

# ANÁLISIS DE CÁLCULO DE LAS CARGAS TÉRMICAS EN SILOS METÁLICOS MEDIANTE EL EUROCÓDIGO 1, LOS MÉTODOS CLÁSICOS Y EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

(ANALYSIS OF THERMAL LOADS CALCULUS IN STEEL SILOS USING THE EUROCODE 1, THE CLASSIC METHODS AND FINITE ELEMENTS METHOD)

Julia M<sup>a</sup> Morán, Andrés de Juan Valdés, Pedro J. Aguado

Fecha de recepción: 23-VI-02

ESPAÑA

582-18

## RESUMEN

*Las cargas térmicas provocan importantes aumentos en las presiones que ejerce el material granular almacenado en los silos; el Eurocódigo 1 parte 4, establece su importancia, pero no propone ningún método de cálculo que permita su cuantificación. En este trabajo se van a analizar y comparar diversos métodos clásicos de cálculo de cargas térmicas y modelos desarrollados por los autores usando el Método de los Elementos Finitos.*

## SUMMARY

*Thermal loads cause important increases in the pressures exerted by granular material stored in silos. The Eurocode 1, part 4, establishes their importance, but it does not propose any calculation method that allows their quantification. In this work the authors try to overcome this difficulty analyzing and comparing different classic methods of calculation of thermal loads and models developed by the authors using the Finite Element Method.*

El cálculo de las acciones que afectan a los silos ha sido tema de estudio, desde hace largo tiempo, por numerosos equipos de investigación.

En la actualidad existen varios países europeos, entre los que se encuentra España, en los que no hay una norma de carácter obligatorio para realizar el diseño y dimensionado de silos. En la actualidad esta carencia puede resolverse mediante el uso de la norma experimental (ENV-1991-4) actualmente en proceso de revisión que trata de establecer un protocolo de cálculo de acciones en silos.

La correcta determinación de estas acciones permite racionalizar el diseño a fin de evitar fallos estructurales.

Una de las cargas que es necesario tener en cuenta al diseñar silos, ya que su no consideración ha originado accidentes importantes [San José, Missouri (EE UU, 1963)], es la de naturaleza térmica.

Cuando un silo se ve afectado por descensos de temperatura su pared tiende a contraerse, cuando el silo está lleno, el material almacenado en su interior impide esta contracción, provocando un incremento de las presiones que ejerce el grano sobre la pared, cuando la temperatura sube, la pared se dilata y el grano se asienta aumentando su grado de compactación lo que se refleja en un incremento de su módulo de elasticidad, lo cual provoca que en la siguiente disminución térmica la oposición del grano a la contrac-

ción de la chapa sea mayor y, por lo tanto, las presiones ejercidas también, alcanzando una cuantía en absoluto despreciable.

Por lo tanto, para realizar un dimensionado seguro del silo, a las presiones que la estructura soporta por el hecho de estar llena, se le deberían añadir las originadas por la contracción de la chapa a causa de la disminución térmica.

Existen distintos trabajos que analizan las cargas de origen térmico. En algunos de ellos se aportan métodos que permiten cuantificar el valor de las citadas cargas, el cual ha de sumarse a las presiones presentes en un silo por el hecho de estar lleno;

1. Norma experimental (ENV-1991-4)
2. Método clásico propuesto por Ravenet [8]
3. Método clásico propuesto por Theimer [9]
4. Método propuesto por Andersen [3]
5. Métodos numéricos (MEF) [5] desarrollados por los autores

En este trabajo se pretende realizar una comparación y estudio de los resultados obtenidos tras la aplicación de los primeros métodos con los extraídos de la utilización del quinto (M.E.F.) a fin de establecer su grado de precisión y proponer valores ajustados a la realidad que permitan un mejor diseño de estas estructuras.

#### ENV-1991-4

El Eurocódigo ha venido presentando ciertas carencias en cuanto a la definición de acciones, algunas de las cuales han sido ya comentadas por los autores [2], aunque cabe mencionar que es una norma sometida a continuas revisiones que tratan de dar solución a los distintos problemas que se van detectando.

En la primera norma experimental publicada para el cálculo de acciones en silos se menciona la existencia de las cargas de origen térmico, indicando la importancia de su consideración a la hora de diseñar de forma segura estas estructuras, pero no se propone ningún sistema que permita su determinación.

En este primer borrador, por un lado se define (Anexo A1-3) que las acciones térmicas son aquéllas debidas a efectos climáticos y de sólidos calientes, y que existen distintas situaciones que pueden originarlas entre otras;

- La presencia de rellenos sólidos o líquidos calientes que ocupen parcialmente un silo, teniendo en cuenta el efecto de la temperatura del aire sobre el material almacenado.
- Y el efecto de la resistencia que opone el sólido almacenado dentro del silo a la contracción de sus paredes por acción del enfriamiento de las mismas.

Por otro lado, otra referencia que se puede encontrar en la norma experimental a las cargas térmicas, es la posibilidad de su consideración al elaborar la combinación de acciones (Anexo A-2.2).

Todas estas consideraciones planteadas son excesivamente vagas, ya que si bien se desprende de ellas la importancia de la consideración de las cargas térmicas, no se ofrece ningún método de cálculo concreto que permita su cuantificación.

#### Método clásico propuesto por Ravenet

En cuanto a los métodos clásicos, especialmente por su trascendencia en España, cabe citar el libro de J. Ravenet "Silos. Deformaciones. Fallos. Explosiones. Prevención de accidentes" [8] que dedica un capítulo a la determinación de este tipo de acciones.

Si el silo estuviese vacío, la contracción sería máxima, y, por lo tanto, la tensión debida a temperatura a la que se vería sometida la chapa de acero sería mínima. Si por el contrario estuviera lleno de un material sumamente rígido que impidiera cualquier desplazamiento, la contracción no se produciría y la tensión a la que se vería sometida la chapa sería máxima.

Lo que ocurre en la realidad es un caso intermedio, ya que el silo estará lleno de un material granular con cierto grado de rigidez, capaz de sufrir contracciones al verse sometido a la presión que la chapa ejerce sobre él, permitiendo la disipación parcial de la tensión de la chapa.

Por lo tanto, la tensión térmica adicional (a sumar como constante a lo largo de toda la altura del silo a la tensión debida a las acciones del material) se puede obtener teniendo en cuenta que la contracción del diámetro del volumen de grano (1) será igual a la contracción del diámetro del silo (2).

$$\Delta_G = 2 \cdot P_t \cdot r \cdot \frac{1 - \mu_G}{E_G} \quad (1)$$

Siendo:

$\Delta_G$ : Disminución del diámetro de la masa de grano almacenada en el interior del silo.

$P_t$ : Presión radial causada por el acortamiento de la chapa

$r$ : Radio del silo.

$\mu_G$ : Constante de Poisson para el cereal comprimido.

$E_G$ : Módulo de elasticidad del grano comprimido.

$$\Delta_S = 2 \cdot \left( r \cdot \alpha \cdot t - \frac{P_t \cdot r^2}{d \cdot E_S} \right) \quad (2)$$

Siendo:

$\Delta_S$ : Disminución del diámetro del silo.

$\alpha$ : Coeficiente de dilatación lineal del acero.

d: Espesor de la chapa.

t: Variación térmica.

$E_S$ : Módulo elasticidad de Young del acero.

Conocidas las expresiones de la contracción de ambos diámetros en función de la presión radial de origen térmico, tenemos dos ecuaciones con dos incógnitas de donde se determina el valor de la presión que nos interesa igualando ambas (3).

$$P_t = \frac{\alpha \cdot E_G \cdot t}{\frac{r}{d} \cdot n + 1 - \mu_G} \quad (3)$$

Siendo:  $n = \frac{E_G}{E_S}$

#### Método clásico propuesto por Theimer

Otro método para el cálculo de la presión radial producida por la contracción de la chapa debida a un descenso térmico usado tradicionalmente, es el de Otto Theimer, descrito en el libro de Sargis S. Safarian y Ernest C. Harris, "Design and construction of silos and bunkers" [9].

Como es sabido, el material granular puede sufrir una compresión por acción, en primer lugar, de su propio peso cuando está contenido en un silo, y, en segundo lugar, si existe un descenso térmico por acción de la compresión que ejercen las paredes de la estructura al contraerse.

Si se suceden varios ciclos de contracción y dilatación el grano se somete reiteradamente a ciclos de compresión y "posado" que hacen que el efecto sea cada vez más intenso, al aumentar el grado de compactación del grano, éste eleva su nivel de rigidez, oponiéndose de forma importante a la contracción de la chapa del silo y provocando el aumento de la presión dentro del grano y, por lo tanto, de las tensiones sobre la pared.

La fórmula propuesta por Theimer (4) para el cálculo de la presión radial producida por este efecto es;

$$P_t = \frac{\alpha \cdot E_M \cdot \Delta T}{\frac{r}{t} \cdot n + 1 - \nu_M} \quad (4)$$

Siendo:

- $P_t$ : Presión radial causada por la carga térmica
- $\alpha$ : Coeficiente de dilatación lineal del acero
- $E_M$ : Módulo de elasticidad del grano comprimido
- r: Radio del silo
- t: Espesor de la chapa

$$n = \frac{E_G}{E_S}$$

$E_S$ : Módulo de elasticidad del acero

$\nu_M$ : Coeficiente de Poisson para el cereal comprimido

$\Delta T$ : Variación térmica

Si se observa detenidamente la fórmula empleada por Otto Theimer y recogida por Safarian y Harris [9] se aprecia que coincide con la propuesta por Ravenet anteriormente explicada.

#### Método de Andersen

Andersen, en 1966 propone una expresión para calcular las presiones horizontales "pt" en un silo, resultantes de una disminución térmica que provoca la contracción de la chapa (5) y que está recogida en el libro "Silos" de Brown y Nielsen [3]

$$P_t = \frac{\alpha \cdot E \cdot \Delta T}{\frac{r}{t} + (1 - \nu) \cdot \frac{E}{E_1}} \quad (5)$$

$\alpha$ : Coeficiente de dilatación de la pared.

E: Módulo de elasticidad de la pared.

r: Radio del silo.

t: Espesor de la chapa.

$E_1$ : Módulo de elasticidad del material granular.

$\nu$ : Coeficiente de Poisson del cereal.

$\Delta T$ : Variación térmica.

Esta expresión se basa en la teoría de membrana para paredes delgadas y supone un comportamiento elástico lineal del grano. Nuevamente la observación minuciosa de la expresión pone de manifiesto su analogía con las expresiones propuestas por Ravenet y por Theimer descritas anteriormente.

#### Método de los Elementos Finitos (M.E.F.)

Está ampliamente reconocido que el Método de los Elementos Finitos es el sistema que más se adapta a la realidad a la hora de determinar las acciones que afectan a silos. De hecho, la norma que establece la forma de realizar su diseño en el caso de silos de acero (ENV-1993-4-1, Silos) propone el M.E.F. como el método más adecuado de cálculo cuando se superan las 100 toneladas de capacidad (silos medios y grandes)

No son frecuentes los modelos en elementos finitos que simulen cargas térmicas, y mucho menos combinados con las acciones del material.

Los autores de este trabajo han elaborado un modelo en elementos finitos en el que se simula el efecto de variacio-

nes térmicas sobre la pared del silo y sobre el material almacenado en su interior [5].

Para el análisis de las cargas térmicas en silos se representa la estructura en tres dimensiones, simulando, tanto el material granular almacenado, como la chapa que constituye la pared, y estableciendo posteriormente el contacto entre ambas entidades de manera que se produzca rozamiento entre ellas.

El modelo general realizado a través del Método de los Elementos Finitos se desarrolla a partir de un fichero, elaborado en modo texto mediante el programa ANSYS 6/ University High Option, que permite variar de manera sencilla los distintos parámetros que definen el silo y el material almacenado.

La pared del silo se representa a través de un elemento membrana flexible (SHELL63), dotado de las características necesarias para simular una chapa de acero, que permiten la dilatación y contracción de la misma por efecto de la temperatura. El material almacenado se simula con un elemento sólido de 8 nodos (SOLID45) dotado de las características propias del material granular. Por último,

se simula el rozamiento introduciendo un par de contacto (CONTA173 y TARGET170) (Figura 1), el tipo de contacto seleccionado es el superficie a superficie, el tipo de modelo es el flexible-flexible que permite los desplazamientos relativos del material almacenado y la pared, necesarios para simular adecuadamente la deformación tanto de la chapa como del grano.

Se seleccionó un comportamiento elástico para el material granular y para la pared de acero, sometiéndolos a un descenso térmico de 40 °C.

Las características generales del modelo así como las características que definen tanto a la pared del silo como al material granular almacenado se dan a continuación (Tablas 1, 2 y 3).

## RESULTADOS

Para el análisis comparativo de los distintos métodos existentes para el cálculo de silos sometidos a presiones de origen térmico, se utilizará, en todos los casos, el modelo descrito anteriormente.

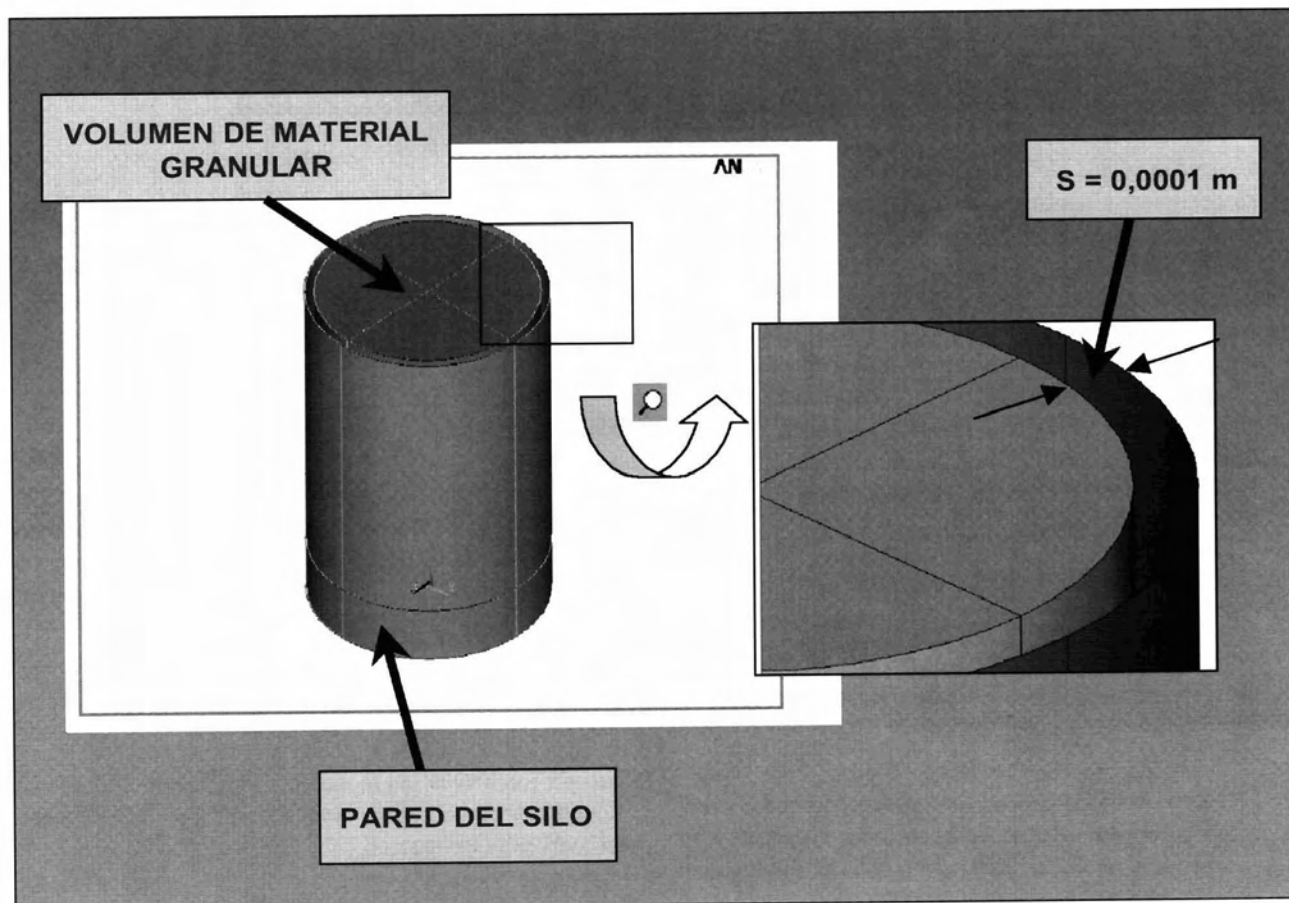


Figura 1.- Detalle de la geometría y los elementos que representan la estructura.

TABLA 1  
variables geométricas del modelo



<b>VARIABLES GEOMÉTRICAS DEL SILO:</b>	
<b>Material que constituye la pared del silo:</b>	<b>Acero liso</b>
<b>Tipo de fondo:</b>	<b>Plano</b>
<b>Altura (H):</b>	<b>12 m</b>
<b>Radio (R):</b>	<b>3 m</b>
<b>Espesor (ESP):</b>	<b>2 mm</b>

TABLA 2  
Características del modelo sometido al primer estado tensional (sin carga térmica)

<b>Características del material que constituye la chapa</b>	
Módulo de elasticidad de Young	$2'1 \cdot 10^8 \text{ kN/m}^2$
Coefficiente de Poisson	0'3
<b>Características del material que constituye el grano</b>	
Módulo de elasticidad de Young	$5.000 \text{ kN/m}^2$
Coefficiente de Poisson	0'3
Coefficiente de rozamiento grano-pared	0'25
Peso específico del material	$9 \text{ kN/m}^3$

TABLA 3  
Características del modelo sometido al segundo estado tensional (descenso térmico de 40 °C)

<b>Características del material que constituye la chapa</b>	
Módulo de elasticidad de Young	$2'1 \cdot 10^8 \text{ kN/m}^2$
Coefficiente de Poisson	0'3
Temperatura de partida	15 °C
Coefficiente de expansión térmica	$1'2 \cdot 10^{-5} [\text{m}/(\text{m} \cdot \text{°C})]$
<b>Características del material que constituye el grano</b>	
Módulo de elasticidad de Young	$20.000 \text{ kN/m}^2$
Coefficiente de Poisson	0'3
Coefficiente de rozamiento grano-pared	0'25
Peso específico del material	$9 \text{ kN/m}^3$

Analizando los resultados obtenidos a través del empleo del Método de los Elementos Finitos (Figura 2) podemos observar cómo las presiones horizontales en el interior del material granular aumentan a medida que disminuye la temperatura, desde valores próximos a presiones mínimas en la zona superior de la estructura (rojo), para el modelo sin

variación de temperatura, hasta valores medios (verde) para el modelo sometido a un descenso de 40 °C, y en la zona inferior de la estructura vemos cómo la franja de presiones máximas (azul oscuro), presente en el modelo cargado térmicamente, corresponde a valores de presión inferiores (azul intermedio) para el modelo sin carga térmica.

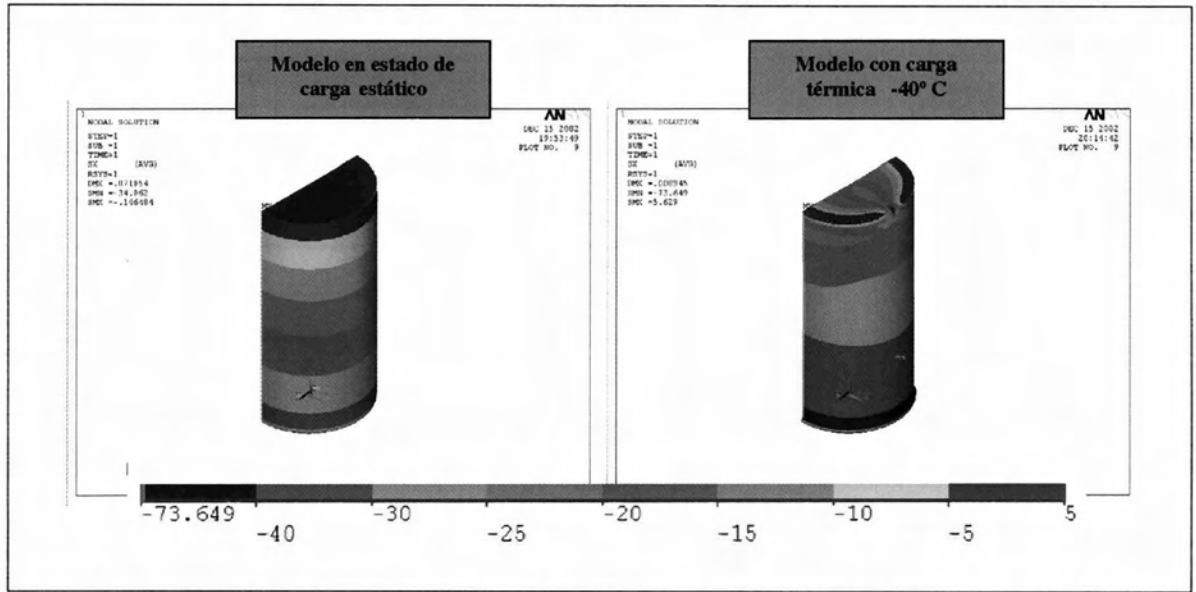


Figura 2.- Distribución de presiones horizontales (kPa) en el interior del material granular obtenida con el M.E.F. para distintos estados de carga térmica.

Por otro lado, en las Figuras 3 y 4 podemos observar la evolución de las presiones horizontales y verticales respectivamente, a lo largo de la altura del silo, calculadas para el modelo descrito, usando los distintos métodos analizados anteriormente en este trabajo.

Si observamos los resultados obtenidos en el primer estado de carga (modelo sin carga térmica) a través de la aplicación del Eurocódigo y a través del uso del M.E.F., vemos cómo las presiones horizontales y verticales aumentan con la profundidad en ambos casos, de forma menos acentuada en el segundo método.

Por otro lado, si analizamos las presiones obtenidas en el segundo estado de carga (descenso térmico de 40 °C), vemos cómo se observa nuevamente un aumento de las presiones horizontales (tanto por los métodos clásicos -de Ravenet, Theimer y Andersen- como por el M.E.F.) y verticales (M.E.F.) con la profundidad.

Si observamos ahora las diferencias existentes entre las presiones horizontales obtenidas para los modelos sin y con carga térmica, vemos cómo en el segundo caso se produce un aumento importante de la presión con respecto al primer caso, que se mantiene a lo largo de toda la pared, y que es más intenso en la zona superior del silo.

Las presiones verticales disminuyen con la disminución térmica de forma más acusada en la parte inferior del silo.

Por último, comparando las presiones horizontales obtenidas por los distintos métodos para el modelo cargado térmicamente, se puede observar cómo las presiones obtenidas por métodos clásicos son más elevadas que las obtenidas por el Método de los Elementos Finitos, mientras que

el único método de cálculo de acciones propuesto por el Eurocódigo (sin carga térmica), arroja valores inferiores a los calculados a través del M.E.F. a lo largo de prácticamente toda la altura.

## CONCLUSIONES

### En cuanto a las presiones horizontales

A la vista de los resultados podemos establecer que una estructura sometida a un descenso de la temperatura soporta mayores presiones horizontales. Este exceso de presión es más acusado en la zona superior del silo.

La cuantificación del incremento de presión horizontal sufrido por un silo, debido al efecto de una disminución térmica sería:

- En el tercio superior de la estructura las presiones horizontales que sufre el silo duplican, como media, a las que tendría sin variación de temperatura (sin descenso térmico).
- En el tercio intermedio de la estructura las presiones horizontales que sufre el silo superan en un 50% como media, a las que tendría sin variación de temperatura (sin descenso térmico).
- En el tercio inferior de la estructura las presiones horizontales que sufre el silo superan en un 25%, como media, a las que tendría sin variación de temperatura (sin descenso térmico).

Los métodos clásicos (Ravenet, Theimer y Andersen) son excesivamente conservadores a la hora de calcular las presiones adicionales de origen térmico, encontrándose por encima de las obtenidas con el M.E.F. en prácticamente toda la altura del silo.

### COMPARACION DE LOS EMPUJES DEBIDOS A CARGAS TÉRMICAS OBTENIDOS CON EL M.E.F. Y A TRAVÉS DE OTROS MÉTODOS

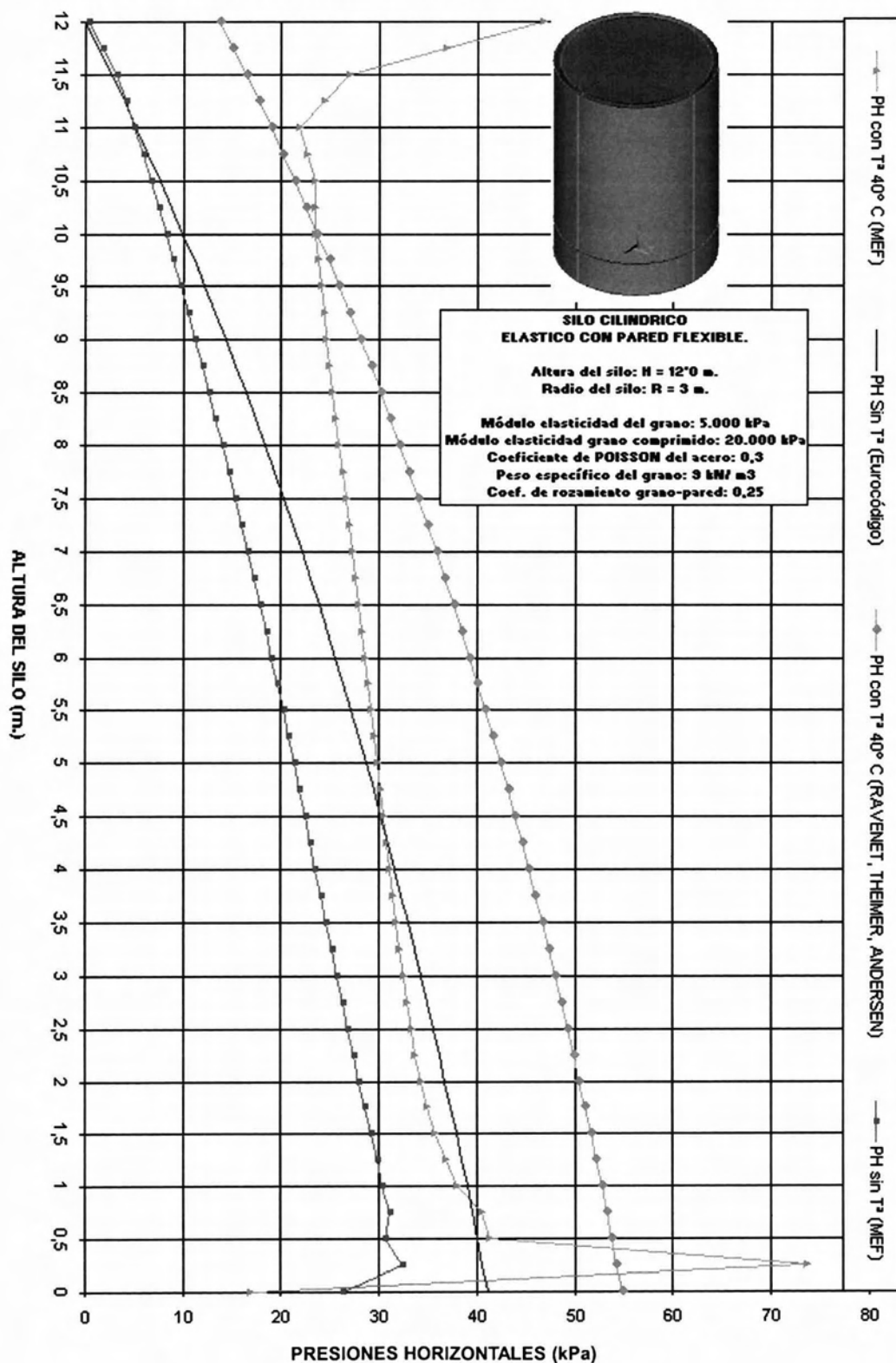


Figura 3.- Linearización de presiones horizontales.

### COMPARACION DE LOS EMPUJES DEBIDOS A CARGAS TÉRMICAS OBTENIDOS CON EL M.E.F. Y A TRAVÉS DE OTROS MÉTODOS

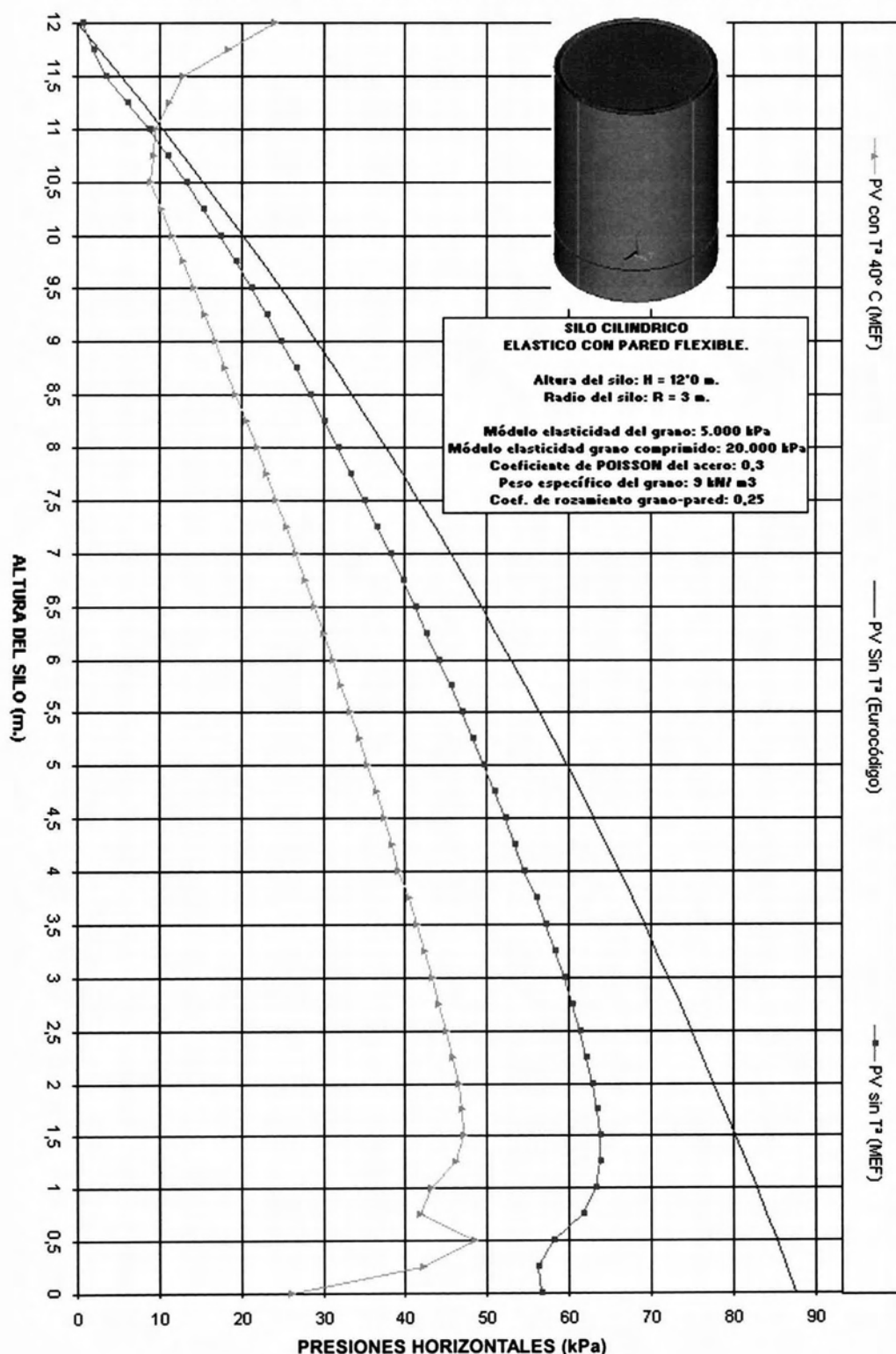


Figura 4.- Linearización de presiones verticales.



El Eurocódigo que permite el cálculo de acciones en silos no propone método alguno de cuantificación de cargas térmicas. Esta carencia ha de ser resuelta, ya que su no consideración supone una minoración importante de las cargas reales que afectan a estas estructuras.

### En cuanto a las presiones verticales

A la vista de los resultados podemos establecer que una estructura sometida a un descenso de la temperatura soporta menores presiones verticales.

Las presiones verticales que sufre el silo disminuyen un 30%, como media, respecto a las que tendría sin variación de temperatura (sin descenso térmico).

### REFERENCIAS

[1] AGUADO, P. J.; AYUGA, F. y otros (1999) "Aplicación del Método de los Elementos Finitos a problemas de construcción rural". Ed. UNICOPIA. Lugo.

[2] AYUGA, F. y otros (2000) "Limitaciones del Eurocódigo 1, parte 4, en la determinación de las acciones de materiales agrícolas ensilados" Informes de la Construcción. Vol. 52, nº 468 pp. 33-43

[3] BROWN, C. y NIELSEN, J. (1998) "Silos. Fundamentals of theory, behaviour and design" Ed. E & FN Spon. London.

[4] ENV 1993-4-1. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 4-1: Silos, tanks and pipelines-Silos (1999) CEN. Brussels.

[5] MORÁN, J. 2001 "Sistemas avanzados de cálculo de presiones de origen térmico en silos agrícolas mediante el M.E.F." Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Agraria. Universidad de León.

[6] MORÁN, J.; AGUADO, P. J. y otros (2002) "Effects of Thermal Loads On Agricultural Silos" 15th ASCE Engineering Mechanics Division Conference. Columbia University. New York (N.Y.), junio 2002.

[7] NORMA EUROPEA EXPERIMENTAL UNE-ENV 1991-4: "Acciones en silos y depósitos" (1998) AENOR. Madrid.

[8] RAVENET, J. (1977) "Silos" 3 Tomos. Editores Técnicos Asociados, S.A.

[9] SAFARIAN, S. S. y HARRIS, E. C. (1985) "Design and construction of silos and bunkers". Ed. Van Nostrand Reinhold Company.

\*\*\*