

# CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO, CÁLCULO Y DISEÑO DE SOLERAS DE HORMIGÓN EN MASA PARA LA ACTIVIDAD AGROINDUSTRIAL

(CALCULUS AND DESIGN OF CONCRETE SLABS FOR AGROINDUSTRIAL ACTIVITY)

Carlos Ferrer G., Dr. Ingeniero Agrónomo (UPV)  
J. Javier Ferrán, Dr. Ingeniero Agrónomo (UPV)  
Carlos Ferrer F., Dr. Ingeniero Agrónomo (UPV)

ESPAÑA

Fecha de recepción: 28-X-99  
165-4

## RESUMEN

*Las soleras de hormigón en general, y las industriales en particular son un elemento constructivo cuyo diseño y ejecución correctos son debidos, fundamentalmente, a la experiencia con que cuenten el ingeniero proyectista y la empresa constructora.*

*Las cada vez mayores exigencias de calidad, aplicadas tanto a la puesta en obra como a la redacción de proyectos, unido a la ausencia de una normativa a nivel nacional específica, nos llevó a tomar la decisión de idear un procedimiento de cálculo, que, apoyado en otros existentes para otro tipo de pavimentos, nos permitiera abordar el diseño con garantías suficientes, sobre todo para el caso de soleras comprometidas, debido al carácter de las cargas actuantes. El modelo de cálculo que se describe utiliza la técnica de los elementos finitos, mediante la aplicación informática del programa ANSYS*

*Las cargas introducidas en el cálculo en este caso, son las propias que tienen lugar en almacenes de frutas y hortalizas, fundamentalmente debidas al trasiego de vehículos estibadores.*

*Como conclusión se han extraído una serie de recomendaciones para el diseño y un ábaco gráfico que sirva de ayuda al ingeniero proyectista .*

## SUMMARY

*Slabs and especially industrial floors are construction elements whose design and execution usually depend on the experience of the engineer and the building firm.*

*In the construction industry, as in the rest of the industrial fields, work of a specialized nature requiring a high level of quality is becoming the norm. In accordance with these new requirements we have tried to establish the bases of a calculus procedure that provides the design engineer with an efficient tool that allows for the design of agroindustrial ground slabs with adequate security guarantees and correct behaviour. Existing design procedures for the sort of concrete pavements that, because of their structural importance, have been properly studied, such as concrete pavements used in airports, highways and roads, have been extrapolated and adapted to industrial slabs design. A Finite Element Method has been selected as a structural calculus tool. ANSYS v.5.2 software has been used.*

*Loads considered and applied on the model have been chosen and taken from within fruit storage and distribution warehouses. Most important and common from them are those due to electric forklift trucks.*

*The analytical study carried out came to conclusions and design considerations. A graphical design abacus have been obtained*

## 1. Introducción

Tradicionalmente se ha tratado a las soleras como un elemento constructivo secundario con respecto a otros de mayor importancia estructural. En la mayoría de proyectos la solera aparece definida mediante una breve descripción, más o menos acertada, en función de la experiencia con que cuente el proyectista. La solera es, por tanto, un elemento constructivo cuyo resultado depende, en gran medida, de la buena puesta en obra que realice la empresa contratista y la supervisión de la dirección de obra (foto 1).

Aunque su importancia estructural, si se quiere, es menor, no lo es así su repercusión económica en el conjunto del presupuesto de ejecución material, ni tampoco su importancia funcional. Desde un punto de vista funcional, la solera va a constituir, el piso o soporte sobre el que va a recaer todo el peso de la actividad industrial que tiene lugar en una nave:

- Almacenamiento de productos y materiales
- Apoyo de la maquinaria del proceso productivo
- Circulación y trasiego de productos mediante vehículos estibadores

En la U.D. de Construcción del Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria de la U.P. de Valencia estamos familiarizados con este tipo de actividades y ha sido requerida como asesora técnica en trabajos de rehabilitación de soleras y diseño de nuevas con connotaciones especiales.

Los condicionantes expuestos y el hecho de que no exista a nivel nacional una instrucción o normativa para el proyecto y ejecución de soleras industriales, nos llevó a la necesidad de elaborar un procedimiento de cálculo que nos permitiera proyectar soleras con fiabilidad suficiente, especialmente en aquellos casos de mayor importancia relativa, dada la trascendencia de las cargas a transmitir.

En el presente artículo se hace referencia a soleras de hormigón en masa ligeramente armadas, centrándose en la determinación del espesor de las mismas bajo el supuesto de que el hormigón es capaz de resistir las tensiones de flexotracción que aparecen como consecuencia de aplicación de cargas. Se supondrá que en toda solera se dispondrá, al menos, como armadura, un mallazo fino de cuantía tal que contribuya a soportar las tensiones de tracción que aparecen en el hormigón debido a fenómenos como la retracción, dilatación, etc. El artículo, por limitación de contenido, no entra en detalles al respecto, aunque el cálculo es relativamente sencillo y existen abundantes referencias <sup>(12, 13)</sup>. Por el mismo motivo, tampoco se describen las soleras fuertemente armadas, las pretensadas, o las armadas con fibras de acero, polipropileno, etc., que son objeto de estudios y análisis diferentes.

En el cuadro 1 se ofrece un breve resumen de la panorámica normativa básica referente a soleras, a nivel nacional e internacional.

Cabe reseñar que determinadas instituciones como la ACI dedican comités especiales de estudio, epígrafes normativos y cursos específicos.

CUADRO 1

- NBE-EH-91 y la actual EHE instrucciones con carácter general. no se menciona específicamente.	
- En el año 63 se publicó una monografía dedicada a pavimentos rígidos por el Instituto Eduardo Torroja.	
- En el año 86 se publicó con carácter provisional la Norma Tecnológica RSC-86 'Revestimiento de suelos continuos' por la Asociación de empresas pavimentadoras industriales de Cataluña. Sin ningún procedimiento de cálculo o de diseño.	
- Reglamentaciones y prescripciones de otro tipo de pavimentos rígidos donde se abordan los aspectos constructivos con mayor rigor y extensión, como son:	
- El PG4-88 y la IC-6.2. para carreteras y autovías	
- Las recomendaciones y pliegos (AENA) para la construcción de pistas de aterrizaje y de circulación de aviones de pasajeros y militares.	
- MOPTMA ROM 4.1-94 Recomendaciones para proyecto y constr. de pavimentos portuarios.	
- EEUU - ACI-302. ACI-360 <sup>(1)</sup>	
- G.B. Technical Report nº 34 <sup>(2)</sup>	



Foto 1.- El comportamiento de la solera como elemento constructivo depende, en gran medida, de la buena ejecución y puesta en obra.

## 2. Metodología utilizada

Estructuralmente se define SOLERA como la capa de hormigón en masa o ligeramente armada que, por su rigidez a flexión, transmite y reparte las cargas actuantes sobre ella a otras subyacentes de menor resistencia (el suelo): base, sub-base y explanada.

La metodología que se utilizó parte del estudio de otros procedimientos existentes para el cálculo y diseño de pavimentos rígidos de hormigón, de mayor importancia estructural, como son los existentes para pistas de aeropuertos, autopistas, carreteras, etc.; estos procedimientos están basados conjuntamente en el cálculo analítico (teoría elástica de placas de Timoshenko<sup>(3)</sup>) y en el experimental. Algunos de ellos proporcionan expresiones de cálculo de carácter más o menos general (Westergaard<sup>(4)</sup>, Teller y Sutherland<sup>(5)</sup>, Pickett<sup>(6)</sup>) y otros proporcionan ábacos de diseño específicos aplicables a casos concretos y contrastados experimentalmente, como los que proporciona la Portland Cement Association en sus publicaciones<sup>(7)(8)</sup> o la AASHTO<sup>(9)</sup>.

Muchos de estos trabajos están basados en la suposición de que el suelo se comporta como un líquido denso siguiendo la hipótesis de Winkler, utilizando en este caso, como parámetro de cálculo, el conocido coeficiente de balasto K obtenido a partir del ensayo de placa de carga normalizado. Otros están basados en el tratamiento del suelo como un cuerpo elástico semiinfinito, según la teoría de Boussinesq. Tanto en un caso como en otro la mayoría de los procedimientos están obtenidos a partir de algoritmos de cálculo utilizando ordenadores. En el modelo aquí descrito se pretendía, además, contrastar estos comportamientos, pero modelizando el suelo mediante un espacio finito discretizado en elementos elásticos.

## 4. El Modelo de cálculo

Para el cálculo de las tensiones por flexión que pueden aparecer en una solera como consecuencia de aplicación de cargas, se ha utilizado el programa informático de cálculo por elementos finitos ANSYS.

El criterio adoptado para la definición de los parámetros que intervienen en el cálculo y su discretización, ha sido utilizar un modelo más o menos versátil, que permitiese la asignación de distintas magnitudes y valores para cada uno de los elementos que intervienen en éste, de forma rápida y sin tener que realizar grandes modificaciones, para poder abordar, de la forma más sencilla posible, la gran variabilidad de combinaciones que ofrece la casuística.

El modelo de cálculo adoptado está formado por los siguientes componentes:

- La losa de hormigón
- El suelo: distinguiendo entre base granular y explanada
- Las cargas

Para cada uno de los cuales se establecieron los parámetros que los caracterizan y que intervienen en el cálculo.

Como solera se ha escogido un recuadro de losa de dimensiones 4 x 4 m y tres espesores ordinarios de losa para la actividad agroindustrial (10, 20 y 15 cm)

Como suelo se ha escogido un volumen limitado que se ha considerado susceptible de ser afectado en la transmisión de tensiones. Éste consiste en un sólido

elástico paralelepédico, con unas aristas de 12x12 m y 4 m, en superficie y profundidad respectivamente. En la elección de la forma se ha atendido al criterio de prolongar la longitud de la losa por cada lado de ésta y en profundidad, quedando la losa centrada con respecto al suelo y descansando sobre la superficie de éste. A su vez, el suelo se ha dividido en capas sucesivas correspondientes a base granular de zahorra artificial compactada y explanada, con posibilidad de combinar tres espesores distintos de base (20, 40 y 70 cm)

Como acciones exteriores se han introducido distintos tipos de cargas, dependientes de la actividad a desarrollar, que actúan de forma superficial sobre diversas zonas de la solera (posiciones) y que producirán distintos casos de flexión.

El modelo de cálculo se discretizó<sup>(10)</sup> utilizando elementos finitos tal y como aparece en la figura 1.

La losa se discretizó en 256 elementos finitos, utilizando el elemento finito con propiedades elásticas tipo PLACA SHELL63, de dimensiones 25 x 25 cm para adaptarse a la introducción de cargas, de cuatro nodos y seis grados de libertad por nodo que permite la obtención de esfuerzos y

tensiones en la cara superior de la losa (TOP), en la inferior (BOTTOM) o en el plano medio (MIDDLE) que coincide, en este caso, con la fibra neutra.

El suelo se discretizó en 7.840 elementos finitos utilizando el elemento finito elástico SOLID45 isotrópico de ocho nodos y tres grados de libertad al desplazamiento, de dimensiones variables por capas y en profundidad, en función del interés de la información que ha de suministrar cada uno de ellos.

En el diseño se tuvieron en cuenta otros criterios de convergencia y rapidez en el cálculo que se especifican en la tesis.

Para aumentar la rapidez de cálculo se introdujeron coacciones en los nodos de suelo situados sobre la superficie que limita el volumen de suelo (figura 2).

#### 4.1. Determinación de los parámetros de cálculo

Cada uno de los elementos que intervienen en el cálculo es susceptible de tener unas características o propiedades distintas. Estas características se introducen al cálculo mediante la elección de una serie de parámetros

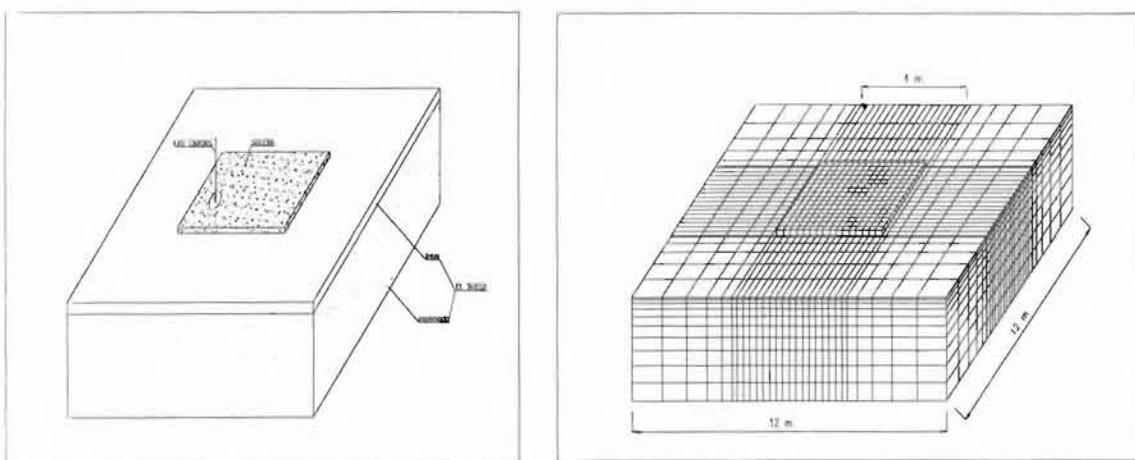


Figura 1.- Esquema de los componentes que intervienen en el modelo de cálculo (izquierda). Esquema de las dimensiones y discretización del modelo (derecha).



Figura 2.- Coacciones introducidas al modelo.

representativos cuyos valores se asignan por capas al conjunto de los elementos finitos, a través de opciones como el tipo de material y propiedades de éste (real constant, mat.property), que resultarán familiares al usuario. Se intentó abordar el mayor número de casos o combinaciones posibles dentro de los que merecen la calificación de habituales. El interface gráfico del ANSYS (GUI) asigna diferentes colores a materiales (hormigón, suelo) con propiedades distintas. En la figura 3 se ofrece un ejemplo del aspecto.

La elección de los parámetros introducidos al cálculo y su determinación se ha efectuado teniendo en cuenta los siguientes requisitos y recomendaciones:

- *Hormigón*: se ha tomado como resistencia admisible de cálculo la resistencia a flexotracción del hormigón obtenida a partir del ensayo a flexión recogido en la norma UNE-83305/86 y que, para este caso, se cree recomendable fijar en el intervalo que va de los 30 a los 40 kp/cm<sup>2</sup> (3 a 4 N/mm<sup>2</sup>) dependiendo del tipo de hormigón utilizado, y así se aconseja se especifique en el Pliego de proyecto. La NBE-EH-91 y la vigente EHE comentan que en ciertas obras o en alguna de sus partes, el Pliego de Prescripciones Técnicas puede exigir la determinación de las resistencias a tracción o a flexotracción del hormigón mediante ensayos normalizados. En esta línea el PG4 establece ensayos y procedimientos propios, incluso con una denominación propia, tal y como aparece en la tabla 1.

Cuando se desconozca la resistencia a la flexotracción pueden usarse, con cautela, las funciones que relacionan ésta con la resistencia característica del hormigón a los 28 días para el ensayo normalizado de compresión UNE 83304:84. Las referencias bibliográficas y discusiones al respecto son abundantes<sup>(11)</sup>.

$$f_{ct,fl} = 1,768 f_{ck}^{0,538} \text{ (kp/cm}^2\text{)}$$

Aunque también pueden usarse otras como la expresión que se especifica en NBE- EHE comentarios art.30.3 que la relacionan con el ensayo brasileño UNE-83306:85. A efectos prácticos no se recomiendan hormigones con  $f_{ck}$  menores de 200 kp/cm<sup>2</sup> (20 N/mm<sup>2</sup>) y, en caso de consideración como elemento estructural, el NBE-EHE HA-25, quedando ambos dentro del intervalo propuesto. En el cálculo se tuvo en cuenta, además, el efecto de la fatiga aplicándose un coeficiente de seguridad suficiente. La minoración de resistencia que produce sobre el hormigón la acción repetitiva de cargas cíclicas es debida en este caso a la circulación de carretillas. La bibliografía consultada aconseja un factor de seguridad (relación entre la tensión a la rotura de diseño y la tensión de trabajo) de 1,7 a 2.<sup>(7)(12)</sup>, que coincide con la obtenida para los ciclos de carga debidos a la circulación de carretillas que se ha estimado entre 60.000 y 80.000 ciclos por campaña.

- *Suelo*: se ha supuesto un comportamiento perfectamente elástico del suelo, apoyado en la teoría de Boussinesq.

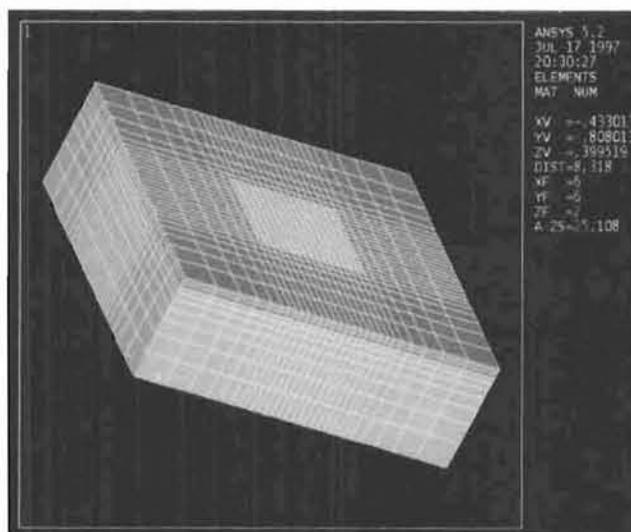


Figura 3.- Aspecto del modelo.

TABLA 1

Tipos de hormigón para pavimentos	Resistencia a flexotracción $f_{ctk}$ (kp/cm <sup>2</sup> )
HP-45	45
HP-40	40
HP-35	35

Como parámetro principal se tomó el módulo de deformación del mismo  $E_s$ . Como no se pretendía analizar el efecto sobre un tipo de suelo en concreto, sino observar el comportamiento que en la solera (tensiones) producen distintos tipos de suelo, se introdujo esta clasificación, bastante generalista y poco precisa si se quiere, estableciéndose un tipo de suelo para la base granular y cuatro para la explanada (tabla 2).

- *Acciones*: son el conjunto de parámetros más representativos de la actividad objeto de estudio. En la determinación de las cargas que pueden actuar sobre la solera se han considerado:

- *Concargas*: el peso propio de la losa.

- *Sobrecargas de uso*: las producidas por la actividad industrial, de entre las que, por sus efectos más desfavorables, se han tomado las cargas de tipo concentradas.

Entre éstas destacan:

1) Cargas transmitidas a través de las ruedas de vehículos estibadores de almacén.

Dentro de los vehículos ordinarios de almacén utilizados en la industria agroalimentaria se tiene:

a) Carretillas de 1,5 t de capacidad portante.

b) Carretillas de 3,0 t de capacidad portante.

c) Apiladores de 1,5 t de capacidad portante.

2) Cargas debido al apilamiento de productos en estanterías.

Estos elementos tienen en común que transmiten la carga, en forma de presión, a través de una pequeña superficie o

área de contacto, a través de sus puntos de apoyo. Existe una gran variabilidad o gama de productos en el mercado. Para cada uno de estos productos se puede establecer un patrón de carga específico propio. Para su determinación se puede abordar el estudio tal y como ha realizado la PCA para cada modelo de aviones de pasajeros<sup>(7)</sup>, pero, a efectos nuestros, resultaba más interesante buscar una fórmula más generalista que incluyese por grupos a éstos, para lo cual fue necesario introducir una serie de consideraciones que se mencionarán con posterioridad.

Se realizaron cálculos por separado para cada uno de los tipos de elementos citados y se analizaron sus resultados, pero, a efectos de este artículo, sólo se ofrecerán los obtenidos para carretillas de almacén de 1,5 t de capacidad portante, por disponer de la serie de datos más completa y por ser los vehículos más habituales usados en centrales hortofrutícolas y mercados de distribución y abastecimiento (figura 4).

Además, la dificultad en la obtención de las presiones se ve agravada por los siguientes aspectos.

- Los vehículos pueden ir equipados con ruedas neumáticas o con ruedas macizas, siendo, esta última posibilidad lo más habitual. Los apiladores van equipados con ruedas macizas de elastómeros de gran rigidez como el uretano. No existen modelos sencillos que nos permitan conocer con exactitud el área de contacto para este tipo de ruedas. El área de contacto depende de la magnitud de la carga. Las presiones que transmiten las ruedas dependen de la magnitud de la carga.

- En vehículos estibadores el reparto de cargas eje delantero - eje trasero es distinto para cada situación de carga ya que, como las carretillas trasladan las cargas en las horquillas delanteras, se produce un desplazamiento del centro de gravedad en función de la carga. En los catálogos técnico-comerciales se facilita este reparto

TABLA 2

DESCRIPCIÓN	CLASIFICACION	E (kp/cm <sup>2</sup> )	$\nu$ (Poisson)	K (kg/cm <sup>3</sup> )	Id. Material property
Zahorra artificial seleccionada para base granular	GW: A-1-a	1.000	0,25	16	3
Explanada suelo duro (zahorras naturales)	A-2 A-3; GC, SM, SW	500	0,3	8	6
Explanada suelo medio (arcillas consolidadas, arenas flojas)	A-2, A-3, A-4 SC, CL, ML	200	0,4	4	5
Explanada suelo blando	A-5, A-7	100	0,45	2	4
Suelos más blandos (se necesita estabilización)	A-6, A-7	50	0,48	1,5	7

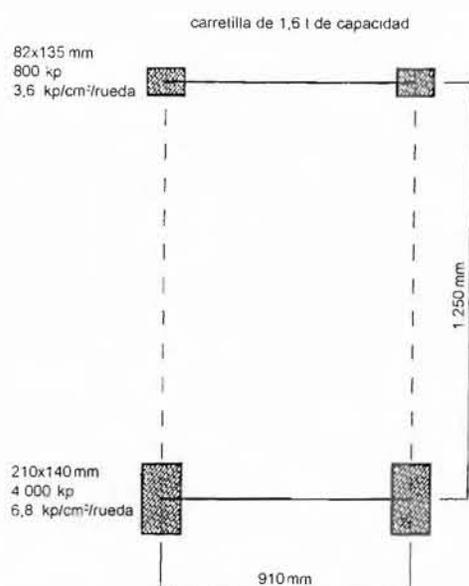


Figura 4.- Patrón de carga para carretilla de 1,5 t de capacidad portante de un determinado modelo comercial (izquierda). Ejemplos de tipos de ruedas distintos (derecha).

Descripción	Peso unitario kp	Peso total kp
Ud. de palet de madera de dimensiones 1.000 x 1.200 mm	20,0	20,0
42 Ud. de cajones de PE, de recogida de fruta de campo de dimensiones 500 x 400 x 300 mm	2,5	105,0
Ud. de cantidad de fruta almacenada en cajón (cítricos)	19,5	819,0
Ud. conductor	100,0	100,0
<b>TOTAL</b>		<b>1.044,0</b>

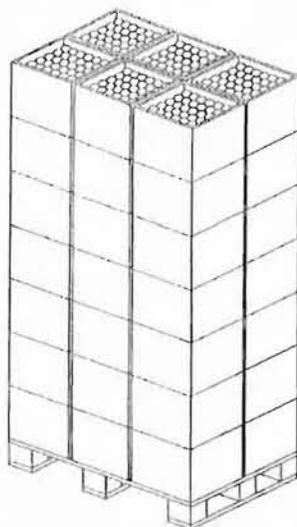


Figura 5.- Carga de servicio representativa: palet cargado con cajas de campo llenas (izquierda). Parte de la secuencia de pruebas realizadas, situaciones de carga distintas (fotos 2 y 3) (derecha).

para dos situaciones opuestas: la situación sin carga y la situación de carga a la máxima capacidad portante. No se proporcionan valores para situaciones intermedias.

Se realizaron varias experiencias in situ para determinar la influencia de estos efectos.

Como sobrecarga de uso de servicio más representativa se ha establecido el peso proporcionado por los elementos

que aparecen en la figura 5, con que se suelen cargar los vehículos estibadores de estas características en este tipo de naves.

Se tomó como unidad, la carga de 1.050 kp, correspondiente a los elementos ya descritos.

La introducción de cargas se realizó mediante la aplicación de las presiones sobre la superficie de cada elemento

finito, tal y como se observa en la figura 6 y según los patrones de carga predefinidos. Además, para cada hipótesis de cálculo, se estudiaron distintas posiciones de carga (centrada, sobre el borde, en la esquina) al efecto de comparar los resultados.

#### 4.2.- Datos introducidos al cálculo y operatividad del sistema

El conjunto de supuestos introducidos al cálculo viene dado por la combinación de las siguientes variables (El rango de magnitudes elegidos permitió tener una casuística suficientemente amplia, para poder plasmar los resultados con posterioridad).

Para cada tipo de carga se analizaron distintos tipos de posiciones (mínimo 2). Cada uno de ellos combinado con:

- Tres espesores de losa distintos (10, 15 y 20 cm)
- Tres espesores de base granular distintos (20, 40 y 70 cm)
- Cuatro tipos de explanada distintos  $E_s = 50, 100, 200, 500 \text{ kp/cm}^2$

A cada combinación de elementos distinta se le llamó hipótesis de cálculo. Se cribaron aquéllas que respondían a combinaciones con poco sentido constructivo (p.e. 10 cm de espesor de losa y 70 cm de base). Se realizaron más de 100 ejecuciones del programa de cálculo. Para cada cálculo se controlaron y analizaron los siguientes tipos de resultados: momentos flectores negativos y positivos, tensiones máximas de tracción en las caras superior e inferior de la solera respectivamente, tensiones máximas de compresión en dichas caras, todo ello para sendas direcciones  $x$  e  $y$ , deformaciones máximas

de la losa, tensiones máximas en la base granular, tensiones en el conjunto del suelo. Los resultados se obtuvieron mediante la selección de la salida gráfica de resultados de que dispone el ANSYS (figuras 7, 8 y 9). Se gestionaron más de 1.200 imágenes.

#### 5.- Resultados y conclusiones

Se observó una gran coincidencia entre los valores de las tensiones máximas obtenidas a partir de las expresiones de Westergaard modificadas<sup>(4,5)</sup> y los resultados obtenidos con el ANSYS a partir del modelo, lo que sirvió para determinar la validez del mismo. Éste y sus colaboradores (Teller, Sutherland, etc.) modificaron las expresiones a partir de los resultados obtenidos de observaciones experimentales. Los resultados obtenidos a partir del modelo construido con elementos finitos confirma este comportamiento.

La tendencia observada en las funciones de tipo exponencial que relacionan valores de tensiones de flexotracción con el tipo de explanada a partir del módulo de deformación  $E_s$ , coinciden con las análogas obtenidas por la PCA<sup>(8)</sup> y recogidas por Escario<sup>(12)</sup>, utilizando, en este caso, el coeficiente de balasto  $K$ .

Se pone de manifiesto la poca influencia que tiene el módulo de deformación del tipo de hormigón utilizado, sobre los valores finales de las tensiones.<sup>(7)</sup>

Como valor para el dimensionado nos interesa conocer las tensiones máximas de flexotracción que se produzcan en la solera. Del análisis de los resultados obtenidos para distintas hipótesis de cálculo y determinando las curvas envolventes de los valores máximos para distintas posiciones de carga, se obtuvo el gráfico de diseño que se adjunta (gráfico 1). Como parámetros fundamentales para

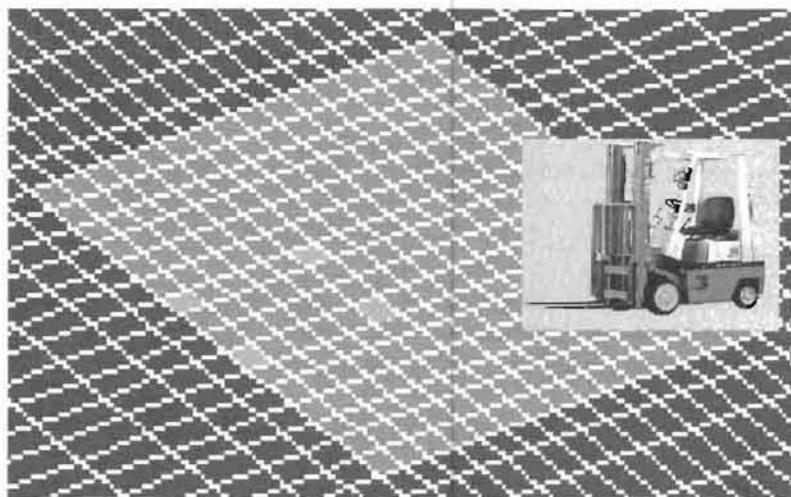
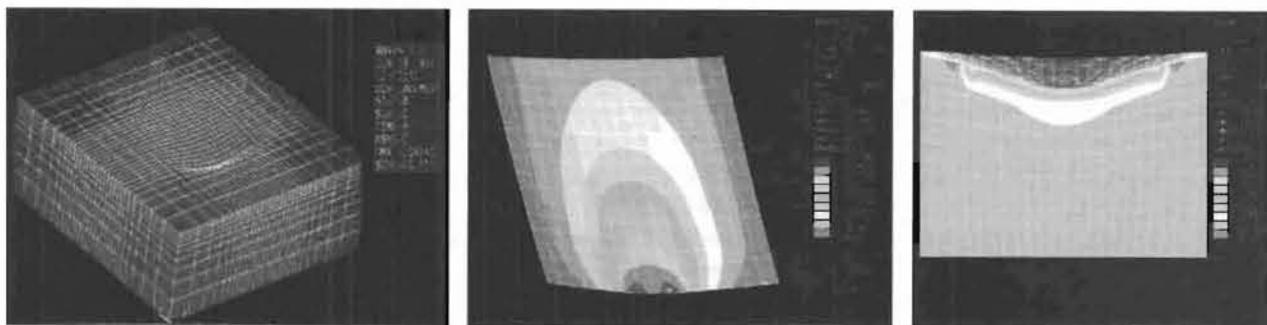


Figura 6.- Ejemplo de introducción de acciones al modelo (ANSYS)



Figuras 7, 8 y 9.- Ejemplos resultados ANSYS: deformaciones, tensiones en losa y suelo.

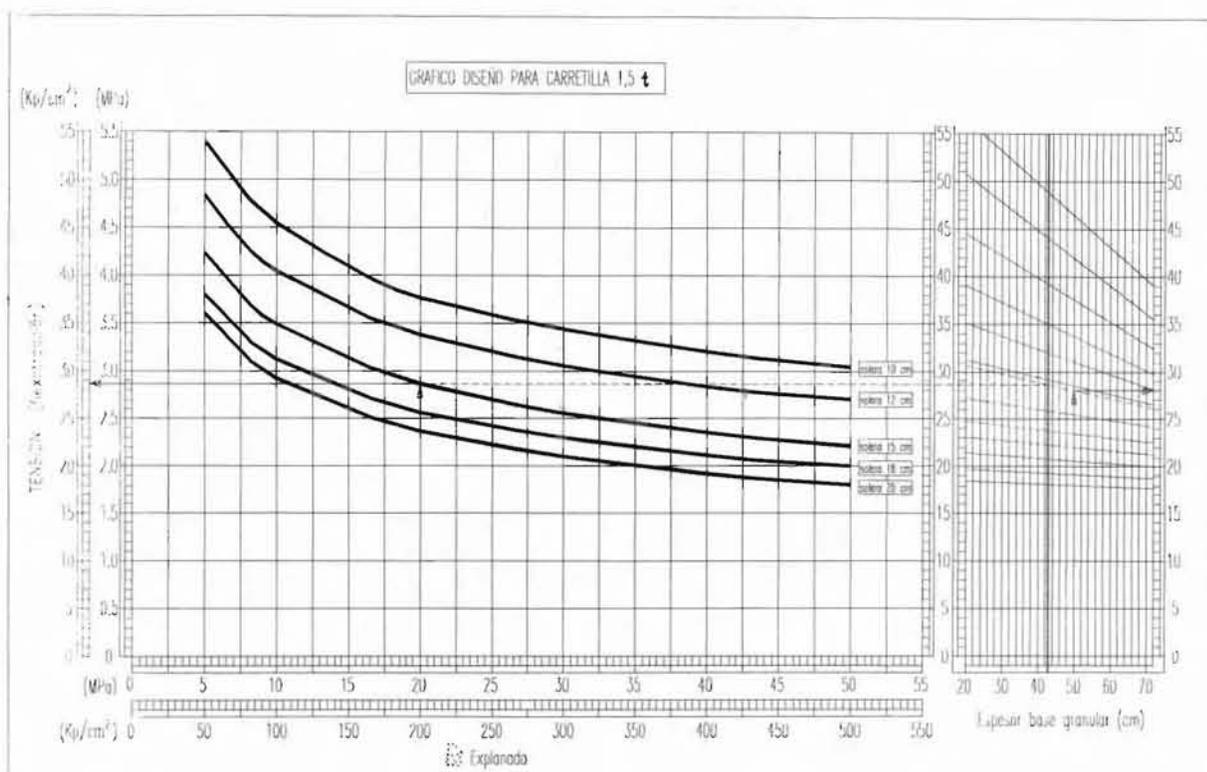


Gráfico 1.- Gráfico de diseño para soleras de la actividad agroindustrial. Cargas debidas al tránsito de vehículos estibadores de 1,5 t de capacidad portante.

diseñar una solera hacen falta el espesor de la misma y la tensión máxima de tracción que ésta es capaz de soportar dentro del régimen elástico. Este ábaco permite conocer estos valores para soleras utilizadas en el tipo de actividad descrito, es decir, cargas debidas fundamentalmente a la circulación de carretillas de 1,5 t de capacidad portante. El gráfico tiene dos partes. En la parte situada a la izquierda se ofrece una serie de curvas que proporcionan valores de tensiones de flexotracción máximas (ordenadas) para distintos espesores de solera que descansan sobre distintos tipos de suelos o explanadas (abscisas) determinados a partir del módulo de deformación  $E_s$ . La forma de proceder es la siguiente: se elige un determinado tipo de explanada, se asciende verticalmente hasta intersectar con la curva del espesor de solera deseado, se prosigue

horizontalmente hasta obtener la tensión correspondiente. Se puede proceder de manera inversa: para una determinada tensión de comparación y un tipo de explanada seleccionada obtener el espesor de solera necesario.

Las curvas ofrecidas han sido obtenidas a partir de cargas ponderadas. Los valores de estos coeficientes están dentro del rango anteriormente mencionado (1,7 a 2). Las tensiones obtenidas se pueden comparar directamente con la característica de flexotracción  $f_{ct,fl}$  correspondiente al tipo de hormigón elegido. Ya se dieron recomendaciones al respecto. Si se quiere dimensionar según estados límites últimos se puede minorar, además, la resistencia a flexotracción, pero, según la distinta bibliografía<sup>(13)</sup>, con el intervalo de coeficientes citado es

suficiente. Estas curvas han sido obtenidas utilizando una base granular (sub-base) de referencia de 43 cm, la tensión obtenida anteriormente debe corregirse ligeramente si se desea cambiar el espesor de base granular. Para ello se utiliza el diagrama de la derecha. Se señala la tensión obtenida a partir de la gráfica izquierda sobre la escala graduada. Se traza una recta horizontal hasta intersectar con la línea vertical de referencia correspondiente a los 43 cm de espesor de base. El punto de intersección estará comprendido entre dos rectas inclinadas. Debe trazarse una recta inclinada que pase por el punto señalado interpolación de las mismas. Se elige el espesor de base granular deseado. Se asciende verticalmente hasta intersectar con la recta trazada. Por último, se traza una recta horizontal que pase por el punto hasta intersectar con la escala graduada correspondiente a las tensiones.

Se ofrece el siguiente ejemplo aclaratorio, reflejado en el gráfico. Se toma p.ej. una solera de 15 cm de espesor de hormigón con una  $f_{ct,fl} = 30 \text{ kp/cm}^2$  y sobre una base granular de 50 cm y una explanada con un  $E_s = 200 \text{ kp/cm}^2$ . Se entra por abscisas, se intersecta con la solera de espesor deseado para la que se obtiene (parte izquierda) una tensión de  $28,7 \text{ kp/cm}^2$ , que es menor que la de comparación del tipo de hormigón elegido. Se traslada (línea de trazos) este resultado al gráfico de la derecha y se hace intersectar con la línea vertical más gruesa, correspondiente al espesor de base de 43 cm. Por el punto de intersección se representa una línea oblicua, interpolación de la superior e inferior respectivamente (línea de trazos). Se traza una recta vertical por el espesor de base dado hasta intersectar con la anterior y se toma lectura de la tensión definitiva  $28 \text{ kp/cm}^2$ .

Se han comparado los resultados con otros ábacos de diseño existentes<sup>(14)</sup> para soleras industriales con tráfico de remolques, obtenidos mediante otros procedimientos y se han contrastado resultados similares.

Para casos muy específicos, si se requiere mayor precisión en los cálculos, pueden emplearse las siguientes recomendaciones.

- El patrón de carga utilizado para la elaboración del gráfico presupone una separación entre ruedas de un mismo eje de 75 cm. Cada modelo de carretilla de mercado tiene una separación distinta. Para un modelo concreto pueden corregirse las tensiones (gráfico 2).

Así, pues, una separación de ruedas de 100 cm produce una caída en los valores de tensiones de un 10%

- Como carga de referencia se utilizó la propia de una central hortofrutícola. Si desean obtenerse áreas de contacto correspondientes a otros valores de carga diferentes, se puede utilizar el gráfico 3. Experiencia que, a su vez, sirvió para la determinar el área de contacto para la capacidad de carga máxima (1,5 t). Conocidas las áreas de contacto pueden determinarse las presiones de contacto.

- En cuanto a la influencia del área de contacto sobre las tensiones existe una tendencia más o menos lineal de forma que, a igualdad de carga, el doble de superficie de contacto produce el doble de tensión en la losa.

- Del análisis de las tensiones en el suelo (base y explanada) y del comportamiento conjunto solera-suelo se deduce que, a falta de otros criterios o de estudios más concretos, se disponga al menos una base granular de zahorras artificiales seleccionadas y compactadas en torno al 100% PM de 20 cm de espesor, ya que el beneficio que ésta produce es notable, al actuar sobre la relación de rigideces, sobre todo en casos de explanadas con módulos de deformación menores de  $200 \text{ kp/cm}^2$ . Para estos casos son recomendables espesores de 40 cm.

- Para cargas producidas por carretillas ordinarias de almacén se establece un espesor mínimo de solera de 12 cm, recomendándose el de 15 cm.

- Para cargas producidas por carretillas de mayor capacidad portante (3,0 t) se recomiendan espesores mínimos de solera de 20 cm.

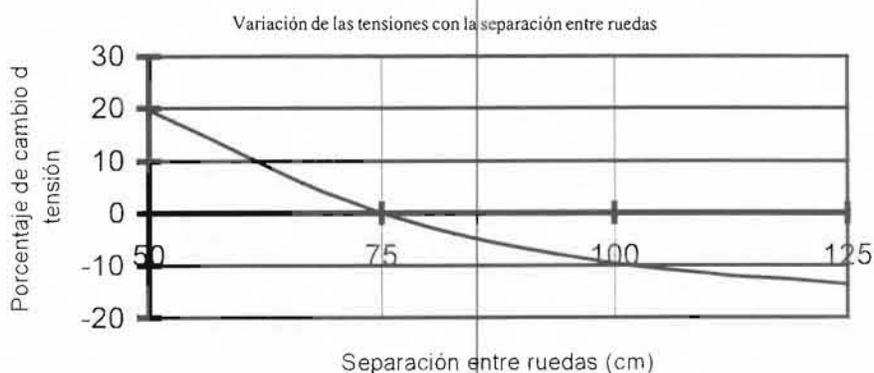


Gráfico 2.- Gráfico de corrección de tensiones en porcentaje respecto a separación entre ejes tomada como referencia.

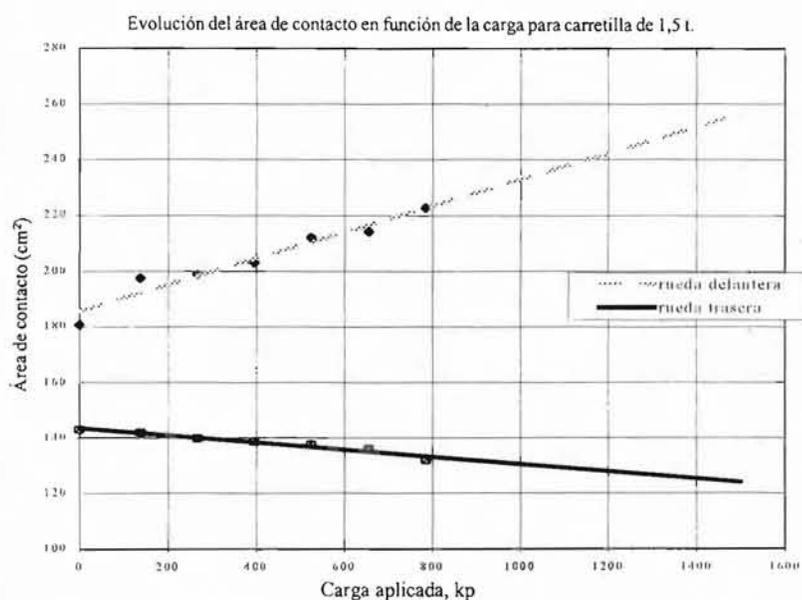


Gráfico 3.- Relación peso de carga aplicada en kp/área de contacto (cm<sup>2</sup>).

- Para cargas aplicadas mayores, como las debidas a apiladores o a estanterías se recomiendan mayores espesores de losa. Para este tipo de acciones u otros casos que impliquen cargas fuertes resulta conveniente armar la losa debidamente (soleras de hormigón armado)

- A falta de otros criterios económicos, desde el punto de vista estructural y de la transmisión de cargas, resulta más eficaz aumentar el espesor de solera que aumentar el espesor de base granular. Como órdenes de magnitud, sirvan las siguientes, un aumento de 20 cm de espesor de base granular supone una disminución de las tensiones máximas en la solera en torno al 15%; un aumento de 5 cm en el espesor de losa supone decrementos en torno al 30% en los valores de las tensiones.

- Por último, recordar la posibilidad de recurrir a soleras de hormigón en masa con fibras, cuyo uso va en aumento, especialmente en otros países como Alemania, Gran Bretaña, E.E.U.U. ligadas a la mecanización y automatización del proceso constructivo. La conveniencia de uso debe estudiarse con detalle en cada caso. Para este tipo de actividad ofrecen mayor interés las que incorporan fibras de acero frente a las que utilizan otro tipo de fibras plásticas. Sus ventajas se hacen patentes para casos con cargas importantes, a efectos de reducir espesores de losa y, sobre todo, la aparición de fisuras. La conveniencia y posibilidad de sustitución o eliminación del mallazo resulta discutible.

#### BIBLIOGRAFÍA

(1) ACI.-ACI-302: 'Guide for Concrete Floor and Slab Construction' (1980) 46 págs.-ACI-360 R-97 'Design of Slabs on Grade' (1997) 'Designing Floor Slabs on Grade' (DFG-S96).-Am. Concrete Institute

(2) CONCRETE SOCIETY: 'Concrete Industrial Ground Floors a guide to their Design and Construction' Technical Report No.34 (1994) (1997) Report of a U. K. Concrete Society Working Party

(3) TIMOSHENKO, S.; WOINOWSKY-KRIEGER: 'Theory of Plates and Shells' (1959) ed. Mc Graw-Hill.

(4) WESTERGAARD, H.M.: 'Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis' (1926) U. K. Public Roads, Vol. 7, No 2 region of concrete pavement slabs under large corner loads.

(5) TELLER, L.W.; SUTHERLAND, E.C. 'The Structural Design of Concrete Pavement' (1943) U. K. Public Roads.

(6) PICKETT, G. 'A study of stresses in the corner region of concrete pavement slabs under large corner loads' (1951) Portland Cement Association.

(7) P.C.A. 'Diseño de pavimentos de concreto para aeropuertos' Portland Cement Association (1977) ed. Limusa/ pág 23, 26, 21.

(8) P.C.A. 'Thickness Design for Concrete Pavements' Portland Cement Association (P.C.A.), 1966.

(9) 'AASHTO Interim Guide for Design of Pavement Structures' A.A.S.H.T.O (1972) (1981).

(10) 'Contribución al estudio de soleras de hormigón para la industria agroalimentaria mediante la técnica de los elementos finitos' Tesis Doctoral Ferrer Gisbert, C.; Ferrán Gozávez J.J. Universidad Politécnica de Valencia (1998).

(11) DELIBES, A.: 'Tecnología y propiedades mecánicas del hormigón' (1993) ed. INTEMAC, pág. 122.

(12) ESCARIO, J.L.; ESCARIO, V.; BALAGUER, E.: 'Caminos (Tomo II). Firmes de carreteras y aeropuertos' E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, pág. 972-981.

(13) NILSON, A.H.; WINTER, G.: 'Diseño de estructuras de concreto' 11ª ed. Mc.Graw Hill, pág 506.

(14) 'Slab Thickness Design for Industrial Concrete Floors on Grade', Packard R.G., Concrete Information Bulletin No.IS195.01D, Portland Cement Association, 1976