

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE RESTOS DE PIRÁMIDES Y TEMPLOS AMERICANOS Y LOS EDIFICIOS HISTÓRICOS CONSTRUIDOS SOBRE ELLOS

Jaramillo Morilla, A.¹, Cruz León, J.², Ruiz Jaramillo, J.³, Mascort Albea, E.³, Girón Galindo, M.⁴,
Aguilera Garibay, L.⁵, Garrido González, R.⁵

¹ Catedrático de Ingeniería del Terreno, Dpto. de Mecánica de Medios Continuos, Universidad de Sevilla, Sevilla (España). jarami@us.es

² Profesor de la Universidad Michoacana de San Nicolás. Morelia (México)

³ Arquitectos

⁴ Alumna del 3º Máster de Peritación y Reparación de Edificios. Universidad de Sevilla

⁵ Peritos del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). Michoacán (México)

Área Temática: Mecánica de los medios continuos

RESUMEN

Una característica bastante habitual de monumentos y edificios históricos suele ser el estar contruidos sobre otros edificios que bien fueron demolidos para levantar los actuales o bien fueron olvidados. Las nuevas construcciones suelen estar edificadas en parte sobre rellenos artificiales relativamente blandos y sobre zonas rígidas, restos de los muros anteriores. Esta disposición llega a provocar una serie de patologías características. Un caso singular de este tipo de levantamientos es la construcción de iglesias y palacios en Hispanoamérica sobre los restos de las antiguas pirámides. Además de los casos en México D.F., existen bastantes poblaciones en Guatemala y en el resto de México con pirámides parcialmente destruidas que están siendo o fueron utilizadas como base para cimentaciones de “nuevos” edificios históricos. Existen también otros casos en los que, al no disponer de cubrición en su parte superior, permiten el paso del agua de lluvia. En este artículo se muestra como el comportamiento de estas pirámides y construcciones antiguas incluidas en el terreno es más parecido al de estructuras de contención (muros) que al de plataformas horizontales debido a que el agua de lluvia aumenta los empujes sobre las capas exteriores y estos edificios, como sucede con pirámides de Guatemala y México, sufren una degradación importante. Además, se demuestra el efecto de rigidización lateral del terreno y reducción de asientos en las construcciones cimentadas sobre suelos que contienen estos restos, los cuales suponen una mejora importante de la capacidad portante.

PALABRAS CLAVE: Cimentación, Asiento, coeficiente de Poisson, rigidez lateral.

INTRODUCCIÓN

La construcción sobre restos antiguos suele ser una característica común que encontramos en todos los pueblos. Multitud de ejemplos muestran que la superposición de culturas a lo largo de los siglos ha sido una realidad que se ha manifestado no sólo a través de la transmisión de costumbres sino también mediante el uso de las antiguas construcciones. De tal manera que estas eran, bien directamente utilizadas para, mediante alguna adaptación, un uso alternativo al original, o bien los restos del edificio (especialmente sus cimientos) eran utilizados para levantar con un determinado nivel de seguridad la nueva construcción. Asimismo, desde el punto de vista cultural, podemos decir que tenía un claro simbolismo el hecho de que un pueblo levantara sus edificios emblemáticos en aquellos lugares en los que anteriormente se habían ubicado los de otra civilización. De esta forma, podemos afirmar que se construía sobre los antiguos templos o palacios por motivos tanto culturales como técnicos.

Como ejemplos de lo anterior, encontramos a lo largo de la Historia multitud de casos en los que se ha procedido de esta manera. Esto ha sucedido con los edificios de antiguas civilizaciones como la egipcia, mesopotámica, tartésica, griega o romana.

En la región de Pátzcuaro (México) encontramos el primer seminario jesuita de América el cual fue construido sobre los restos de una antigua pirámide precolombina, de tal manera que el nuevo edificio se diseñó adaptando la nueva construcción a la existente y dejando fuera de los límites de esta los espacios libres, esto es, tanto la calle como los terrenos adyacentes.



Figura 1. Templo Mayor y Catedral (México D.F.) y ruínas de pirámide en Guatemala. Fuente: autores

La construcción de edificios, desde el punto de vista mecánico, sobre un suelo donde ya había existido una construcción, presenta una mejora del terreno por efecto del tiempo y la carga a la que ha estado sometido. Un uso de las cimentaciones antiguas que, además de mejorar el terreno previamente debido a la introducción de una precarga, consolidando el terreno existente, hace que ya de por sí se reduzcan los asentamientos produciendo un efecto de “refuerzo” del terreno en sentido lateral.

Esto es así debido a que los edificios, al no disponer de cubrición/protección en su parte superior, permiten el paso del agua de lluvia. Dado que estas construcciones se realizaban sin la utilización de morteros o bien con unos muy elásticos tanto en los muros de fachada como en la estructura interior. Esto produce que el comportamiento de estas pirámides y construcciones antiguas, una vez que se encuentran incluidas en el terreno es más parecido al de estructuras de contención (muros) que al de plataformas horizontales debido a que el agua de lluvia aumenta los empujes sobre las capas exteriores sufriendo los edificios, como es el caso de algunas pirámides de Guatemala y México, una degradación importante.



Figura 2. Restos de construcciones romanas encontrados bajo el antiguo mercado de la Encarnación (Sevilla) y ruínas romanas de Itálica en Santiponce (Sevilla)

Junto con el tipo de edificio, es fundamental la consideración del tipo de terreno, especialmente el caso de comportamiento de las construcciones sobre arcillas. Este tipo de terrenos presenta una memoria de cargas que

llamamos presión de preconsolidación. Un terreno sobre el que previamente se ha aplicado una carga aumenta su módulo de elasticidad (E). De hecho, en este tipo de terrenos, la relación entre el índice de hinchamiento con respecto al índice de compresión es de 4 a 7. Esto indica que un terreno que ya ha sido cargado asienta de la cuarta a la séptima parte de un terreno que es sometido a una carga noval. En terrenos arenosos la relación es aún mayor del orden de 10. A efectos prácticos de edificación, esto significa que construir un edificio sobre un terreno en el que ya se ha edificado anteriormente supone un importante incremento del coeficiente de seguridad mediante la reducción del asiento esperable.

Además, debemos añadir que el suelo no tiene un comportamiento elástico de manera que, si descargamos un terreno, este solamente puede recuperarse entre 1/4 y 1/10 de lo que asentó. Si es cargado de nuevo, sólo asentará esa misma proporción, hasta que se supere la presión de preconsolidación, en cuyo caso el terreno volverá a asentarse en este caso, una cantidad bastante mayor.

Uno de los parámetros que hemos comprobado que es de especial importancia en las construcciones sobre rellenos el denominado coeficiente de Poisson del estrato rígido superior. Este coeficiente indica la capacidad de deformación lateral de un material o terreno mediante la relación entre la deformación relativa transversal y la deformación relativa en la dirección de aplicación de la fuerza. Este valor oscila entre 0 para terrenos de gran rigidez lateral y 0,5 para terrenos capaces de admitir lateralmente grandes deformaciones.

Como referencia y a título de ejemplo, vamos a utilizar los valores proporcionados por el documento DB-SE-C del Código Técnico español en su tabla D.24:

Tabla 1. Valores orientativos del coeficiente de Poisson para determinados tipos de suelos. Fuente: Código Técnico de la Edificación

Tipo de suelo	Coficiente de Poisson
Arcillas blandas normalmente consolidadas	0,40
Arcillas medias	0,30
Arcillas duras preconsolidadas	0,15
Arenas y suelos granulares	0,30

Si estudiamos el asiento con estas condiciones, obtenemos que el mismo es proporcional a los lados de las zapatas e inversamente proporcional al módulo de Poisson (figura 3). Si considerásemos cualquier otro módulo de elasticidad o carga neta, los asentamientos son proporcionales.



Figura 3. Relación entre el asiento y la dimensión lateral de una zapata cuadrada para diferentes coeficientes de Poisson. Fuente: autores

La figura anterior muestra como para una misma dimensión de zapata, carga y módulo de Young, tenemos que un módulo de Poisson alto (tendente a 0,5) produce menor asiento que un módulo de Poisson que tiende a 0. En este caso, al realizar el cálculo según la teoría de Boussinesq, tenemos que a mayor coeficiente de Poisson obtenemos un menor asiento. Este resultado sin embargo no representa la realidad, debido a que este método no considera la rigidez diferente en los estratos superiores que en este caso particular, debe considerarse especialmente debido a las diferentes características resistentes entre los estratos superiores e inferiores.

La necesidad de ajustar un modelo de cálculo en este tipo de terrenos queda demostrado mediante la realización de ensayos dinámicos sobre el terreno que nos permiten verificar que el efecto de la inclusión de un edificio en el terreno es la rigidización lateral del mismo, de tal manera que actúa disminuyendo su coeficiente de Poisson y, en suma, reduciendo el asiento esperable.

Las pirámides aztecas se fueron construyendo en diferentes fases, de manera que, a medida que necesitaban incrementar su dimensión, construían una nueva pirámide sobre la anterior con lo que una construcción quedaba sobre superpuesta sobre la preexistente. Otro caso es el las construcciones realizadas con el sistema de muros de carga. Estos muros, con el paso del tiempo y el abandono, tienden a desmoronarse aunque siempre permanece en pie una parte del mismo que, al quedar incluida en el terreno que se deposita cubriendo las ruinas, produce un arriostamiento y rigidización del mismo impidiendo su desplazamiento lateral a modo de elementos de contención.



Figura 4. Construcción por “fases” de una pirámide azteca (México) y restos de muros tartésicos (S. VIII-III a.c.) en el Carambolo (Sevilla). Fuente: autores

Este fenómeno se explica porque, cuando aplicamos una carga sobre cualquier tipo de terreno, este tiende a “acomodarse” para recibir la carga que se le transmite, lo que se traduce en un asiento o desplazamiento vertical, dependiendo de la propia naturaleza del terreno el que este asiento esperado sea de mayor o menor magnitud. Este desplazamiento vertical se produce debido a un desplazamiento lateral de las partículas que componen el suelo por lo que, si este desplazamiento lateral es pequeño, también lo será el asiento.

METODOLOGÍA Y COMPROBACIONES REALIZADAS

Hemos realizado la estimación de los posibles asientos esperables que se producirían según diferentes casos. Para ello, si denominamos estrato rígido aquel que con el paso del tiempo se ha depositado sobre el monumento y sobre el que se edificado la nueva construcción, se ha considerado para el mismo un módulo de elasticidad de 100.000 kN/m^2 (equivalente a un suelo de resistencia media a compacta por efecto de la rigidización que hemos comentado anteriormente) mientras que para el estrato inferior se ha considerado $E=10.000 \text{ kN/m}^2$ (equivalente a un suelo blando). Esto contribuye a modelizar las condiciones del terreno que se encuentran en la mayoría de estos emplazamientos que, en el caso de América, están compuestos por terrenos mezcla de arenas y arcillas de relativamente poco espesor sobre rocas, en general, de origen volcánico. Este

modelo realizado permite considerar por tanto el efecto de rigidización que sobre el terreno ejerce la existencia de una construcción anterior.

Estos valores además, han sido verificados mediante la realización de ensayos no destructivos realizados de cara a obtener la rigidez del estrato superior sobre el que se apoya el edificio. Estos ensayos permiten, mediante medidas dinámicas del terreno, obtener los valores de rigidez horizontal en el mismo en dos direcciones perpendiculares. Como referencia a estos datos que apuntamos, podríamos incluir la tabla D.23 del Código Técnico de la Edificación con valores aproximados para el módulo de elasticidad (E) en función de los tipos de terreno.

Tabla 2. Valores orientativos del coeficiente de elasticidad (E) para determinados tipos de suelos. Fuente: Código Técnico de la Edificación

Tipo de suelo	Coficiente de Elasticidad (kN/m ²)
Suelos muy flojos o muy blandos	< 800
Suelos flojos o blandos	800 – 4.000
Suelos medios	4.000 – 10.000
Suelos compactos o duros	10.000 – 50.000
Rocas blandas	50.000 – 800.000
Rocas duras	> 800.000

Respecto a los cimientos del edificio de nueva construcción, se han realizado los cálculos considerando que la cimentación de los mismos es superficial, realizada mediante zapatas, para las que se han considerado dimensiones que oscilan entre un mínimo de 0,5m hasta los 4,0m de máxima. Asimismo, se ha partido de la hipótesis de que la forma de estas zapatas es cuadrada, dado que un gran número de cimentaciones tanto antiguas como modernas presentan esta configuración morfológica. Esta tipología constructiva comienza a realizarse de manera habitual en la Edad Media con el esplendor del gótico en el que, debido al tipo de sistema constructivo, se producen acumulaciones puntuales de carga sobre el terreno.

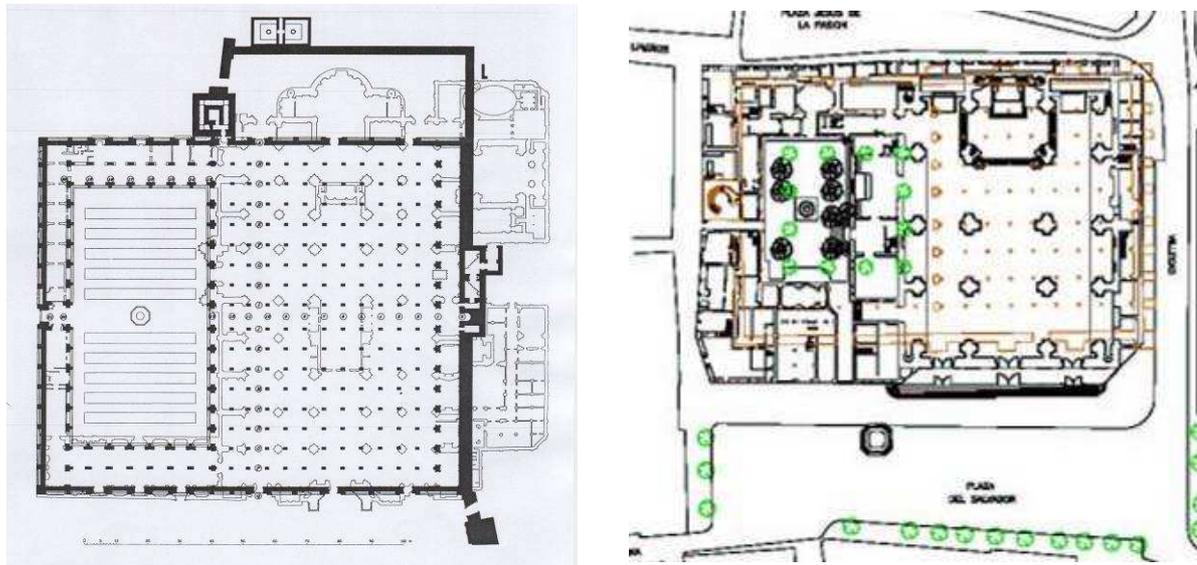


Figura 5. Superposición de plantas actuales sobre edificios antiguos. Catedral e Iglesia del Salvador de Sevilla ubicadas sobre sendas mezquitas islámicas. Fuente: Alfonso Jiménez; Fernando Mendoza

Sobre esta zapata genérica sobre la que se apoya el “nuevo” edificio, se ha considerado aplicada una carga genérica de 100kN que, además de ser una carga aproximada a la que se puede encontrar en esta tipología de edificios, nos permite establecer con facilidad mediante la aplicación de coeficientes de proporcionalidad, análogas con respecto a otros valores de carga diferente. Como referencia, las columnas centrales de la iglesia

del Salvador de Sevilla transmiten al terreno en torno a los 150-200 kN/m², las columnas de la Catedral de Sevilla en torno a los 250 kN/m² y la torre de la Giralda unos 400 kN/m². Como hemos comentado, el hecho de utilizar 100 MPa nos permite aplicar con sencillez un coeficiente de proporcionalidad para obtener el asiento bajo cargas diferentes.

Utilizando todos estos parámetros, hemos calculado la relación existente entre el asiento (%) que sufriría la cimentación del edificio construido sobre el estrato superior en el que se supone incluida la anterior construcción mediante la teoría de Steinbrenner, que permite la consideración de la primera capa como rígida con diferentes coeficientes de Poisson y elasticidad, con respecto al asiento de Boussinesq, en función de las diferentes dimensiones de cimentación y considerando a su vez diferentes coeficientes de Poisson y espesores para dicho estrato superior.

Para ello, realizamos la comparación con el cálculo de asientos que se realiza con la teoría de Boussinesq en la que, partiendo de las hipótesis de que el suelo es un material elástico, homogéneo e isotrópico y considerando que la masa de suelo es un semiespacio infinito, es decir, de extensión y profundidad ilimitadas, se obtiene que el incremento de tensión vertical depende de la carga aplicada y la distancia tanto vertical como horizontal respecto al punto de estudio pero es independiente tanto del módulo de elasticidad como del coeficiente de Poisson.

ANÁLISIS Y RESULTADOS

Si consideramos un coeficiente de Poisson nulo en el estrato superior, en función del espesor de este estrato y del coeficiente de Poisson del estrato inferior obtenemos la siguiente relación de asientos en función del tamaño de las zapatas.

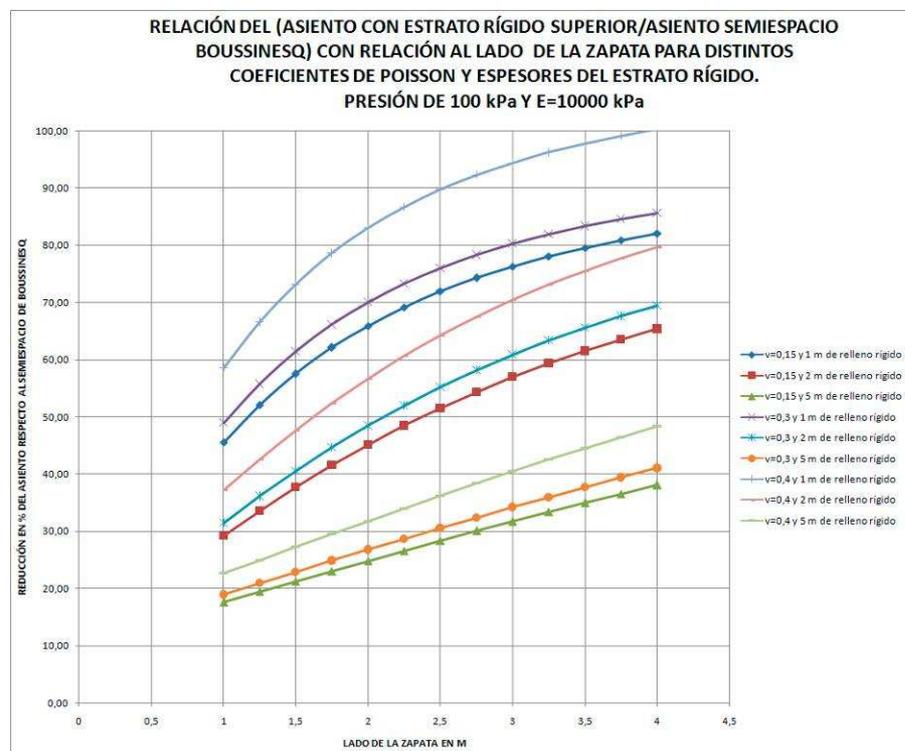


Figura 6. Gráficos de asientos obtenidos para un coeficiente de Poisson del estrato rígido de 0,30 y 0,45 respectivamente. Fuente: autores

En todos los casos se produce un incremento del asiento al aumentarse las dimensiones de la zapata siendo este más acusado cuanto mayor es el coeficiente de Poisson y menor el espesor del estrato resistente.

De esta forma, el caso más desfavorable, es decir, aquel en el que obtenemos mayores asientos es aquel con un coeficiente de Poisson elevado, por tanto, cercano a 0,5 y poco espesor de estrato de manera que para una dimensión de zapata de 4 metros (lo cual puede ser habitual en edificios de grandes dimensiones tales como templos). A la inversa, encontramos que el caso más favorable es aquel en el que el terreno inferior tiene un menor coeficiente de Poisson a mayor espesor del estrato.

Un espesor del estrato rígido superior a 3 metros hace que la relación entre el asiento y la dimensión sea lineal, lo que se traduce en un menor asiento total que respecto a los estratos de menor espesor. Esto sucede fácilmente en los grandes edificios antiguos enterrados como pirámides o antiguos templos pero es fácil que no ocurra en el caso de construcciones civiles como sucede con las ruinas de casas romanas en los centros históricos de muchas ciudades.

Como cabría esperar, se demuestra que a igualdad de espesor del estrato inferior (el que hemos denominado estrato resistente) a mayor módulo de Poisson tenemos un mayor asiento por lo que nos encontramos en una situación más desfavorable. Asimismo, para un mismo coeficiente de Poisson encontramos una situación más desfavorable con espesores pequeños del relleno rígido.

Estos resultados son análogos a aquellos obtenidos al modificar los valores del coeficiente de Poisson del estrato rígido con valores que oscilan entre 0 y 0,5, valores mínimo y máximo respectivamente que puede alcanzar el citado coeficiente, presentando una clara proporcionalidad en los resultados.

Considerando todos los resultados globalmente, una coincidencia entre los coeficientes de Poisson de los estratos superior e inferior no hace que se aprecie una modificación en los valores del asiento obtenido.

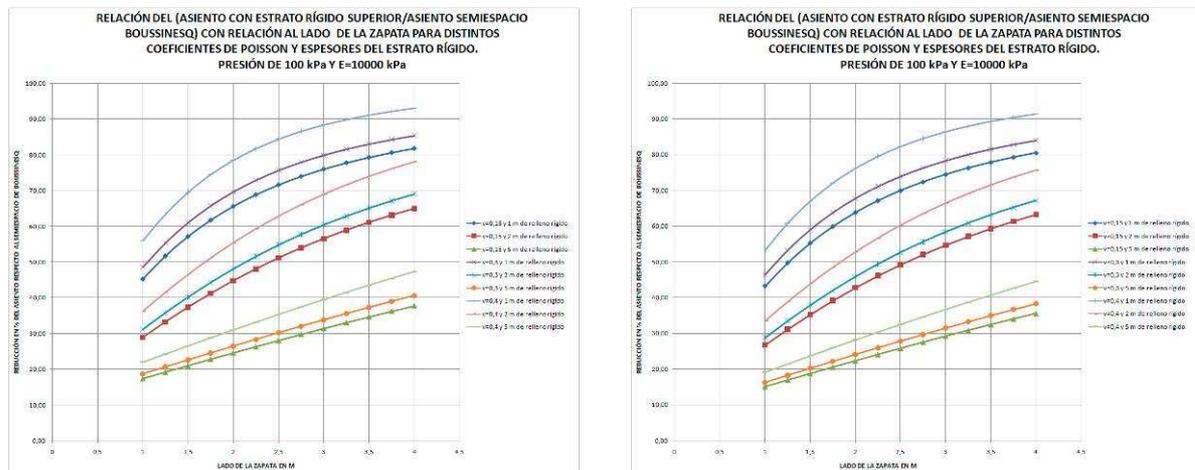


Figura 7. Gráficos de asientos obtenidos para un coeficiente de Poisson del estrato rígido de 0,30 y 0,45 respectivamente. Fuente: autores

Por tanto, los resultados obtenidos muestran el efecto positivo de la construcción y de sus muros en el terreno impidiendo que este se expanda lateralmente, lo que físicamente se traduce en la reducción de su coeficiente de Poisson.

CONCLUSIONES

A lo largo de la Historia y en todas partes del mundo, es habitual encontrar como unas culturas se han ido superponiendo sobre otras superando la mera acción social y cultural y superponiendo, literalmente, las nuevas construcciones sobre las antiguas.

Las cimentaciones de los nuevos edificios suelen tener una mayor dimensión que las cimentaciones antiguas, lo que hace que, por ejemplo, una zapata llegue a apoyarse sobre varias de las antiguas zapatas

anteriores, lo que asegura una correcta transmisión de cargas. Lo mismo sucede si consideramos no sólo apoyos puntuales (zapatas) sino apoyos lineales (muros) también bastante habituales en los edificios de la antigüedad.

Con respecto al tipo de terreno sobre el que se apoya el nuevo edificio, si este incluye restos de un edificio anterior, tanto por efectos de la preconsolidación del terreno bajo el mismo así como del efecto de rigidización lateral se consigue una reducción de los asentamientos esperables del orden de 4 a 7 veces en un terreno arcilloso y del orden de 10 en un terreno arenoso.

La elección de la situación del edificio sobre el emplazamiento elegido tiene una gran importancia ya que se pueden producir importantes asentamientos diferenciales en el nuevo edificio si no se respetan los extremos y se cimenta únicamente sobre una parte del mismo. Traducido lo anterior a datos empíricos, si consideramos la diferencia que podemos encontrar entre los coeficientes de Poisson de las diferentes capas de terreno, podemos decir que a menor coeficiente de Poisson obtenemos un menor asentamiento para la misma carga vertical, módulo de elasticidad y dimensiones de cimentación. Esto nos lleva a afirmar que, en caso de que los edificios reseñados no se hubiesen cimentado sobre los antiguos, el asentamiento, que actualmente se puede estimar en un 40% habría llegado a ser del orden del 250% tal y como ha sucedido por ejemplo en la actual catedral metropolitana de México D.F. cimentada sobre una de las pirámides que componían el denominado recinto del “Templo Mayor” en la que, a pesar de la magnitud de movimientos actuales, estos habrían podido ser mucho mayores.

Por todo lo anterior, podemos afirmar que la construcción sobre terrenos que incluyen restos de antiguas edificaciones, lejos de suponer un riesgo, supone una mejora de las condiciones del terreno de cimentación de tal manera que se consiguen reducir el asentamiento total esperado.

REFERENCIAS

1. H. Stierlin. Ancient Mexico. Ed. Stierlin. Lausanne, 1967.
2. J.L. de Cenival. Egyp. Ed. Stierlin. Lausanne, 1963.
3. J. Kerisel. Down to earth. Foundations past and present. The invisible art of the builders. Ed. Balkema. Rotterdam, 1987.
4. J.L. Justo et al. Geotecnia y cimientos II. Ed. Rueda. Madrid, 1976.
5. Código Técnico de la Edificación. Ministerio de Vivienda. Madrid, 2006.