

Simulación del efecto de cargas térmicas en silos mediante modelos elásticos y elastoplásticos. Análisis de la influencia de distintos parámetros

JULIA MORÁN DEL POZO (*); FRANCISCO AYUGA TÉLLEZ (**);
PEDRO AGUADO RODRÍGUEZ (**); ANDRÉS DE JUAN VALDÉS (***)

RESUMEN En este artículo se desarrolla el análisis de la distribución de empujes horizontales originados por el material granular almacenado en silos agrícolas sometidos a cargas térmicas. Para ello se utiliza el programa comercial ANSYS basado en el método de los elementos finitos.

Las variaciones térmicas a las que se ve sometida la pared del silo provocan la aparición de ciclos de contracción y dilatación, los cuales causan variaciones tanto en los empujes del grano como en las tensiones de la chapa que constituye la pared. Estas contracciones y dilataciones sucesivas, provocan un incremento del módulo de elasticidad del grano, lo cual origina a su vez que las tensiones en la pared aumenten con cada nuevo ciclo.

SIMULATION OF THERMAL LOADS EFFECT IN SILOS USING ELASTIC AND ELASTOPLASTIC MODELS. ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF DIFFERENT PARAMETERS.

ABSTRACT *In this paper is developed an analysis of pressure distributions in grain silos subjected to thermal effects. To this end, the commercial ANSYS program, based on the finite-element method is employed.*

Changes in the temperature along the silo walls produce dilatations and contractions, which cause variations both in the wall stresses and in the grain pressures. These dilatations and contractions increase the Young's modulus of the grain, causing the stresses on the silo walls during the contractions to rise with each new cycle.

Palabras clave: Silos; Temperatura; Cargas térmicas; Método de los elementos finitos.

INTRODUCCIÓN

Existen numerosos ejemplos documentados en los que silos agrícolas se han visto gravemente dañados por el efecto de bruscos y súbitos descensos térmicos. Esto es debido a que la disminución de las temperaturas en el exterior de estas estructuras produce una compresión del material almacenado, cuando la temperatura externa aumenta las paredes del silo se dilatan y el material se asienta, de forma que reduce sus huecos adquiriendo un mayor grado de compacidad, lo que se pone de manifiesto en un aumento de su módulo de Young. En el siguiente ciclo, debido al menor número de huecos del material, las presiones de compresión que ejercen las paredes del silo sobre el grano, y por lo tanto las presiones de reacción que ejerce el grano sobre las paredes, son mayores que en el primer ciclo, y así sucesivamente.

Esta sucesión de contracciones y dilataciones da lugar a las sobrepresiones de origen térmico que pueden provocar el fallo de estas estructuras.

Las variaciones térmicas en silos agrícolas pueden deberse a cambios diarios en la temperatura ambiental o al efecto de materiales calientes almacenados en su interior.

El efecto de las cargas térmicas es un tema hasta ahora no abordado y del que existe poca información, lo que se refleja en la no consideración del cálculo de las mismas en la normativa europea. El Eurocódigo 1 parte 4, que trata de la determinación de las acciones sobre este tipo de estructuras, menciona la existencia de cargas de origen térmico, pero carece totalmente de orientaciones para la determinación de las mismas, sin tener en cuenta que pueden ser el origen de accidentes graves e incluso mortales. El objeto de este trabajo será obtener un método que permita conocer el comportamiento del silo ante las variaciones de temperatura, determinando las tensiones que las cargas térmicas originan en él y suplir de este modo la

(*) Universidad de León; Dpto. Ingeniería Agraria; Doctor Ingeniero Agrónomo.

(**) Universidad Politécnica de Madrid; Dpto. Construcción y Vías Rurales; Doctor Ingeniero Agrónomo; Catedrático de Universidad.

(***) Universidad de León; Dpto. Ingeniería Agraria; Doctor Ingeniero Agrónomo.

(****) Universidad de León; Dpto. Ingeniería Agraria; Doctor Ingeniero Agrónomo.

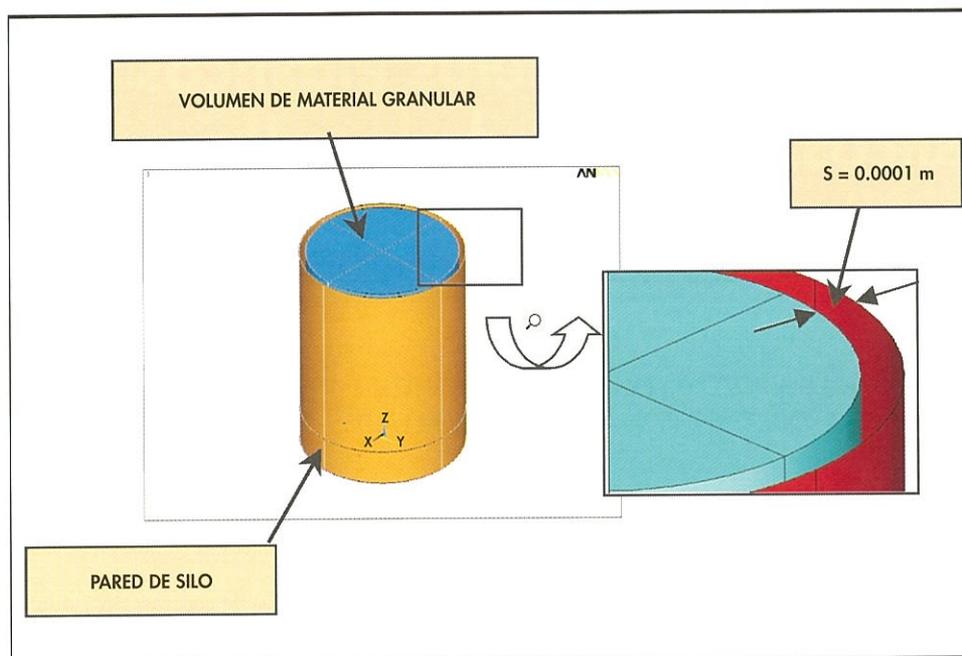


FIGURA 1. Material granular y chapa de acero en un modelo 3D.

carencia que a este respecto existe hasta el momento. La determinación de estas acciones se llevará a cabo utilizando el método de los elementos finitos cuya eficacia en este tipo de estudios ha sido ya demostrada por los autores en trabajos previos [2][9] al igual que por otros autores [5][8].

DESARROLLO DEL ESTUDIO

Para el análisis de las cargas térmicas en silos agrícolas se representa un modelo tridimensional que, a diferencia de los trabajos realizados sobre el tema hasta el momento [2][5][8], no sólo simula el efecto de la pared del silo sobre el grano, sino también el comportamiento de la propia pared (figura 1). De esta forma, se puede estudiar como influyen las variaciones térmicas, estudiando las sucesivas contracciones y dilataciones que sufre la pared, y como afectan a los empujes del grano y al estado tensional de la misma.

El modelo general realizado a través del método de los elementos finitos, es un silo de chapa lisa de acero, con forma cilíndrica, fondo plano, altura 9 m y diámetro 6 m, con un espesor de la pared de 2 mm. Para ello se desarrolló un fichero elaborado en modo texto utilizando comandos de ANSYS 5.6.2/University High Option, que permite variar, sin necesidad de un profundo conocimiento del programa, los distintos parámetros que definen el silo y el material almacenado, a fin de adaptarse en cada caso a la estructura objeto de estudio.

Las primeras investigaciones fueron encaminadas a determinar los elementos más adecuados para simular este modelo (chapa, material granular, rozamiento grano-pared), una vez concluida esta fase, se modelizó un silo conocido en un estado de carga estático de manera que se pudieran validar los resultados con los obtenidos por otros métodos de cálculo y por la normativa existente, una vez validado este modelo y comprobado el buen funcionamiento del mismo, se pasó a la elaboración de modelos definitivos sometidos a cargas térmicas.

La forma de modelizar la estructura consiste en representar los tres elementos que constituyen el silo, intentando reproducir de la forma más precisa posible lo que ocurre en la realidad. Por un lado, a través de un elemento flexible *shell* (SHELL63), se representa la pared del silo asignándole las distintas características necesarias que definen las propiedades inherentes de la chapa de acero de manera que se contemple la dilatación y contracción de la misma por efecto de la temperatura. El material almacenado se simula con un elemento *solid* (SOLID45) dotado de las características propias del material granular. Por último, se simula el rozamiento que se produce entre el material granular y la pared de la estructura, introduciendo un par de contacto (CONTA173 y TARGET170) que permite la transmisión de esfuerzos de la pared al grano y del grano a la pared, de manera que las contracciones y dilataciones que sufre la chapa lleguen al material granular.

En el tipo de estructuras que estamos manejando es muy importante el rozamiento que se produce entre las paredes del silo y el material granular, ya que el modelo de rozamiento elegido determinará las fuerzas de rozamiento y la transmisión de empujes entre el grano y la pared. El rozamiento se genera mediante la elección de elementos de contacto que soporten los requisitos exigidos en el problema planteado, los cuales se muestran a continuación.

En el modelo de silo sometido a cargas térmicas la generación del contacto es doblemente importante, pues se busca un efecto que podríamos llamar “en cadena” consistente en acumular a las cargas estáticas de un silo, las que existirían al provocar en él la contracción de la pared a través de la aplicación de una disminución térmica. Al contraerse la chapa del silo se produce un aumento de las presiones del grano y este aumento de las presiones del grano provoca a su vez un incremento en la tensión sobre la pared.

Este efecto en cadena requiere una generación adecuada del contacto ya que no todos los tipos existentes son

capaces de simularlo, el tipo de contacto más adecuado en la simulación de estructuras en tres dimensiones es el *superficie a superficie*. Uno de los motivos que justifican la elección del contacto *superficie a superficie*, es que con esta clase de contacto se reducen en cierta medida las necesidades computacionales, ya que se obtiene la solución en menos tiempo y consume menor memoria del ordenador.

Para construir este tipo de contacto necesitamos dos clases de superficies, una superficie *target* y una superficie *contact* (anteriormente definidas), ambas formarán lo que se denomina el par de contacto.

Otro tema que necesitamos discutir a la hora de realizar un contacto adecuado es el tipo de modelo que vamos a generar. El contacto superficie a superficie soporta dos modelos distintos: rígido-flexible y flexible-flexible, en el modelo rígido-flexible una de las superficies que entra en contacto se puede deformar mientras que la otra permanece indeformable, este tipo de modelo ha sido el seleccionado hasta el momento en trabajos previos [2][5][8], ya que simula correctamente los distintos estados tensionales estudiados hasta ahora. Sin embargo, el presente estudio requiere que las dos superficies en contacto sean capaces de deformarse, la que representa la chapa de acero debido a

su flexibilidad y para tener en cuenta la acción de la temperatura y la que representa la superficie que limita la masa de grano por las variaciones de volumen que sufre en función de su estado tensional; esto condujo a configurar el modelo como flexible-flexible.

Se manejaron dos modelos de comportamiento para el material granular: Elástico y de Drucker-Prager. El último es un patrón de comportamiento elástico-perfectamente plástico que puede considerar los efectos de la dilatación. Para la pared se elige un comportamiento elástico.

Estos dos patrones se someten a tres estados tensionales distintos, el primero sería el correspondiente a un estado de carga estático, el segundo y el tercero serían los correspondientes a un estado de carga térmica consistentes en la disminución de la temperatura en 20° y 40° K respectivamente.

Las características de las que se dota tanto a la chapa como al material granular en cada uno de los estados de carga se muestra a continuación en las tablas 1, 2, 3 y 4.

En el modelo con patrón de comportamiento Drucker-Prager para el material granular es necesario, además, introducir otros dos parámetros: el ángulo de dilatación con un valor de 2.5 y la cohesión, con un valor de 0.71 kPa.

Características del material que constituye la chapa para el 1 ^{er} estado de carga	
Módulo de elasticidad de Young	$2.1 \cdot 10^8$ kN/m ²
Coefficiente de Poisson	0.3

TABLA 1. Características de la chapa de acero para el modelo sometido al primer estado tensional. Comportamiento elástico.

Características del material que constituye el grano para el 1 ^{er} estado de carga	
Módulo de elasticidad de Young	5000 kN/m ²
Coefficiente de Poisson	0.3
Coefficiente de rozamiento grano-pared	0.25
Peso específico del material	9 kN/m ³

TABLA 2. Características del material granular para el modelo sometido al primer estado tensional. Comportamiento elástico.

Características del material que constituye la chapa para el 2 ^o y 3 ^{er} estado de carga	
Módulo de elasticidad de Young	$2.1 \cdot 10^8$ kN/m ²
Coefficiente de Poisson	0.3
Temperatura de partida	288°K
Coefficiente de expansión térmica	$1.2 \cdot 10^{-5}$ [m/(m · °K)]

TABLA 3. Características de la chapa de acero para el modelo sometido al segundo y tercer estado tensional. Comportamiento elástico.

Características del material que constituye el grano para el 2 ^o y 3 ^{er} estado de carga	
Módulo de elasticidad de Young	20000 kN/m ²
Coefficiente de Poisson	0.3
Coefficiente de rozamiento grano-pared	0.25
Peso específico del material	9 kN/m ³

TABLA 4. Características del material granular para el modelo sometido al segundo y tercer estado tensional. Comportamiento elástico.

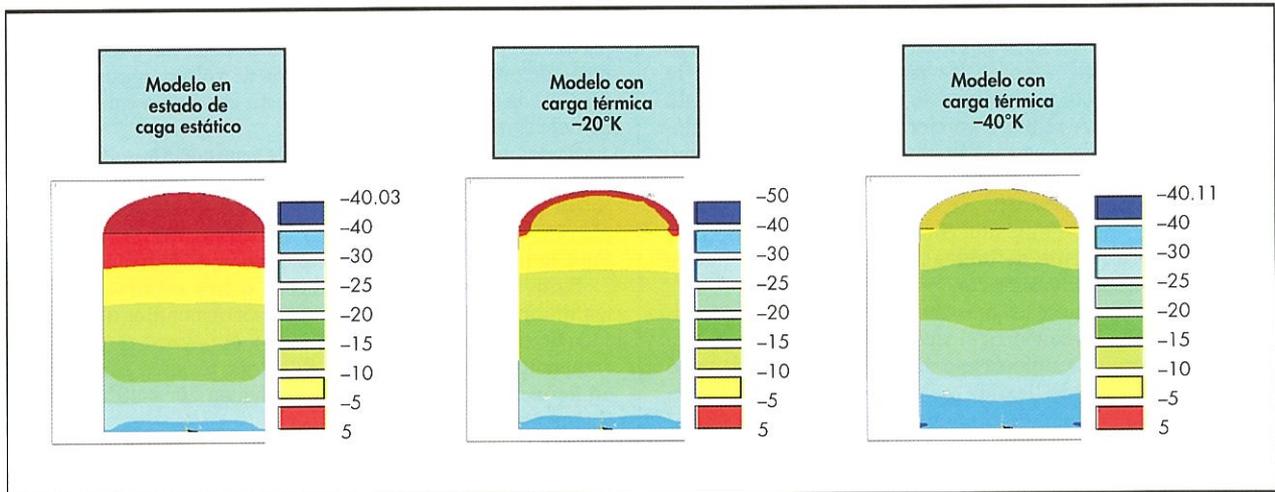


FIGURA 2. Distribución de presiones horizontales (kPa) en el interior del material granular obtenida con el M.E.F para distintos estados de carga térmica.

RESULTADOS

A través de las salidas de cálculo conocemos la importancia y magnitud de los empujes y podemos extraer los resultados de la distribución de las presiones horizontales en el interior de material granular y los resultados de las presiones horizontales linealizadas a lo largo de la pared determinando el comportamiento de este tipo de estructuras sometidas al efecto de cargas térmicas.

En el análisis de los resultados obtenidos a través del empleo del Método de los Elementos Finitos para el patrón de comportamiento elástico del grano podemos observar como las presiones horizontales en el interior del material granular van aumentando a medida que disminuye la temperatura, desde valores próximos a presiones mínimas en la zona superior de la estructura (rojo) para el modelo en

estado estático hasta valores medios (verde) para el modelo sometido a un descenso de 40 K y en la zona inferior de la estructura vemos como la franja de presiones próximas a valores máximos (azul medio) aumenta de anchura a medida que crece la carga térmica (figura 2)

En la figura 3 se muestran las presiones horizontales linealizadas a lo largo de la pared utilizando un patrón de comportamiento elástico para el material granular.

La figura 4 muestra los cambios en las zonas plásticas cuando aumenta la carga térmica para comportamiento del grano Drucker-Prager.

Por otro lado en el modelo de comportamiento elasto-plástico sólo se observan diferencias en cuanto a las presiones horizontales originadas por las cargas térmicas en las zonas de comportamiento elástico (figura 5)

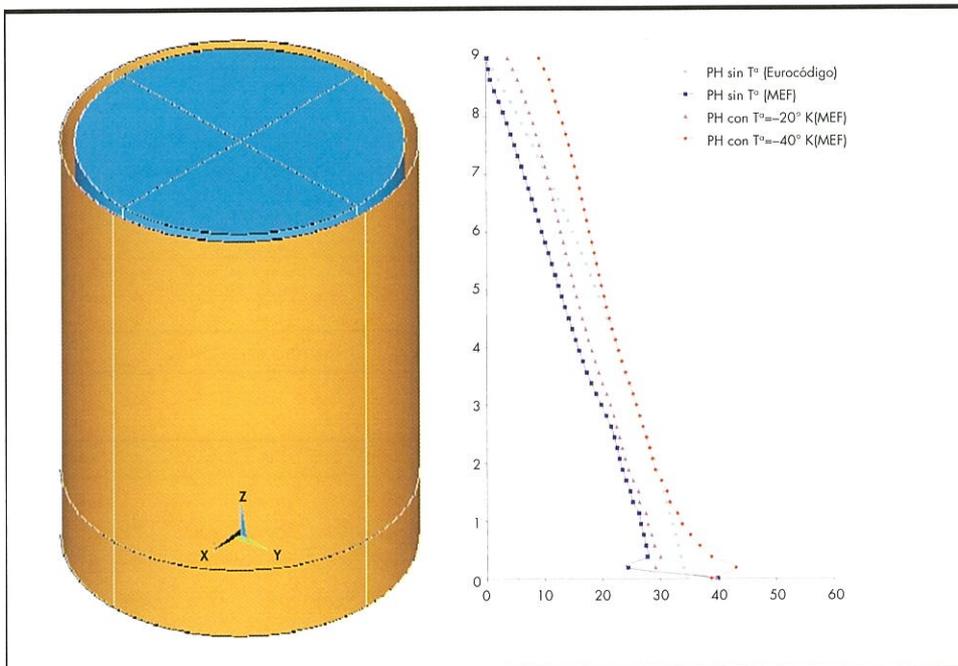


FIGURA 3. Distribución de presiones horizontales a lo largo de la pared del silo. Comparativa de los resultados obtenidos para distintas temperaturas (contracción de la chapa). Modelo de comportamiento elástico.

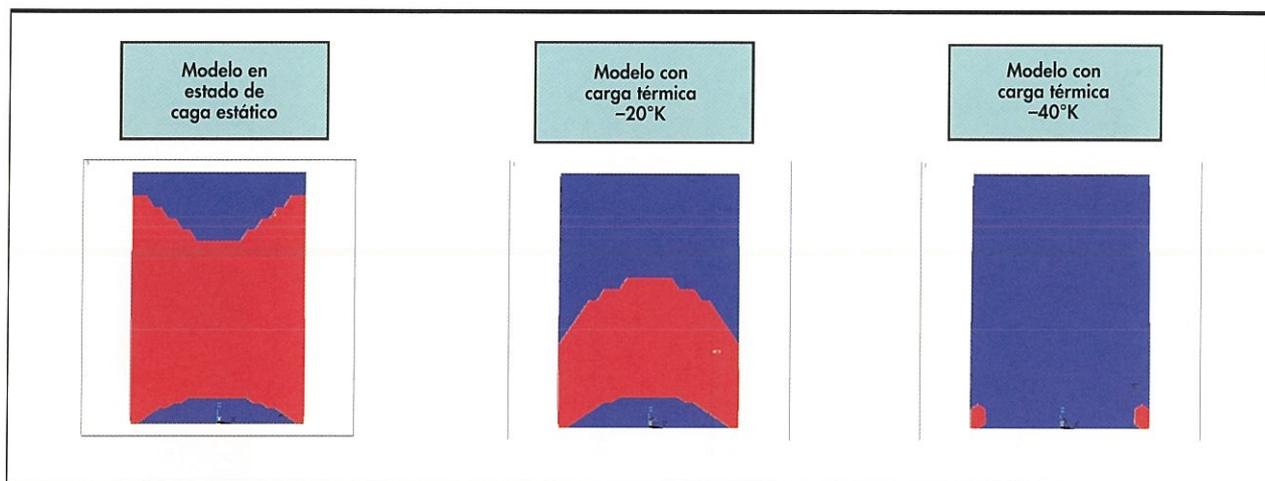


FIGURA 4. Distribución de zonas plásticas (rojo) y elásticas (azul), en el interior del material granular obtenida con el M.E.F para distintos estados de carga térmica, con ángulo de rozamiento interno 30° .

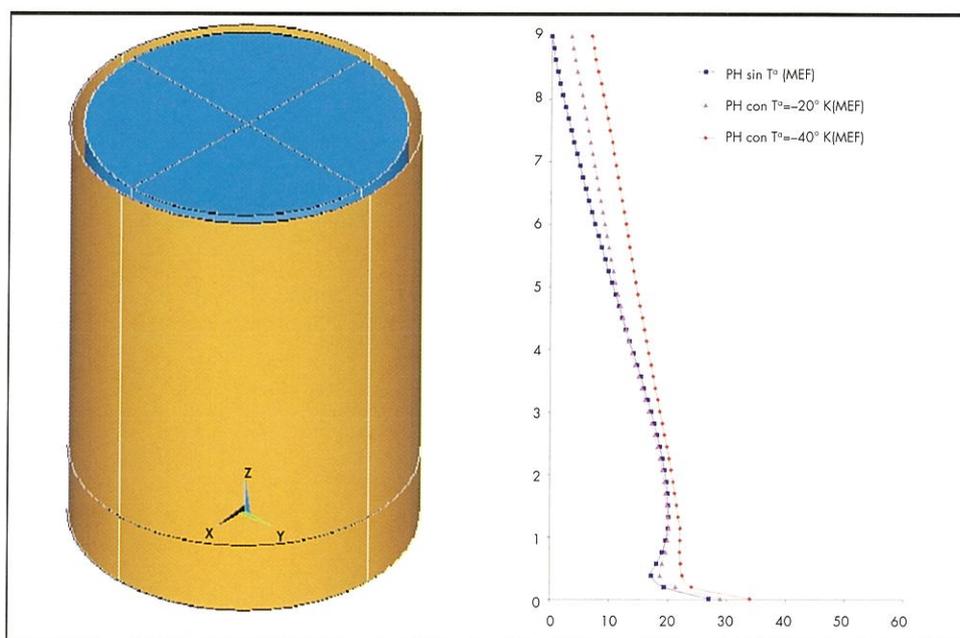


FIGURA 5. Distribución de presiones horizontales a lo largo de la pared del silo. Comparativa de los resultados obtenidos para distintas temperaturas (contracción de la chapa), con ángulo de rozamiento interno 30° .

También se han obtenido resultados acerca de la influencia de distintos parámetros en el incremento de presiones horizontales de origen térmico. Los parámetros analizados fueron cuatro: espesor de la chapa, módulo de Young, coeficiente de Poisson del grano y coeficiente de rozamiento grano-pared. Los resultados se muestran en las figuras 6.a, 6.b, 6.c y 6.d.

CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado un modelo que permite calcular y analizar las presiones en el interior del material granular y las tensiones en la chapa. Este modelo representa el comportamiento tanto de la pared del silo, como del material granular almacenado en su interior, añadiendo también la interacción entre ambas entidades al introducir el rozamiento que se produce entre ellas, todo ello permite simu-

lar la evolución del conjunto sometido a la acción de variaciones térmicas. Otra ventaja del modelo es que puede ser utilizado fácilmente por ingenieros e investigadores aun no siendo expertos en el MEF, simplemente asignando nuevos valores a las variables geométricas y a las propiedades de los materiales, sin tener que cambiar los comandos necesarios para la resolución del modelo.

- Como conclusión podríamos decir que los efectos de las variaciones de temperatura provocan importantes aumentos de las presiones horizontales que deben tenerse en cuenta en el cálculo y posterior diseño de estas estructuras al ser responsables de accidentes por rotura de la pared de los silos. Como se mencionó anteriormente, el gran vacío en cuanto a normativa que oriente acerca del cálculo de cargas térmicas lleva a la necesidad de un estudio profundo de las mismas.

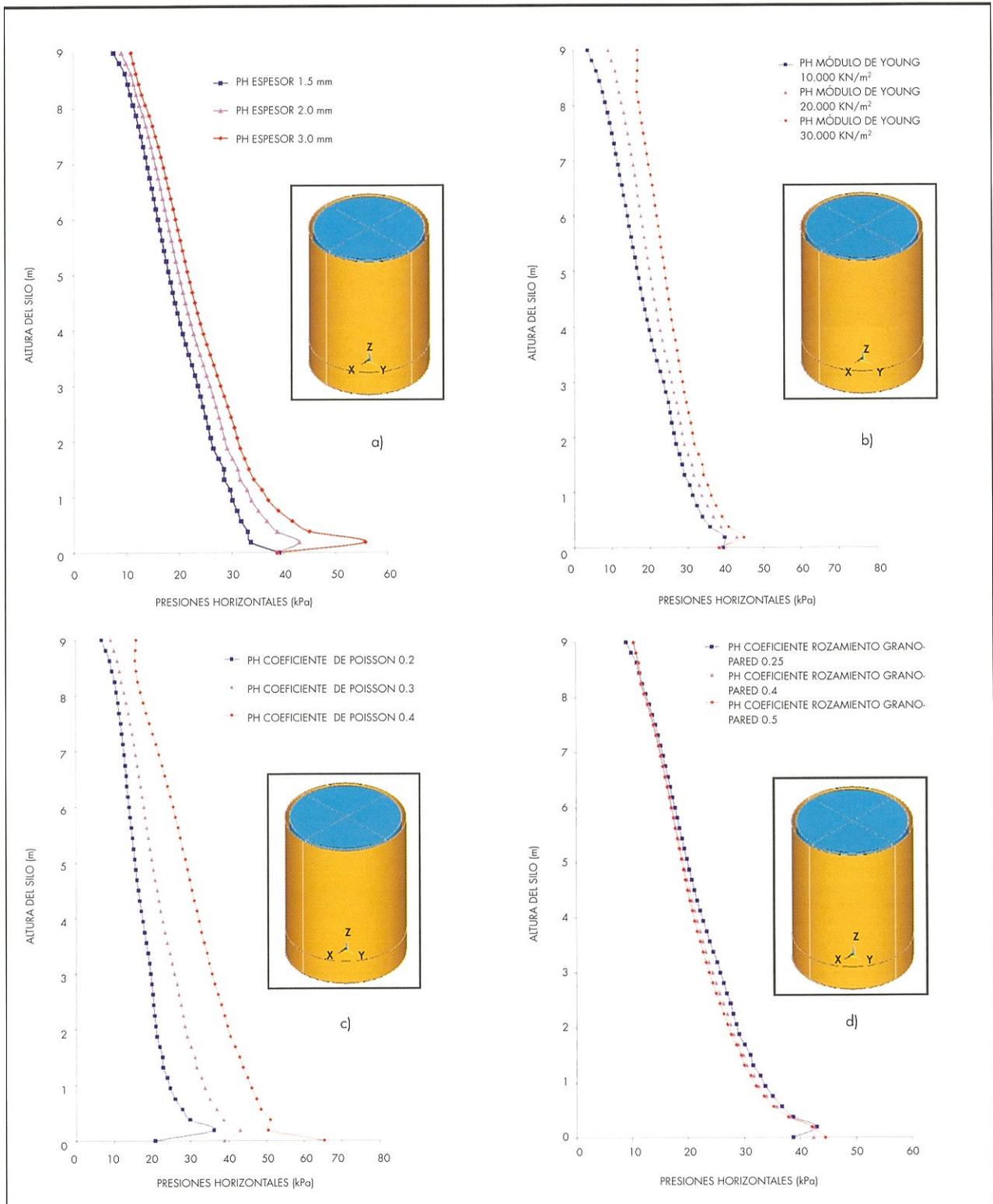


FIGURA 6. Influencia de distintos parámetros sobre las presiones horizontales para modelos sometidos a una disminución térmica de 40°K. (6.a Variación del espesor de la pared, 6.b Variación del módulo de Young, 6.c Variación del coeficiente de Poisson del grano, 6.d Variación del coeficiente de rozamiento grano-pared).

- Se observa que disminuciones de temperatura de más de 20°K pueden provocar aumentos de presión por encima de los valores de cálculo del Eurocódigo.

- El aumento de las presiones horizontales no es proporcional al descenso térmico, se va volviendo más intenso a medida que se acentúan las disminuciones de temperatura.

- Si consideramos un comportamiento elasto-plástico del material granular se produce un aumento de las presiones horizontales debido a la acción de cargas térmicas en las zonas de comportamiento elástico.
- Las zonas de comportamiento elástico crecen a medida que aumenta la carga térmica de forma tanto más acentuada cuanto mayor sea el ángulo de rozamiento interno.
- El aumento de las presiones horizontales debido a la acción de cargas térmicas se ve acentuado con el incremento del espesor de la chapa, del módulo de Young del material granular y del coeficiente de Poisson del grano, no viéndose afectado por variaciones del ángulo de rozamiento grano-pared.

REFERENCIAS

- [1] Aguado, P., Ayuga, F., Guaita, M., Gutiérrez, P., Morán, J. and Juan, A. (1999). "Predicting stress fields in agricultural silos during discharge". 1999 ASAE/CSAE Annual International Meeting. Toronto (Canada)
- [2] Aguado Rodríguez, P. J. (1997) "Métodos avanzados de cálculo de presiones en silos agrícolas mediante la técnica de elementos finitos. El vaciado de silos y las paredes de chapa ondulada". Tesis Doctoral. Departamento de Construcciones y Vías Rurales. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. 411 pp.
- [3] Ayuga, F., Guaita, M., Aguado, P. and Couto, A. (2001). "Discharge and eccentricity of the hopper influence on the silo wall pressure". ASCE. Journal of the Engineering Mechanics. Vol 127 No. 10. Oct. 2001. pp 1067-1074.
- [4] ANSYS User's Manuals for Revision 5.3 (1998). Vol. I, II, III, IV and V. Swanson Analysis Systems, Inc. Houston (USA).

- [5] Couto Yáñez, A. (2000). "Métodos avanzados de cálculo de presiones estáticas en silos cilíndricos y prismáticos con tolva excéntrica mediante el método de los elementos finitos". Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Agroforestal. Escuela Politécnica Superior. Campus de Lugo. Universidad de Santiago de Compostela. 454 pp
- [6] Deutsch, G. P. and Schmidt, L. C. (1968) "Pressures on silo walls" Journal of the Engineering Mechanics Division (ASME), Proceedings ASCE, Paper No. 68-MH-24.
- [7] ENV 1991-4. (1995) "Eurocode 1. Part 4 : Basis of design and actions on structures Actions on silos and tanks."
- [8] Guaita Fernández, M. (1995). "Creación de modelos para la simulación de silos por el método de los elementos finitos y análisis de los empujes estáticos del material almacenado" Tesis doctoral. Departamento de Construcciones y Vías Rurales. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. 555 pp.
- [9] Morán del Pozo, J. M. (2002) "Sistemas avanzados de cálculo de presiones de origen térmico en silos agrícolas mediante el método de los elementos finitos" Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Agraria. Escuela Superior y Técnica de Ingeniería Agraria. Universidad de León. 345 pp.
- [10] Ravenet, J. (1977) "Silos" Editores Técnicos Asociados. Barcelona. Spain.
- [11] Safarian, S.S. y Harris, E.C. (1985) "Design and construction of silos and bunkers". Ed Van Nostrand Reinhold Company.

NOTACIÓN

- MEF: Método de los elementos finitos.
PH: Presiones horizontales.

PILOTES POSADA COLABORÓ EN LA AMPLIACIÓN DEL METRO DE MADRID

PILOTES POSADA siempre ha mirado hacia el futuro consolidando cada uno de sus pasos y sustentando su avance en la investigación, la tecnología y la profesionalidad para conseguir la calidad.

PILOTES POSADA es un empresa líder, de vanguardia, capacitada para acometer los proyectos de cimentación más complejos, como ha demostrado en obras tales como el Metro de Madrid, el Ferrocarril de Alta Velocidad, Autopistas, Puertos, Edificaciones, etc., repartidos en todo el territorio nacional.

**PILOTES
POSADA S.A.**

CIMENTACIONES ESPECIALES

SEDE CENTRAL
Carretera de Baiona, 44 int. 36213 VIGO [España]
Telf.: +34 986 29 35 00 Fax: +34 986 20 21 52
Email: piposa@pilotesposada.com

DELEGACIÓN CENTRO
Calle Oslo, 1 - bloque 3 - 1º - 4
28224 Pozuelo de Alarcón. MADRID [España]
Telf.: +34 91 361 26 63 Fax: +34 91 361 24 06

