Rev. LatinAm. Metal. Mat.

Artículo Regular

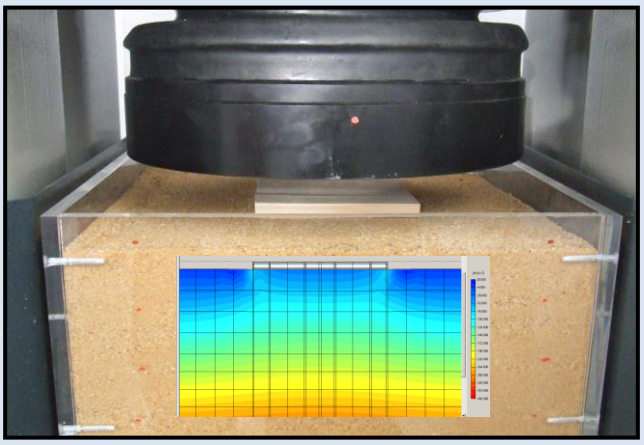
www.rlmm.org

ANÁLISIS EXPERIMENTAL EN LOSAS DE CIMENTACIÓN MEDIANTE MODELOS A ESCALA: LOSAS ALIGERADAS CON BLOQUES DE EPS FRENTE A LOSAS MACIZAS

J. M. Dávila[1], A. Jaramillo-Morilla[2], E. Mascort-Albea[2], J.A. Grande[1]*

1: Universidad de Huelva (España). Dpto. Ing. Minera, Mecánica, Energética y de la Construcción. Ctra. Huelva-Palos de la Fra.s/n, 21819. **2:** Universidad de Sevilla (España). Dpto. Estructuras de Edificación e Ing. del Terreno. Avda. Reina Mercedes, 2, 41012.

**e-mail: jmdavila@uhu.es*



RESUMEN

El objetivo del presente artículo es confirmar el distinto comportamiento que presenta la solución tradicional de losa maciza frente a una aligerada, empleando bloques de poliestireno expandido (EPS) como material aligerante, uniéndose las zonas macizas bajo pilares mediante nervios. Se mantienen por tanto, dos placas, superior e inferior, alrededor de los bloques aligerantes de EPS. Para ello se ha realizado dos modelos a escala, sometiendo cada uno de ellos a una serie de ensayos. Esto se ha podido analizar comparativamente con otros modelos hechos en ordenador, empleando para ello programas de Elementos Finitos. Los resultados obtenidos permiten afirmar que, en situaciones de suelos blandos, con posibles problemas de asientos, la solución planteada presenta importantes ventajas, al disminuir esos asientos en un porcentaje que variará en función de las condiciones particulares. Además de esto, se reducen en gran medida los asientos diferenciales entre apoyos, por lo que la alternativa planteada presenta un comportamiento más uniforme, así como ventajas constructivas.

Palabras Claves: Modelos a escala, Poliestireno expandido, Elementos Finitos, Asientos.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF SLABS FOUNDATION BY SCALE MODELS: LIGHTWEIGHT SLABS BY EXPANDED POLYSTYRENE BLOCKS OPPOSITE SOLID SLABS

ABSTRACT

The aim of this work is to confirm the different behavior of traditional solid slab versus lightened solution, using expanded polystyrene (EPS) blocks as a lightening material, joining solid areas under pillars with grating beams. Therefore there are two plates, one of them on the top and the other one on the bottom, covering the EPS blocks. For this purpose, two scale models have been performed, each of them being subjected to a series of tests. These have been able to comparatively analyze with models made in computer, using Finite Element programs. The results obtained allow us to assert that in situations of soft soils, with possible problems of settlements, the proposed solution has significant advantages by reducing this settlement on a percentage it will vary depending on specific conditions. Besides this, it significantly reduces the differential settlements among supports, so this alternative has a more uniform behavior, as well as constructive advantages.

Keywords: Scale models, Expanded polystyrene, Finite elements, Settlement.

1. INTRODUCCIÓN

Como alternativa a la losa maciza de hormigón armado, han surgido en las últimas décadas distintas aplicaciones, como la empleada parcialmente en la cimentación de La Sagrada Familia (Fachada de la Pasión), con la utilización de perfiles de acero a modo de emparrillado embebido en el canto de la losa [1], cuando realmente funcionaban como armaduras en tracción.

Tras la aparición del EPS (EPS Geofoam en su denominación en inglés)[1] y su posterior aplicación como material de construcción, han sido muchos los campos a los que se ha dirigido su empleo, siendo uno de ellos el de la geotecnia. Existen estudios recientes en este campo [2,3,4] en los que se ha analizado sus propiedades y posibles aplicaciones; destacando su empleo como material de relleno[5], incluso como árido en forma de bolas para morteros ligeros [6,7,8]; en forma de bloques, para aligerar losas de cimentación [9] o como protección de conducciones enterradas [10,11], para estabilización de suelos expansivos [12,13] y otras, aprovechando la ventaja deducida de su baja densidad .

Recientemente ha aparecido en el mercado una solución constructiva denominada *Cimentur* [14], en la que mediante el empleo de bloques de EPS, se puede realizar un vaciado completo de la superficie ocupada por la cimentación. Esta solución permite una ejecución más rápida; sin embargo, conceptualmente, no supone aportación alguna desde un punto de vista puramente estructural o geotécnico, entendiéndola como una mejora constructiva, en la que en cualquier caso, se hace necesario colocar conectores entre los bloques.

Una solución con cierta semejanza a la anterior (aplicable a viviendas unifamiliares) consiste en una losa apoyada sobre un continuo de bloques de poliestireno expandido, a la que se le añaden unos nervios en los bordes hormigonados sobre unas piezas prefabricadas de EPS [15].

En esta investigación se pretende abordar el estudio de una alternativa, que consistiría en una losa aligerada en la zona central de su canto, manteniendo dos placas a ambos lados de esta y enlazando las zonas macizas bajo los pilares mediante un sistema semejante al de un emparrillado de vigas.

En una primera fase, se realizarán unos modelos en ordenador, empleando para ello el programa SAP 2000. Una vez obtenidos los resultados en estos modelos, se pretende, dentro de lo posible, confirmarlos mediante un estudio comparativo con dos modelos a escala. Se ha construido para ello, dos modelos de madera - teniendo en cuenta que su módulo de elasticidad es el que más se acerca al del hormigón, dentro de los materiales disponibles - uno macizo y otro con zonas aligeradas, de forma semejante a la ya comentada en el párrafo anterior.

Para cubrir distintas condiciones de apoyo, se ha empleado en los ensayos dos soluciones distintas, una con un terreno granular en todo el espesor y la otra con un terreno superficial cohesivo.

Planteamos en este trabajo una alternativa a la tradicional solución de cimentación mediante losa maciza. Esta aparece recogida en distintas publicaciones [16,17]. En estas soluciones el conjunto está concebido a modo de superestructura entre las losas y los muros de sótano, opción ya empleada asiduamente en edificios de gran altura. La solución que aquí se propone consistiría en un elemento único de cimentación mediante una losa aligerada, en la que estas zonas estarían "rellenas" (a modo de encofrado perdido) con bloques de EPS.. Mediante esta opción se pretenden obtener dos mejoras en la cimentación, tal como ya se apunta en algunas publicaciones [18]: por un lado, un aumento de rigidez sin coste en volumen de hormigón y por otro, reducir en lo posible los asientos.

Como objetivos concretos de esta investigación se plantean los siguientes:

1. Estudiar la posibilidad de uso de los bloques de EPS como piezas aligerantes en estructuras de cimentación.
2. Comparar la solución de losa maciza frente a la aligerada.
3. Evaluar y validar los resultados mediante una serie de ensayos a escala reducida
4. Analizar el comportamiento estructural de una losa aligerada con EPS.

[1] En este artículo se hace referencia al EPS como poliestireno expandido en bloques o elementos rígidos, existiendo en el mercado algunas resinas denominadas Geofoam que se emplean mediante inyección.

5. Evaluar el comportamiento frente a asientos en este tipo de soluciones
6. Evaluar la viabilidad técnica de la solución propuesta.

2. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

Para llevar a cabo este análisis, se han elaborado dos maquetas a escala 1:100, una maciza y otra aligerada, de dimensiones 120x120x10 mm en ambos casos. Para la placa maciza, los nervios se han dimensionado de 1,5x8 mm, lo que correspondería a tamaño real con un espesor de 15 cm y un canto para la zona aligerada de 80 cm. Las placas superior e inferior de esta losa tendrían un espesor de 1 mm (10 cm a tamaño real). En la figura siguiente (figura 1) se representa en planta el modelo de losa aligerada.

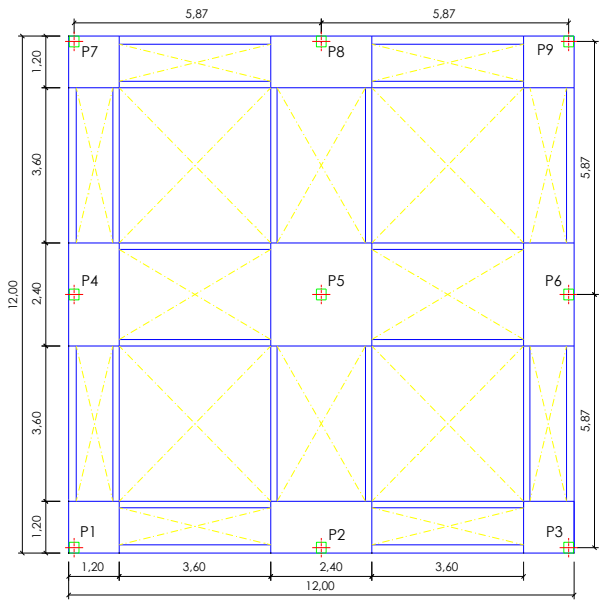


Figura 1. Planta acotada del modelo aligerado (cotas en cm).

Los ensayos se han realizado en una prensa de la empresa Controls, modelo 50-C42Z00, de 2.000 kN de capacidad y marco de gran rigidez, empleándose para ello la opción de deformación constante, hasta alcanzar una presión sobre el terreno de 0,10 MPa y en una segunda fase hasta 0,15 MPa. Una vez realizados los primeros ensayos, y con los asientos obtenidos, se han comparado con los cálculos realizados con el programa SAP 2000, empleando elementos tipo shell de cuatro nodos y solid de ocho nodos, con las mismas dimensiones a las del modelo a escala, con el fin de obtener un módulo de balasto equivalente.

Para este modelo, se han tomado como base los datos reflejados en la tabla 1. Junto a estos, se ha aplicado para los cálculos en ordenador de los modelos a tamaño reducido, cargas puntuales correspondientes a los soportes reflejados en el esquema de planta (incluidos en la tabla 1). De esta forma, se llegó a una presión media bajo la losa de 0,1 MPa, semejante a la alcanzada en los ensayos en la prensa, resultando a partir de estos, un coeficiente de balasto de $K_{losa(12x12cm)}$ 0,10 N/mm^3.

Tabla 1. Datos de los modelos a escala reducida.

Datos de los materiales (madera)		
Módulo de deformación longitudinal E (MPa)	Coeficiente de Poisson ν	Peso específico (kN/m^3)
10.000	0,33	4
Acciones aplicadas (N)		
Soportes de esquina (P1, P3, P7 y P9)	Soportes de borde (P2, P4, P6 y P8)	Soporte central (P5)
113	177	280

El modelo a tamaño real con el programa SAP se realizó con las características de la tabla 2, llegándose, de igual forma, hasta una presión media de 0,1 MPa. En los mismos modelos, se han realizado ensayos hasta alcanzar una presión de 0,15 N/mm^2; dando en estos casos, valores para las cargas proporcionales a este valor.

En cuanto a las propiedades del poliestireno expandido (EPS), se han tenido en cuenta las indicaciones recogidas por Negussey [19] y Bajracharya et al [20], obteniéndose de las ecuaciones (1) y (2):

$$E = 450\rho - 3.000 \text{ (kPa)} \quad (1)$$

$$\nu = 0{,}0056\rho + 0{,}0024 \quad (2)$$

donde:

E es el módulo de elasticidad longitudinal,

ν es el coeficiente de Poisson y

ρ es la densidad de los bloques de EPS en kg/m^3.

Como material para modelar el terreno de apoyo de la cimentación, se ha seleccionado en un primer estudio, suelo granular comprendido entre 1 y 2 mm, obtenido mediante tamizado, limpio y seco. El modelo se introdujo en el interior de un recipiente de metacrilato de 32x32x32 cm lleno con el terreno preparado, hasta completar 27cm. Para el llenado del recipiente se procedió mediante tongadas de 5 cm, compactadas mediante una pequeña maza preparada especialmente para este fin. Para un segundo análisis se empleó terreno cohesivo de la zona, desecado, compactándose ligeramente cada una de las tongadas. Una vez finalizado cada uno de los ensayos, se procedió al remoldeado de la zona superficial de suelo y se compactó ligeramente, con la finalidad de tener en todos ellos unas condiciones los más parecidas posibles.

Tabla 2. Datos losas a tamaño real.

Datos de materiales	Módulo de deformación longitudinal E (MPa)	Coeficiente de Poisson ν	Peso específico (kN/m^3)
Hormigón (HA-25; f_{ck}= 25 MPa)	2,5·10^4	0,2	24
Poliestireno expandido (EPS)	6	0,1	0,3
Coeficiente de balasto	8.500 kN/m^3		
Acciones Aplicadas (kN)	Soportes de esquina (P1, P3, P7 y P9)	Soportes de borde (P2, P4, P6 y P8)	Soporte central (P5)
	1.130	1.770	2.800

En las siguientes figuras (2 a 5) se refleja el montaje de ambos modelos a escala.

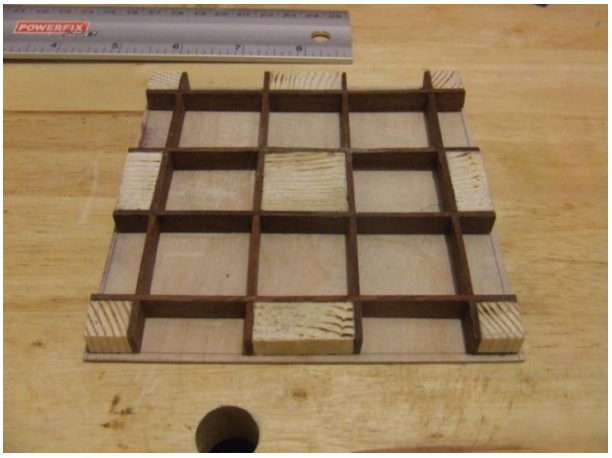


Figura 2. Zonas macizas y nervios interiores montados.

Figura 3. Aspecto interior de las dos placas montadas.

Para simular el efecto de los soportes sobre la losa, se han dispuesto “nueve pilares enanos” que trasmiten la presión ejercida por la prensa sobre otra placa maciza superior de 18 mm. Estos “pilares enanos” se decidió no realizarlos a escala para evitar un posible efecto de desplome o inclinación durante los ensayos, lo que sucedía en los modelos preliminares realizados. Se entiende que la trasmisión de cargas se realiza de forma correcta,

©2018 Universidad Simón Bolívar

modificándose únicamente el tipo estructural de los "pilares enanos" y por tanto su forma de trabajo, lo que no forma parte del estudio de esta investigación.

Figura 4. Modelos terminados. (a) Losa aligerada. (b) Losa maciza.

En la figura superior (4) se pueden apreciar las marcas realizadas para poder tomar unas medidas de referencia.

En la figura 5 aparece el modelo macizo colocado dentro de la urna empleada para los ensayos.

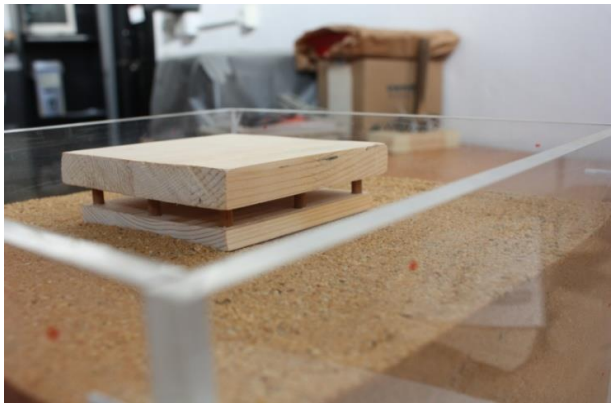


Figura 5. Detalle de la placa maciza dentro de la urna.

Hasta aquí la descripción se ha centrado en el modelo realizado a escala. Pasamos ahora a describir los distintos modelos que se han utilizado para su análisis en ordenador. Se ha realizado cuatro modelos, dos de ellos a la escala del ensayado en laboratorio y los otros dos con las dimensiones reales. Se pretende con ello comparar los resultados con los de los ensayos y por otro lado, ver si estos corresponderían de forma similar, con los obtenidos a tamaño real. Al igual que ya se explicó en apartados anteriores, los modelos se han hecho, empleando elementos tipo shell de cuatro nodos y en otros modelos elementos solid de ocho nodos (los esquemas de ambos modelos se presentan en la figura 6). En este último caso, también de nuevo, se ha modelado solo la cuarta parte de la pieza, aplicando condiciones de simetría.

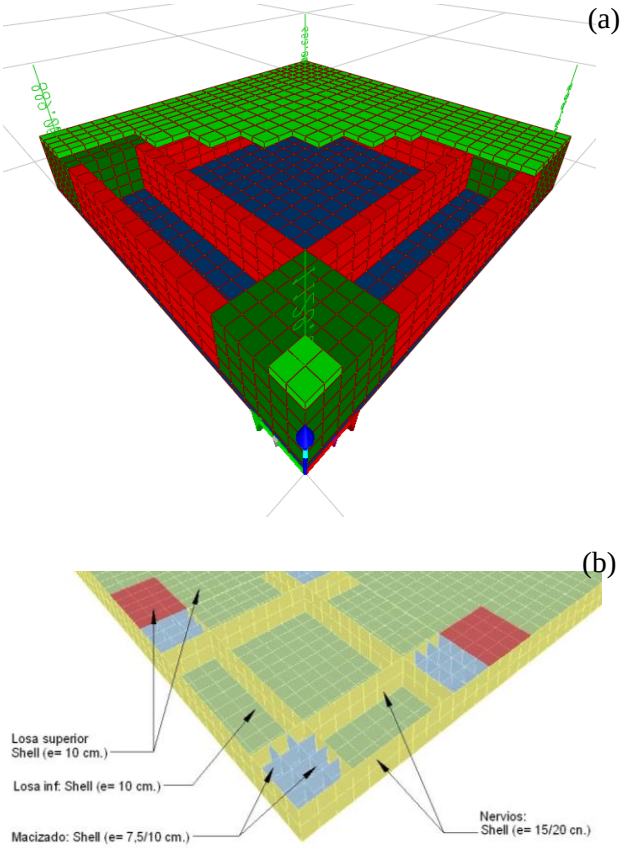


Figura 6. Modelo usados en el análisis. (a) Modelo realizado con elementos solid. (b) Modelo realizado con elementos shell.

3. JUSTIFICACIÓN Y METODOLOGÍA

Aún cuando existen alternativas al modelo de Winkler [21], entendemos que este nos da una aproximación válida para nuestro propósito, más aun, cuando pretendemos hacer un análisis comparativo entre la solución de placa maciza y la aligerada. Para analizar estas cimentaciones hemos empleado en primer lugar, el programa de elementos finitos SAP 2000 (versión 14), apoyándonos en estudios comparativos de métodos analíticos, numéricos y el MEF [22, 23, 24]; en el que se han

utilizado elementos tipo shell de cuatro nodos y 10 cm de espesor para la placa superior e inferior; elementos shell de 15 y 20 cm para los nervios de la losa menor y mayor respectivamente. Para las zonas macizas se han utilizado así mismo elementos tipo placa en ambas direcciones. En todos los casos se ha empleado la opción "Shell-Thin" de placas de pequeño espesor. El esquema de la modelización se puede ver en la figura 6. En todos los modelos se ha seguido la hipótesis de comportamiento lineal, entendiendo que la diferencia con un cálculo no lineal no sería relevante en la determinación de los asientos ni en el comportamiento estructural del conjunto [25].

El procedimiento de medida de desplazamientos en los modelos ensayados, se basa en la calibración de imágenes digitales que se toman en las mismas condiciones. Para ello se han realizado una serie de pares de fotos, antes y después de la deformación, con una cámara situada sobre un trípode, sin cambiar ningún parámetro de la óptica, para que la posición y los aumentos de la imagen que se forma sobre el plano del sensor digital no varíen, salvo por el movimiento del objeto.

Para la medida de distancias en píxeles sobre las imágenes se ha utilizado el programa de análisis y procesamiento de imágenes digitales "ImageJ". Es un programa de dominio público desarrollado en el *National Institutes of Health* de Estados Unidos, orientado al tratamiento de imágenes médicas y científicas.

Para la calibración de la imagen se toman como referencia distancias sobre el objeto (D_1, D_2, ...), que son conocidas con gran precisión. Para ello se han realizado medidas entre aristas bien definidas o entre marcas realizadas sobre los modelos, utilizando así mismo, las imágenes tomadas sobre el objeto sin deformación. Con estas medidas se obtiene la correspondiente escala de la imagen formada sobre el sensor, sin más que dividir la distancia de referencia entre el número de píxeles correspondientes en la imagen, lo que nos proporciona el factor de conversión (F) entre distancia real en milímetros y distancia virtual en píxeles. Para obtener mayor precisión se realizaron varias medidas de calibración, promediando los factores de conversión obtenidos, que se suelen expresar en micras por píxel .

Una vez obtenido el factor de conversión, para el análisis de las imágenes basta con determinar el desplazamiento (Δy, en píxeles) que se ha producido entre las dos imágenes que se han tomado antes y después de aplicar una cierta carga. Aplicando el factor de conversión se obtiene el desplazamiento real en micras:

Desplazamiento (micras) = Δy (píxeles) * F (micras/píxel) (3)

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANALÍTICOS OBTENIDOS Y DISCUSIÓN

En la siguiente figura (nº 7) se muestran todos los resultados obtenidos en los ensayos correspondientes a suelo granular, apareciendo en las dos primeras filas (tonos rojo y azul) los alcanzados con presiones de 0,10 Mpa y en las dos superiores los correspondientes a 0,15 MPa.

De forma semejante se aportan a continuación (figura 8) los resultados de los ensayos en el modelo con suelo cohesivo.

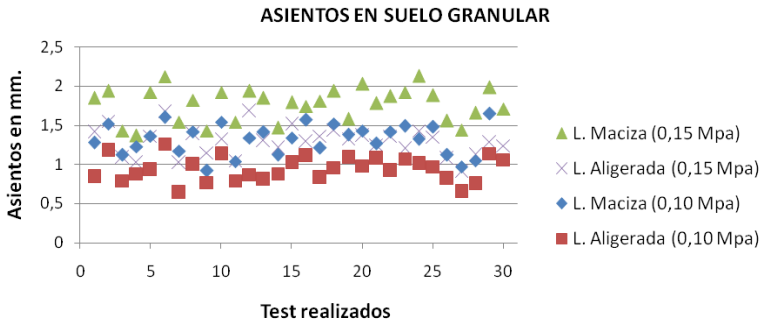


Figura 7. Asientos obtenidos en los ensayos realizados con terreno granular.

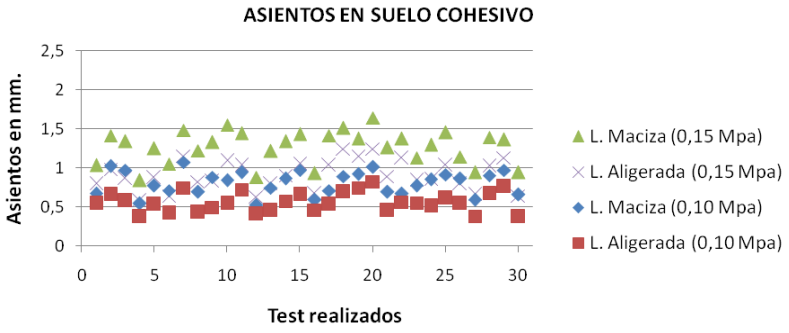


Figura 8. Asientos obtenidos en los ensayos realizados con terreno cohesivo.

De ambos modelos se han realizado un total de treinta ensayos (inicialmente, hasta llegar a una presión de 0,10 MPa y posteriormente hasta los 0,15 MPa).

En la figura siguiente (nº 9) se resumen los resultados de reducción de asientos, en porcentaje, obtenidos en ambos casos. Para obtener estos gráficos se han eliminado los cinco resultados superiores e inferiores.

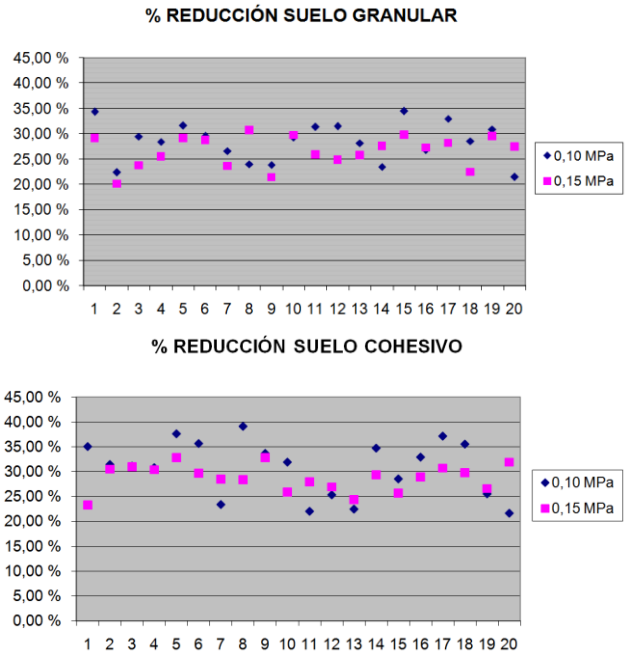


Figura 9. Reducción de asientos obtenidos en los ensayos con suelo granular y cohesivo.

Como resultados finales, las medias determinadas de cada uno de los ensayos quedarían como sigue (tabla 3):

Tabla 3. Reducción de asientos.

% DE REDUCCIÓN DE ASIENTOS		
Suelo granular	Presión 0,10 MPa	28,47 %
	Presión 0,15 MPa	26,54 %
Suelo cohesivo	Presión 0,10 MPa	30,82 %
	Presión 0,15 MPa	28,78 %

En lo que respecta a los resultados derivados de los cálculos en ordenador, presentamos como más significativos, en la figura 10, los resultados comparativos para la losa maciza y la aligerada a tamaño real, modelados con elementos tipo shell.

Para no extendernos más, presentamos en la tabla siguiente (nº 4) todos los resultados obtenidos en los cálculos por ordenador.

Tabla 4. Asientos obtenidos en los distintos modelos en ordenador.

	12 x 12 m El. Solid		*12 x 12 m El. Shell*	
	Maciza	Aligerada	Maciza	Aligerada
Asientos (mm)	13,00	9,56	13,33	9,50
Reducción	26 %		29 %	

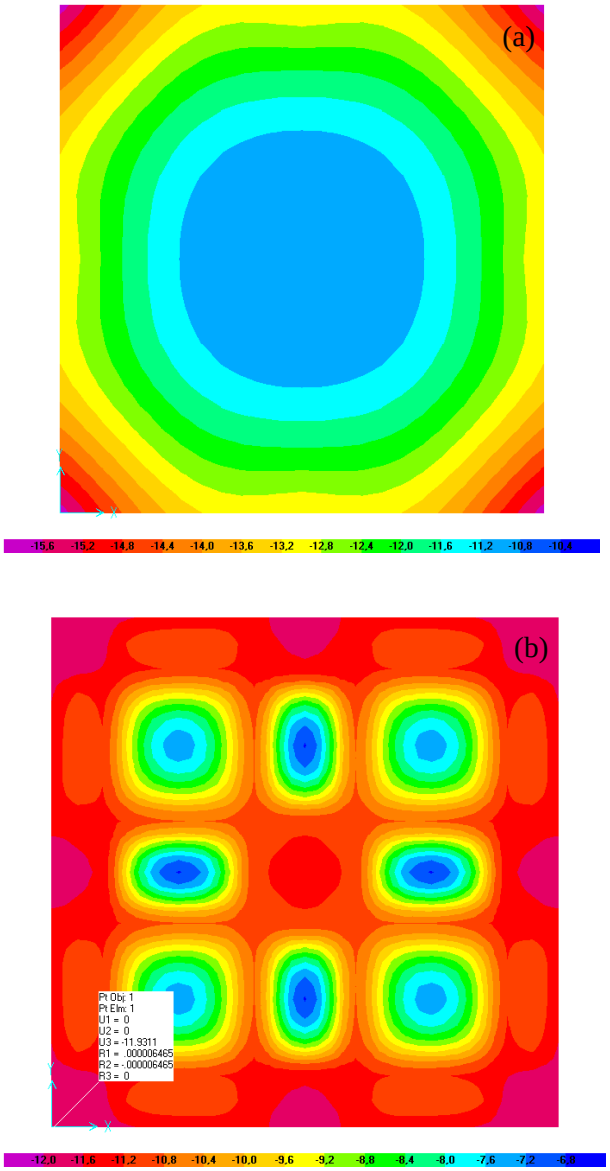


Figura 10. Asientos en losas (tamaño real) con elementos tipo shell. (a) Losa maciza. S_{med}= 13,33 mm. (b) Losa aligerada. S_{med}= 9,50 mm.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Comparando estos últimos resultados, con los que anteriormente se indicaron en los ensayos, podríamos concluir, que hay bastante semejanza entre unos y otros, si bien, aparentemente, los resultados obtenidos en el laboratorio arrojan valores ligeramente más altos en cuanto a reducción de asientos entre el modelo aligerado frente al macizo, pero en todo caso, estaríamos en torno a unos valores de reducción de alrededor del 27 o 28%, todo ello si no tenemos en cuenta el resultado obtenido en el caso del modelo a escala estudiado en SAP. Aquí el porcentaje baja de forma algo más notable. Entendemos que esto sería debido a un cierto desajuste en el valor del coeficiente de balasto en un modelo tan reducido.

Se han representado en la figura 11 las leyes de momentos flectores de las dos soluciones. Del análisis de ambos gráficos, se pueden extraer algunas ideas fundamentales: los valores de los momentos máximos, tanto positivos como negativos, se reducen de forma muy significativa en la losa aligerada; además de esto, la forma aproximadamente parabólica de la ley de momentos en la losa maciza, se manifiesta en el caso de la aligerada con unas pequeñas "lomas" con esfuerzos muy constantes.

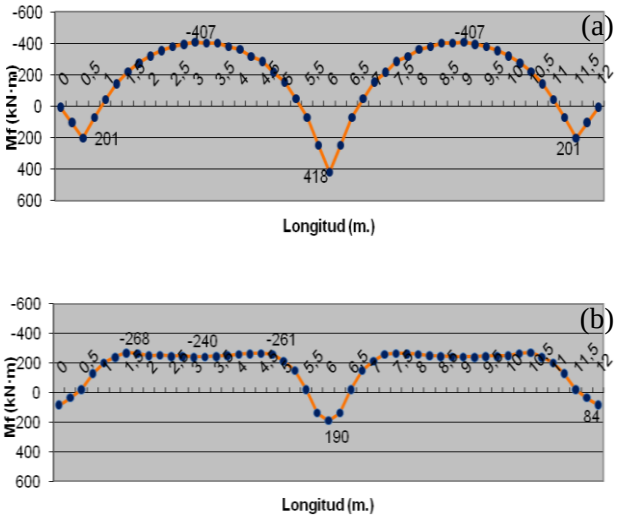
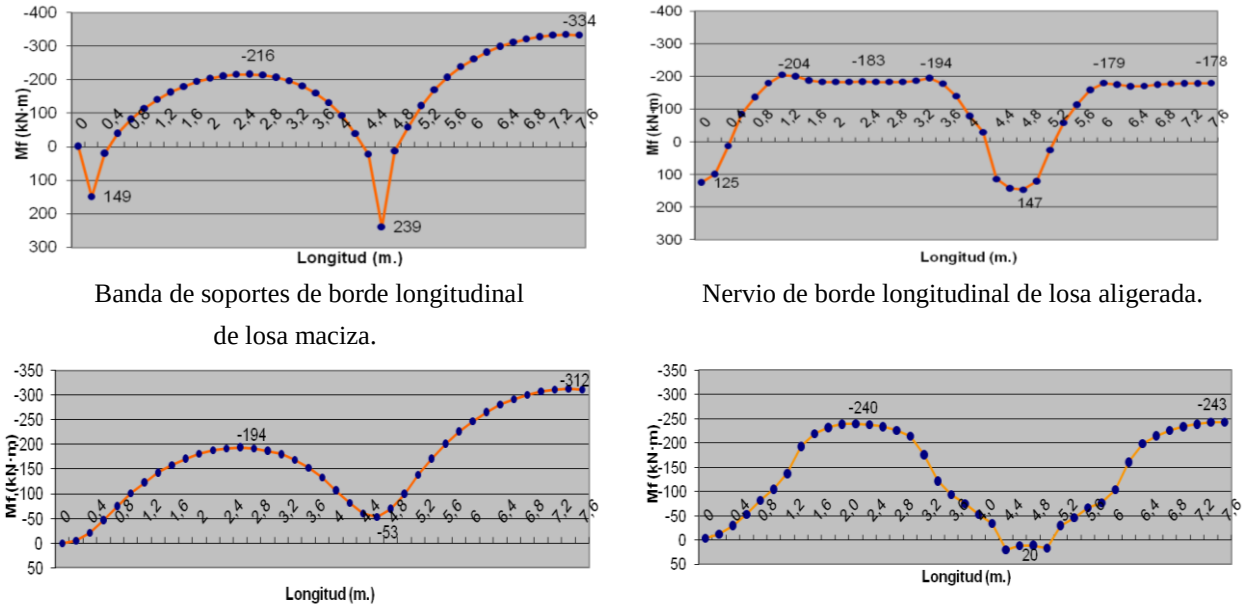


Figura 11. Ley de momentos en borde longitudinal. (a) Banda de soportes de borde de losa maciza. (b) Nervio de borde de losa aligerada.

Representaciones similares se han realizado [9] con otros modelos de dimensiones y estados de carga distintos (figura 12), en los que se si se observan los valores máximos, tanto positivos como negativos; es claro, que en el caso de la solución aligerada, estos también se mantienen casi constantes entre los distintos vanos, mientras que en la losa maciza hay importantes diferencias entre los vanos exteriores y el vano central. Además de esto, en el diagrama de la losa maciza, las leyes siguen una distribución aproximadamente parabólica. Por el contrario, en la propuesta de la losa aligerada, se pueden apreciar zonas ascendentes y descendentes casi lineales,

junto a las zonas de negativos con “lomas” bastante extendidas en longitud en los vanos, coincidiendo dichas zonas ascendentes – descendentes con las zonas macizas.

Si pasamos ahora a estudiar las gráficas inferiores de la figura 12, correspondientes al primer nervio longitudinal interior, en el caso de la losa aligerada (cota y= +0,80 m), se aprecia cómo las ”lomas” y zonas ascendente – descendentes permanecen, pero menos acentuadas que en el caso del nervio de borde; sin embargo, se siguen manteniendo unos valores máximos (tanto positivos como negativos) muy similares entre vanos.



Banda de soportes de borde longitudinal de losa maciza.

Nervio de borde longitudinal de losa aligerada.

Línea interior (y= +0,80 m) de losa maciza

Nervio interior de losa aligerada.

Figura 12. Leyes de momentos en losa de 12x12 y tres vanos (sólo se representa la mitad).

Tal como se aprecia en los porcentajes de reducción reflejados en la figura 9, se observa cierta disparidad en los mismos. Esta es debida, siendo por otro lado algo esperado, a las ligeras diferencias entre los distintos ensayos realizados, en cuanto a las condiciones del terreno, a pesar del procedimiento seguido.

A nuestro entender, son más relevantes los resultados para la presión de 0,15 MPa, en los que “la puesta a 0” del ensayo, que siempre puede presentar cierto error, es ya menos apreciable. En cualquier caso, estaríamos ante un porcentaje de reducción de alrededor del 27 % en el caso del suelo granular, y de un 29 % en el del suelo cohesivo, siendo las diferencias entre uno y otro tipo de suelo de poca importancia.

Independientemente del mecanismo de trabajo de la losa, entendemos que el sistema presentaría algunos problemas constructivos, como sería la sustentación del armado superior, o la colocación de separadores en esa zona. En contrapartida, el sistema planteado supone un ahorro importante en cuanto al volumen de hormigón, en particular en los dos casos que se han analizado; este ahorro supone un 36% de ahorro para la losa menor, y un 46% en el caso de la mayor. Como es lógico, estos valores sólo son orientativos, ya que en cada caso particular las dimensiones de las zonas macizas, ancho de nervios y cantos variarán, y deberán estudiarse adecuadamente. Otro inconveniente en determinadas circunstancias sería la posible penetración del agua a través de las placas, lo que podría hacer necesario un aumento de los recubrimientos o espesores en estas.

6. VALORACIÓN ECONÓMICA ESTIMADA

A título orientativo, se indica a continuación un prepuesto comparativo de la losa maciza de mayores dimensiones, frente a la solución aligerada (tabla 5).

No se ha tenido en cuenta el coste de mano de obra, por entender que en ambas situaciones sería muy similar, considerando que para la losa maciza, sería necesario sustentar la armadura superior, mientras que en la aligerada, se tendrían que colocar separadores en esa misma armadura.

Tabla 5. Valoración económica estimada.

LOSA MACIZA			
Concepto	Precio/Ud	Dimensiones	Precio (€)
M^3 de Hormigón HA-25/P/20/IIa V. con bomba.	107,66 €/m^3	126 m^3	13.565
Kg de acero B-400S en cimentación.(*)	1,37 €/kg	12.400 kg.	16.988
TOTAL LOSA MACIZA			30.553 €
LOSA ALIGERADA			
M^3 de Hormigón HA-25/P/20/IIa V. con bomba.	107,66 €/m^3	68 m^3	7.321
Kg de acero B-400S	1,37 €/kg	7.800 kg.	10.686
M^3 Bloques de porexpán	105,72 €/m^3	58 m^3	6.132 €
TOTAL LOSA ALIGERADA			24.139 €

(*) La estimación de las cuantías de acero, se ha hecho a partir de los esfuerzos obtenidos para las condiciones de Klosa= 1.000 kN/m^3 y simplificando en cierta forma el armado para simplificar, así mismo, los cálculos de costes del acero.

Como se puede apreciar, la solución de losa aligerada supone un cierto ahorro en coste de materiales, y todo ello teniendo presente el coste elevado que tiene actualmente el EPS por la evolución de los precios del petróleo.

7. CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo un análisis comparativo de una cimentación mediante losa maciza frente a una que presenta zonas macizas bajo los pilares, unidas entre sí por nervios, todo ello junto a una losa inferior y otra superior que enlazan todo el conjunto. El resto de su volumen se completaría con bloques de poliestireno expandido de alta densidad.

Para el análisis se emplearon diferentes modelos en cuanto a las condiciones de carga y condiciones de apoyo; empleando para ello un software de elementos finitos y una serie de ensayos realizados en modelos a escala.

Con los resultados obtenidos, podríamos concluir con los puntos siguientes:

- Al emplear la solución propuesta de losa aligerada se obtienen importantes ventajas: se reducen de manera significativa los asientos de la cimentación, junto a una reducción, así mismo, de los términos diferenciales entre distintos puntos de la misma. Junto a esto, se obtiene una reducción de importancia en el volumen de hormigón y las cuantías de acero.
- Con la solución propuesta se optimizaría en gran medida la armadura de la losa, al obtenerse unos esfuerzos muy similares entre los distintos vanos de esta, lo que permitiría un armado prácticamente uniforme a los largo de los nervios.
- Hay bastante semejanza entre los modelos realizados en ordenador y los realizados a escala, con una reducción de los asientos ligeramente superior entre el modelo aligerado y macizo en los ensayos de laboratorio. Esta reducción estaría en torno al 27 o 28%, sin que la densidad del EPS tenga una gran influencia y los porcentajes de reducción son similares a los obtenidos por Abdelrahman y El Ragi [26] para losas de cimentación sobre arcillas blandas usando bloques de EPS bajo la cimentación.
- Se ha podido comprobar, así mismo, que la solución es más efectiva para cargas de cierta importancia y luces también grandes, donde los problemas de asiento pueden ser más relevantes.
- Cada caso particular deberá ser detenidamente analizado, ya que en la bondad de la solución

©2018 Universidad Simón Bolívar

influyen diversos factores, como son las condiciones de carga y geometría como aspectos fundamentales. Las condiciones particulares del terreno de apoyo, como no puede ser de otra forma, influyen también, pero más que en la bondad en sí de la solución, lo harían en la posible rentabilidad de la misma, de acuerdo con lo indicado por Abderhman [27]

- Se puede afirmar también, que esta solución presentaría ventajas en el caso de edificios de dos a cuatro plantas en terrenos blandos, siendo más difícil su empleo en el caso de edificaciones de mayor altura.
- Pese a las claras ventajas que presenta la propuesta, se debe también aclarar, que su empleo dificultaría en cierta forma la ejecución, debido a la necesidad de incorporar conectores para enlazar los bloques de EPS en función de las dimensiones de estos.

8. REFERENCIAS

[1]. Espel R, Gómez J, Grima R, Aguado A, "La evolución de la construcción del Templo de la Sagrada Familia". Informes de la Construcción, 2009, No. 61, p. 7-9, doi: 10.3989/ic.08.057.

[2]. Lin L K, Chen L H, Chen R H L. "Evaluation of Geofoam as a Geotechnical Construction Material", Journal of Material in Civil Engineering",2010, Vol. 22, No. 2, p. 160-170.

[3]. Negussey D, Huang X. "Modulus of Subgrade Reaction for EPS Geofoam". GeoShanghai International Conference, Shanghai, 2006, p. 165-172.

[4]. Negussey D. "Design Parameters for EPS Geofoam". Soils and Foundation, 2007, Vol. 47 No.1, p. 161-170.

[5]. Oteo C, Sopena L, Burbano G. " Rellenos aligerados con poliestireno expandido (EPS) en la variante del puerto de Santa María". Primer Congreso Andaluz de Carreteras, 1998, ISBN: 84-89875-03-0.

[6]. Miao L, Wang F, Han J, Lv W, Li J. "Properties and Applications of Cement-Treated Sand-Expanded Polystyrene Bead Lightweight Fill". Journal of Matererials in Civil Engineering, 2013, Vol. 25, p. 86-93, doi: http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000556.

[7]. Liu N, Chen B. "Experimental study of the influence of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete". Construction and Building Materials, 2014, No. 68, p. 227-232, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.062

[8]. Ferrándiz-Mas V, Bond T, García-Alcocel E, Cheeseman C. "Lightweight mortars containing expanded polystyrene and paper sludge ash", Construction and Building Materials, 2014, No. 61, p. 285-292, doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.03.028.

[9]. Davila J M, Fortes J C, Crespo L, Rodriguez C A, "Comparative analysis of slabs foundation: lightweight by expanded polystyrene blocks opposite solid slabs", Informes de la Construcción, 2015, Vol. 67, No. 538, doi: http://dx.doi.org/10.3989/ic.13.157

[10]. Lingwall B. "Development of an expanded polystyrene cover system for pipelines at fault crossings". Ph.D. Dissertation. Utah (USA): Department of Civ. and Environmental Eng. Univ. of Utah, 2011.

[11]. Bartlett S F, Lingwall B N, Trandafir A C, Lawton E C. "Protection of steel pipelines from permanent ground deformation using EPS geofoam. Seismic Resilience of Natural Gas Systems e Improving Performance". Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, ASCE, 2011, No. 34, p. 5-27, doi: ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784412398.

[12]. Horvath J H. "Cellular Geosynthetics in Highway Applications". 64th Highway Geology Symposium, 2013, North Conway, NH, U.S.A.

[13]. Ikizler S B, Aytekin M, Vekli M. "Reductions in swelling pressure of expansive soil stabilized using EPS geofoam and sand". Geosynthetics International, 2009, Vol. 16, No. 3, p. 216-221, doi: 10.1680/gein.2009.16.3.216

[14]. “Sistema Cimentur“. cimentaciones aligeradas: www.forel.es/sistema_constructivocimentur.php. Grupo Forel.

[15]. Rasmussen T V. "Integrated Strip Foundation Systems for Small Residential Buildings". The Open Construction and Building Technology Journal, 2010, No. 4, p. 39-53.

[16]. Das B. Fundamentals of Geotechnical Engineering" Thomson publishers, 2012.

[17]. Qiu B, Li Z. "Discussion on design method of raft foundation". Shanxi Architecture, 2007.

[18]. Torrijo F J. "Cimentaciones: alternativas de formulación al CTE". Oficial Association of Geologists, 2010. Delegacion de Cataluña. Barcelona, p. 11-15.

[19]. Negussey D. "Design parameters for EPS geofoam", Soils and Foundation Japanese Geotechnical Society, 2007, Vol. 47, No. 1, p.

161-170. doi: http://doi.org/10.3208/sandf.47.161

[20]. Bajracharya R M, Lokuge W P, Karunasena W K., Lau K T. "Structural Evaluation of Concrete Expanded Polystyrene Sandwich panels for slab applications". Taylor & Francis Group, 2013.

[21]. Wang Z, Liu Y, Sun J, Li C. "The new super element on the interactional analysis of frame structure and Winkler foundation beams". Sichuan Building Science, 2007.

[22]. Ranjan R, Sekar P, Krishnan P. "Raft foundation on flexffile base for compact transmission line". Power Engineering Journal, 201, Vol. 13, No. 2, p. 19-24.

[23]. He C, Cai J. "Grillage Beams on elastic foundation analized by a semi-analytical and semi-numerical method". Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, Vol. 28, No. 6, p. 761-766.

[24]. Haddadin M J. "Mats and combined footings - analysis by the finite element method". Journal Proceedings ACI, 1971, Vol. 68, No. 12, p. 945-949.

[25]. Chun B, Lim H, Shin Y. "Application of Constitutive Model to Predict the Behavior of EPS-Geofoam". Geetechnical Engineering, 2001, Vol. 5, No. 2, p. 175-183.

[26]. Abdelrahman G E, El Ragi A F. "Behavior Improvement of Footings on Soft Clay Utilizing Geofoam". The 10th Arab Structural Engineering Conference, Nov. 2006, Kuwait.

[27]. Abdelrahman G E, El Kamash W H. "Behavior Improvement of Raft Foundation on Port-Said Soft Clay Utilizing Geofoam". Geo-Shanghai, 2014, doi: http://dx.doi.org/10.1061/9780784413401.055.