs in industrial pavements.

M.A. Morales^a, J.A. Pérez^b, M. del Río^a, J.C. Sánchez^b, J. Casbas^b, D. Gil^b

^aUniversidad Politécnica de Madrid (m.moralesarribas@hotmail.com; mercedes.delrio@upm.es), ^bUniversidad de Zaragoza, La Almunia de Doña Godina (joanpebe@unizar.es; jucasan@unizar.es; jesus.casbas@tecnalia.com; daniel.gil@tecnalia.com)

Resumen— El presente estudio analiza el estado tensional de distintas placas delgadas apoyadas sobre terreno elástico empleando modelos de elementos finitos para distintos tipos de hormigones reciclados y de primer uso, distintos valores de las cargas y de las condiciones de apoyo del terreno, concluyendo que las tensiones que se obtienen en hormigones reciclados son aproximadamente un 4,5% menores que en hormigones fabricados con áridos de primer uso, en cualquiera de los casos analizados. Con los datos obtenidos para las tensiones, se han elaborado gráficas de dimensionamiento del espesor mínimo necesario en Estado Límite Último de flexión. Estas gráficas muestran menores espesores necesarios en el caso de hormigones reciclados, si bien las reducciones posibles no superan los 0,5 cm para las cargas analizadas. Otro aspecto a tener en cuenta es que, dado que el proceso de agotamiento por fatiga en el hormigón depende fundamentalmente de la máxima tensión alcanzada en el hormigón respecto de su capacidad resistente y no solo de la oscilación de tensiones, el hormigón reciclado permite alargar la vida útil de la estructura.

Palabras clave— Pavimentos de hormigón, hormigón reciclado, módulo de deformación.

Abstract- The present study analyzes the tensional state of different thin plates supported on elastic terrain using finite element models for different types of recycled and first-use concretes, different values of loads and ground support conditions, concluding that the tensions that are obtained in recycled concretes are approximately 4.5% lower than in concrete made with aggregates of first use, in any of the cases analyzed. With the data obtained for the tensions, graphs of sizing of the minimum thickness necessary in Ultimate Limit State of flexion have been drawn up. These graphs show lower thicknesses required in the case of recycled concretes, although the possible reductions do not exceed 0.5 cm for the loads analyzed. Another aspect to be taken into account is that, given that the fatigue depletion process in concrete depends mainly on the maximum tension reached in the concrete with respect to its resistant capacity and not only the tension oscillation, the recycled concrete allows to extend the useful life of the structure.

Index Terms— Concrete pavements, recycled concrete, deformation module.

I. INTRODUCCIÓN

La construcción genera una gran cantidad de residuos que es necesario reciclar. Su puesta en valor y la viabilidad de empleo en nuevos materiales con fines estructurales nos ha llevado a estudiar el comportamiento mecánico de un hormigón elaborado con áridos reciclados procedentes de residuos de hormigón con la finalidad de utilización en la construcción de pavimentos de hormigón en naves industriales.

El estudio compara las tensiones de tracción que resultan en la base de soleras sometidas a las cargas aplicadas por distintos tipos de carretillas elevadoras en un rango de 13 kN a 85 kN de carga por rueda, para distintos valores del módulo de reacción del terreno y distintos tipos de hormigón. Se analizan losas de hormigón con resistencia característica $f_{ck} = 20, 25$ y 30 MPa y espesores 15 cm, 20 cm y 25 cm. Para cada uno de los tipos de hormigón se comparan los resultados obtenidos en hormigones de primer uso (H1U) y en hormigones en los que el 100% de la fracción gruesa ha sido sustituida por áridos reciclados procedentes de demolición de hormigón (HR).

El comportamiento mecánico en flexión de una losa continua de hormigón empleada como pavimento rígido, puede ser analizado a través de la teoría de placas delgadas (Westergaard, 1926) o de modelos numéricos de elementos finitos.

Timoshenko (Timoshenko & Woinowsky-Krieger, 1970) presenta la expresión de Westergaard para la tensión de tracción máxima producida en la cara inferior de una placa elástica “infinitamente grande” apoyada sobre un terreno elástico, caracterizado por su módulo de reacción, sometida al efecto de una carga aislada actuando en una superficie circular de radio c .

El Technical Report 34, 4ª edición (Concrete Society, 2013)), nos da unas expresiones con las que obtener las cargas últimas bajo la placa para carga puntual, carga dual y carga cuádruple.

Podemos analizar el efecto de una carga de tráfico puntual en régimen elástico aplicando las expresiones de Westergaard o empleando un modelo de elementos finitos con elementos planos soportados en su cara inferior por un muelle elástico que reproduzca el módulo de reacción del terreno.

En cualquiera de todas las expresiones teóricas anteriormente indicadas interviene el módulo de deformación longitudinal del hormigón E_c , produciendo mayores valores de las tensiones para valores mayores del módulo de deformación.

El menor módulo de deformación que presentan los hormigones reciclados en los que se sustituye el 100% de la fracción gruesa (Pérez, 2011), confiere un nivel de tensiones en las losas de pavimento fabricadas con este tipo de hormigones, inferior a las diseñadas con los hormigones de primer uso (H.1U.), no viéndose reducido el valor de la resistencia a compresión (Pérez et al., 2012; Salesa et al., 2017; Salesa, 2017*).

Esta propiedad permite diseñar de manera eficiente los pavimentos rígidos de hormigón alargando su vida útil o reduciendo los costes de ejecución.

II. METODOLOGÍA

En el presente estudio se lleva a cabo el cálculo de las tensiones de tracción en la cara inferior de una placa de pavimento rígido de hormigón de grandes dimensiones en planta sometida a cargas de tráfico, para el caso de placas fabricadas con hormigón de primer uso y para el caso de placas de hormigón en el que el 100% de la fracción gruesa se sustituye por áridos reciclados procedentes de residuos de hormigón. Se consideran las cargas interiores, sin tener en cuenta los efectos de borde o esquina.

Se compara el comportamiento de las losas, para distintos valores de las cargas aplicadas, del módulo de reacción del terreno y del hormigón y espesores empleados, utilizando un modelo de elementos finitos. No se han tenido en cuenta efectos térmicos ni de retracción.

A. Cargas aplicadas

Se han considerado las cargas aplicadas por distintas carretillas elevadoras tipo. De las indicadas en la tabla 1, se han empleado las carretillas FL1, FL4 y FL6, de 26 kN/eje, 90 kN/eje y 170 kN/eje, respectivamente. Se ha considerado la misma separación entre las dos ruedas de un eje, 0,80 m, para tener en cuenta únicamente el efecto de aumento del valor de la carga. De modo que la carga por rueda, se obtiene dividiendo entre dos la carga por eje. La superficie de aplicación de la carga es un cuadrado de lado 0,20 m.

TABLA I
CARGAS POR EJE DE DISTINTAS CARRETIILLAS TIPO

Clase de carretilla	Carga por eje (kN)
FL1	26
FL2	40
FL3	63
FL4	90
FL5	140
FL6	170

B. Terreno de apoyo

En todo el análisis se han considerado tres módulos de reacción del terreno: $k = 30.000$ kN/m³, $k = 60.000$ kN/m³ y $k = 90.000$ kN/m³. En (Doc 9157, 1989), se relaciona el módulo de reacción con el índice CBR del terreno y el tipo de suelo.

La tabla 2 muestra una correspondencia entre los módulos de

TABLA II
TIPO DE SUELO EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE REACCIÓN K

k (kN/m ³)	CBR	Tipo suelo
30.000	3	Arcillas alta compresibilidad
60.000	13	Arenas mal graduadas o con finos
90.000	30	Gravas mal graduadas o con finos

reacción considerados para el terreno subyacente, el índice CBR y el tipo de suelo.

C. Hormigón

El análisis emplea tres tipos distintos de hormigón: HM-20, HM-25 y HM-30, caracterizados por su resistencia a compresión simple (f_{ck}), resistencia a flexotracción ($f_{ctm,fl}$) y módulo de deformación longitudinal (E_c). Se trata de hormigón en masa, no conteniendo fibra ni malla metálica que proporcione ductilidad a la losa después de la primera fisura, por lo que el análisis se realiza en régimen elástico.

Para obtener los valores que caracterizan a los hormigones se utilizan las expresiones contenidas en (Instrucción, 2006):

$$f_{ctm,fl} = \left[1,6 - \left(\frac{h}{1000} \right) \right] \cdot f_{ctm} \geq f_{ctm} \quad (1)$$

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (2)$$

$$E_c = 1,175 \cdot 8500 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (3)$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (4)$$

En las anteriores expresiones, h representa el espesor de la losa en mm y E_c el módulo de elasticidad para cargas instantáneas o rápidamente variables.

Teniendo en cuenta lo establecido en las referencias (Pérez, 2011) y (Pérez et al., 2012), se toma para los hormigones en los que se sustituye el 100% de la fracción gruesa por árido reciclado procedente de hormigón, un módulo de deformación longitudinal E_c un 25% menor que en los hormigones de primer uso y se mantiene la resistencia a compresión f_{ck} .

La tabla 3 resume los hormigones empleados. El coeficiente de Poisson ν para todos los hormigones toma el valor 0,2.

D. Método

Dado que las expresiones de Westergaard presentadas por Timoshenko (Timoshenko & Woinowsky-Krieger, 1970) se refieren a cargas aisladas y el caso de estudio corresponde a carga dual, se utilizan los resultados proporcionados por dichas expresiones para calibrar el modelo de elementos finitos empleado para calcular las tensiones elásticas producidas por cada eje de las carretillas consideradas.

Timoshenko (Timoshenko & Woinowsky-Krieger, 1970) presenta la expresión de la tensión máxima de tracción de Westergaard que se produce bajo el punto de aplicación de una carga aislada actuando uniformemente repartida sobre un círculo de radio c:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{3 \cdot P}{h^2} \cdot \frac{1+\nu}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\ln \frac{l}{c} + 0,616 \right) \quad (5)$$

Donde P es la carga aplicada, h es el canto de la losa, ν es el coeficiente de Poisson del hormigón y l es el radio de rigidez relativa de la losa, dado por la siguiente expresión:

$$l = \sqrt[4]{\frac{D}{k}} \quad (6)$$

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1-\nu^2)} \quad (7)$$

Siendo k el módulo de reacción del terreno y E el módulo de deformación longitudinal del hormigón.

Los resultados obtenidos mediante el cálculo analítico para una carga aislada se utilizan para calibrar un modelo de elementos finitos realizado con el programa SAP2000 en el que se analiza una placa cuadrada de 5 m de lado, discretizada con

TABLA III
PROPIEDADES DE LOS HORMIGONES EMPLEADOS

	Resistencias		H1U	HR
	f_{ck} (MPa)	f_{cm} (MPa)	E_c (MPa)	E_c (MPa)
HM-20	20	28	30.328	22.746
HM-25	25	33	32.035	24.026
HM-30	30	38	33.578	25.183

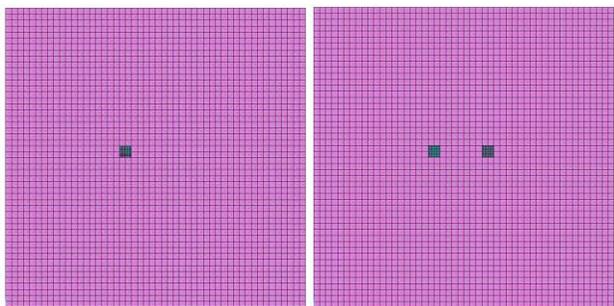


Fig. 1. Discretización del modelo empleado en la calibración (izquierda) y en el cálculo (derecha).

elementos cuadrangulares de 0,10 m de lado, de tipo placa delgada.

Los elementos del modelo están apoyados sobre muelles de constante k , en kN/m^3 .

El área donde está aplicada la carga se divide en áreas más pequeñas de manera consecutiva: cuadrados de 10 cm, 5 cm y 2,5 cm de lado, comparando en cada caso los resultados obtenidos del modelo con los resultados analíticos.

Con elementos de 2,5 cm de lado en el área de aplicación de la carga se obtiene una desviación respecto de los resultados teóricos menor del 3%, adoptando esta discretización en el modelo.

Una vez calibrado el modelo se aplican sobre el mismo dos

cargas iguales separadas 0,80 m (Figura 1).

Así se obtienen las tensiones de tracción máximas bajo el punto de aplicación de las cargas, para las tres carretillas seleccionadas (FL1, FL4 y FL6), los seis hormigones seleccionados (H1U HM-20, HR HM-20, H1U HM-25, HR HM-25, H1U HM-30 y HR HM-30), los tres módulos de balasto ($k = 30.000 \text{ kN/m}^3$, $k = 60.000 \text{ kN/m}^3$ y $k = 90.000 \text{ kN/m}^3$) y los tres espesores de losa ($e = 15 \text{ cm}$, $e = 20 \text{ cm}$ y $e = 25 \text{ cm}$).

Con los datos obtenidos de tensiones se realiza una representación gráfica de las variaciones tensionales de cada caso en función de las distintas variables. Para llevar a cabo dicha representación realiza un ajuste por mínimos cuadrados mediante un polinomio de grado 1 (línea recta).

En dichas gráficas se representan las tensiones mayoradas y las tensiones de tracción admisibles de cada hormigón minoradas, de manera que tengan utilidad para el dimensionamiento en Estado Límite Último de flexión de espesores de cada tipo de hormigón necesario para cada carga aplicada y cada módulo de reacción del terreno.

Se han empleado los coeficientes de mayoración de las cargas y de minoración de la resistencia del hormigón indicados en (Concrete Society, 2013):

Coefficiente de mayoración de cargas dinámicas: $\gamma_f = 1,6$.

Coefficiente de minoración de la resistencia del hormigón: $\gamma_c = 1,5$.

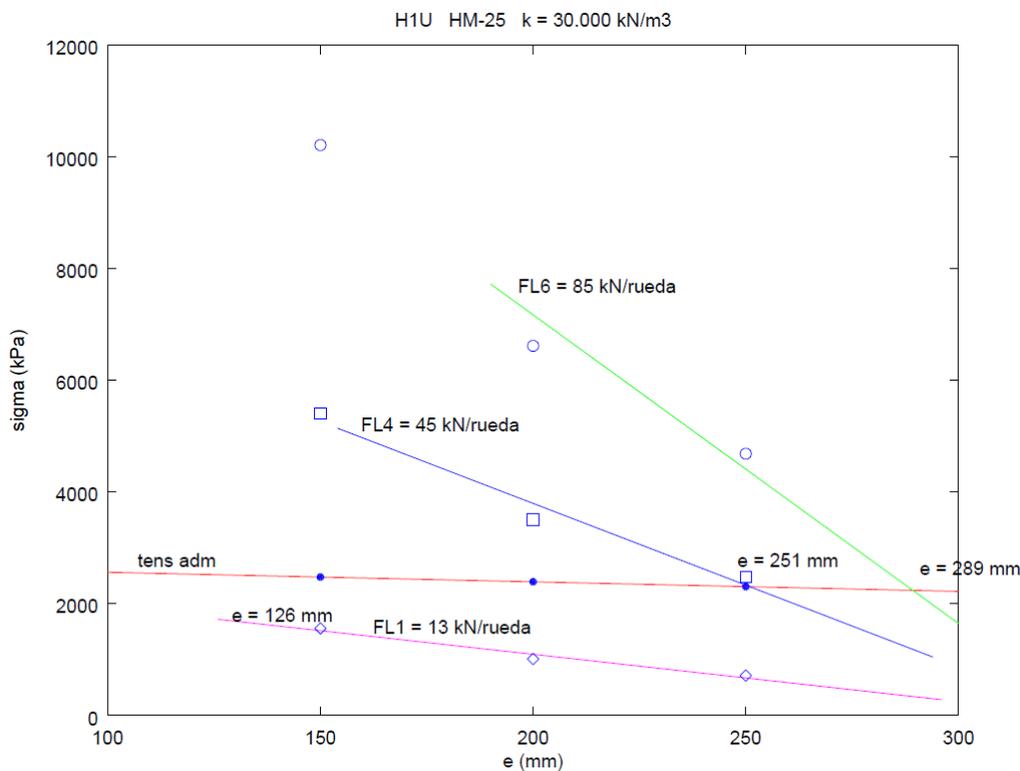


Fig. 2. Tensiones H1U HM-25 para $k = 30.000 \text{ kN/m}^3$.

III. RESULTADOS

La representación gráfica de los resultados presenta para cada tipo de hormigón y módulo de reacción del terreno, las tensiones mayoradas de tracción máximas bajo el punto de aplicación de las cargas que se producen en losas de distintos espesores (figuras 2 y 3). En las gráficas se representa también la recta de tensión de tracción admisible minorada, cuyo punto de corte con las rectas que representan a cada valor de la carga, indica el espesor necesario para el cumplimiento del Estado Límite Último de flexión. El espesor mínimo representado en cada recta de cada valor de la carga corresponde al espesor necesario para el cumplimiento del ELU de punzonamiento.

También se han representado gráficas que determinan el espesor necesario de hormigón en función del módulo de balasto y de la carga actuante (figuras 4 y 5).

Del análisis realizado se deduce que las tensiones de tracción máximas bajo el punto de aplicación de las cargas que se producen en las losas con hormigón reciclado (HR) son en todos los casos aproximadamente un 4,5% menores que las tensiones que se producen en los hormigones de primer uso (H1U).

Esto permite utilizar menores espesores con hormigón reciclado (HR) si bien la reducción no supera en ningún caso analizado los 0,5 cm.

IV. CONCLUSIONES

Se ha utilizado un modelo de elementos finitos para analizar las tensiones de tracción máximas producidas en la cara inferior de una losa sometida a carga dual de tráfico de carretillas elevadoras bajo el punto de aplicación de la carga.

Se han analizado 6 tipos de hormigón (H1U HM-20, HR HM-20, H1U HM-25, HR HM-25, H1U HM-30 y HR HM-30), con tres clases de carretilla (FL1, FL4 y FL6), tres módulos de balasto distintos ($k = 30.000 \text{ kN/m}^3$, $k = 60.000 \text{ kN/m}^3$ y $k = 90.000 \text{ kN/m}^3$) y tres espesores de losa ($e = 15 \text{ cm}$, $e = 20 \text{ cm}$ y $e = 25 \text{ cm}$).

El empleo de hormigones reciclados produce una reducción en el nivel de tensiones respecto de las tensiones en la placa de hormigón de primer uso, aspecto que permite optimizar el dimensionamiento del espesor, aunque sea ligeramente.

Además, tal como se indica en la referencia (Zanuy et al., 2011), el proceso de fatiga que sufre el hormigón depende del nivel de tensión:

$$\left(\frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{f_c}\right) \quad (8)$$

siendo $\sigma_{m\acute{a}x}$ la tensión máxima a la que se ve sometido el hormigón y f_c la tensión resistente.

Cuanto menor es la tensión alcanzada respecto de la tensión resistente, mayor es el número de ciclos de carga al que

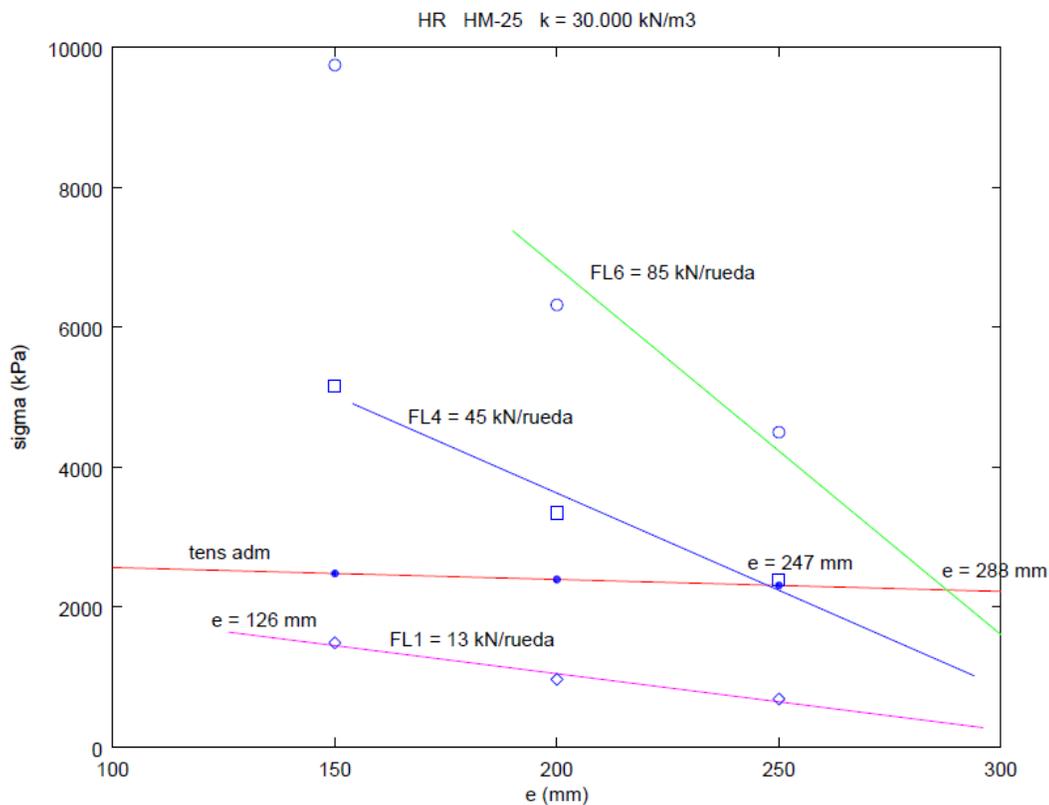


Fig. 3. Tensiones HR HM-25 para $k = 30.000 \text{ kN/m}^3$.

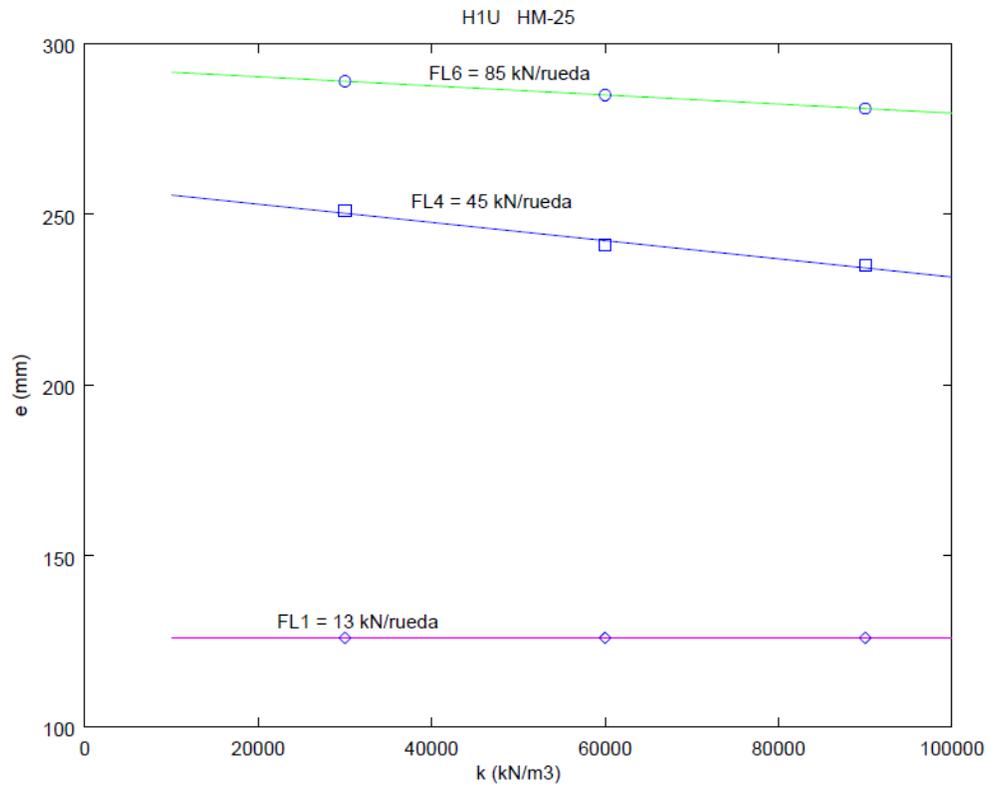


Fig. 4. H1U HM-25.Espesores en función del módulo de balasto para distintas cargas.

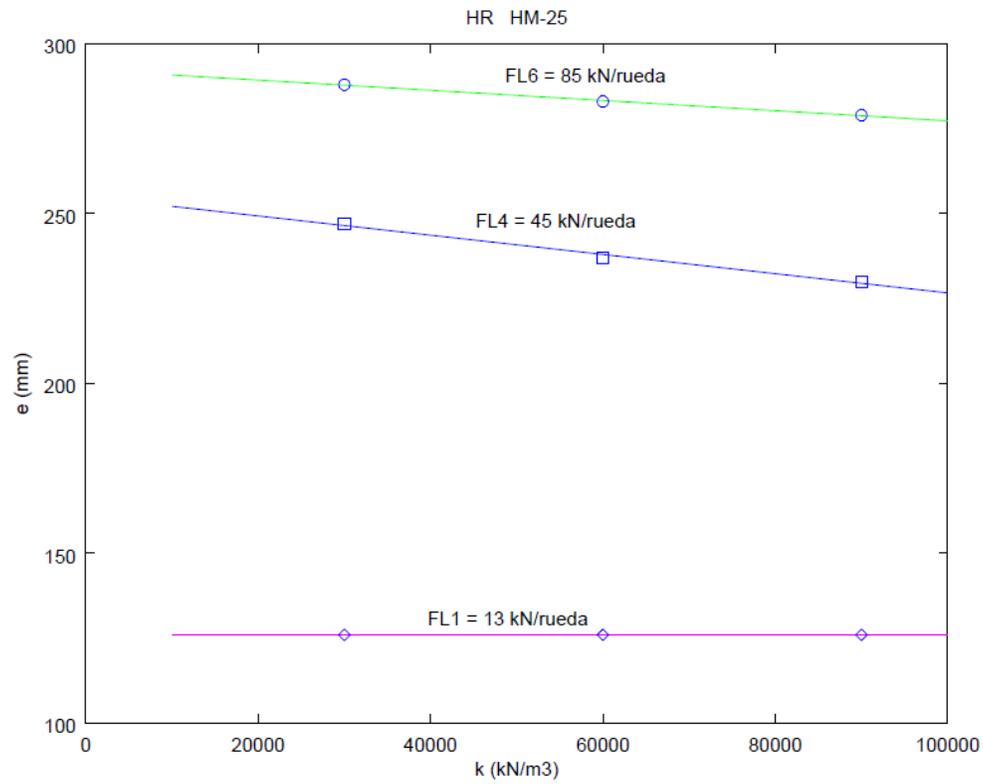


Fig. 5. HR HM-25.Espesores en función del módulo de balasto para distintas cargas.

podemos someter a la estructura, de modo que, puesto que el hormigón reciclado produce un menor nivel de tensión, consecuencia de su menor módulo de deformación longitudinal E_c , sin ver reducida su resistencia a compresión, se puede deducir que la placa tendrá una mayor vida útil para uso de cargas repetitivas como son las cargas de tráfico.

En consecuencia, del presente estudio relativo al empleo de materiales procedentes de residuos de hormigón para fabricar nuevos hormigones, basado en estudios anteriores de este tipo de materiales (Pérez, 2011; Pérez et al., 2012; Salesa et al., 2017; Salesa, 2017*), se deduce la viabilidad de su empleo en pavimentos de naves industriales.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración a las empresas Acciona Construcción, S.A., Tecnalía y Cemex, que están participando activamente en una prueba industrial que se pretende llevar a cabo para corroborar en la práctica estos estudios acerca del hormigón reciclado.

REFERENCIAS

- Concrete Society. (2013). Concrete industrial ground floors: a guide to design and construction. (4th ed.). UK: The Concrete Society.
- Doc 9157-AN/901. (1989). Manual de diseño de aeródromos. Parte 3. (s. f.) (2a Edición). Montreal: Organización de Aviación Civil Internacional.
- Instrucción del Hormigón Estructural. EHE-08. (2006). España. Ministerio de Fomento.

- Pérez, J. A. (2011). Estudio experimental sobre propiedades mecánicas del hormigón reciclado con áridos procedentes de la no calidad en prefabricación (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, pp. 206-211
- Pérez, J. A., del Río, M., Peralta, J. L., & de la Rosa, M. (2012). Características mecánicas de hormigones con áridos reciclados procedentes de los rechazos en prefabricación. *Materiales de Construcción*, 62(305), 25-37.
- Salesa, A., Pérez, J. A., Colorado, D., López, P. L., Sanz, L. J., Sáez, J. L., Olivares, D. (2017). Physico mechanical properties of multi recycled concrete from precast concrete industry. *Journal of Cleaner Production*, 141, 248-255.
- Salesa, A., Pérez, J. A., Esteban, L. E., Vicente, R., & Orna, M. (2017*). Physico mechanical properties of multi recycled self compacting concrete prepared with precast concrete rejects. *Construction and Building Materials*, 153, 364-373.
- Timoshenko, S., & Woinowsky-Krieger, S. (1970). Teoría de placas y láminas. Bilbao: Ediciones Urmo.
- Westergaard, H.M. (1926). Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis. *Public Roads*, 7(2), 25-35.
- Zanuy, C., Albajar, L., de la Fuente, P. (2011). El proceso de fatiga del hormigón y su influencia estructural. *Materiales de construcción*, 61(303), 385-399.



Reconocimiento – NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.