ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES ESTÁTICAS EN SILOS CILÍNDRICOS CON TOLVA EXCÉNTRICA MEDIANTE EL M. E. F. INFLUENCIA DE LA EXCENTRICIDAD Y COMPARACIÓN CON EL EUROCÓDIGO 1

(ANALYSIS OF STATIC PRESSURE DISTRIBUTIONS IN GRAIN SILOS WITH ECCENTRIC OUTLETS. RIGID WALLS AND ELASTO-PLASTIC BEHAVIOR OF THE STORED MATERIAL)

Ángel Couto Yáñez, Dr. Ingeniero Agrónomo. Univ. de Santiago de Compostela Manuel Guaita Fernández, Dr. Ingeniero Agrónomo. Univ. de Santiago de Compostela Pablo Vidal López, Ingeniero Agrónomo. Univ. Politécnica de Cartagena

ESPAÑA

Fecha de recepción: 13-III-01

RESUMEN

En Europa las acciones en silos se recogen en la Norma Europea (ENV 1991-4. Eurocode 1. Part 4: Actions on silos and tanks.)⁽⁷⁾, sin proponer método alguno de cálculo cuando la boca de salida es excéntrica, limitándose a mencionar que la excentricidad de ésta no debe de ser mayor del 25% del diámetro y mencionando que en un futuro se intentará que cubra las grandes excentricidades.

En este artículo realizamos un análisis de la distribución de presiones estáticas en silos cilíndricos con tolva excéntrica. Para ello hemos usado el programa ANSYS 5.5. con licencia universitaria, basado en el Método de los Elementos Finitos.

Según los resultados obtenidos con el empleo de dicho método, el máximo de empujes normales a la pared del silo se sitúa en la unión silo tolva, del lado contrario al del desplazamiento de la boca de salida, para cualquier excentricidad, aumentando en este punto, a medida que aumenta la excentricidad de la tolva.

Comparando con el Eurocódigo, mientras que éste propone unos empujes estáticos para tolva centrada, y los considera válidos hasta una excentricidad limite de 0,25 veces el diámetro del círculo inscrito en la sección transversal del silo, mediante el M.E.F. podemos observar la redistribución de los mismos en la pared de la tolva cuando ésta es excéntrica, aumentando del lado opuesto al desplazamiento de la boca de salida y disminuyendo del lado contrario. Esto nos lleva a concluir que se podría utilizar un método de cálculo menos conservador, en el Eurocódigo, para los empujes normales a la pared de la tolva, cuando ésta se encuentra centrada y elaborar unos coeficientes que recogiesen las variaciones que se producen en estado estático cuando se descentra la misma.

SUMMARY

At the European level, silos are considered under the European Standards (Eurocode 1, Part 4. Actions in silos and tanks)⁽⁷⁾, with no proposed method of calculation in the case of an eccentric outlet. The guidelines include a brief mention that eccentricity should not exceed 25% of the silo diameter and that in the future, attempts will be made to cover large eccentricities.

We have developed an analysis of static pressure distributions in grain silos with eccentric outlets. To this end, silos were modelled using ANSYS 5.5.

According to the F.E.M. maximum normal pressures on the silo wall correspond to the silo-hopper junction, on the opposite side to the displacement of the outlet for any eccentricity, increasing at this point as hopper eccentricity rises.

Compared to the the Eurocode, static pressures are proposed when the hopper is centered and considered to be valid up to an eccentricity limit of 0.25 times the diameter, their redistribution at the hopper wall when this is eccentric may be observed by means of the F.E.M. increasing on the opposite side to the outlet and decreasing on the same side with respect to the central hopper. This leads us to conclude that a more conservative method of calculation should be used in the Eurocode for normal pressures on the hopper wall when centered, and coefficients drawn up to include the variations produced in the static state when it is off-center.

PALABRAS CLAVE: método de los elementos finitos, silo, tolva excéntrica.

1. Introducción

Es conocido el papel vital que juegan hoy en día los silos en los procesos de manufactura y distribución y, en especial, como componentes de las industrias agrarias y agroalimentarias; sin embargo, existen aún muchas incógnitas por desvelar, hasta llegar a predecir con fiabilidad el comportamiento de estas estructuras, produciéndose fallos de diseño en todas las partes del mundo.

Con la incursión del Método de los Elementos Finitos en la ingeniería actual, se abre una nueva vía de investigación que es usada por numerosos equipos a nivel mundial en el cálculo de silos, hecho que motiva la presentación de este trabajo, continuando con las investigaciones sobre silos iniciadas por nuestro grupo hace años, así como hacer accesible la introducción de esta tecnología de cálculo en los proyectos agrícolas.

En cuanto a la metodología de trabajo en elementos finitos, optamos por el empleo de programas comerciales, ya que se trata de programas que han ido evolucionando paralelamente a las nuevas tecnologías, permitiendo incorporar nuevos aspectos al estudio con facilidad, además de hacer accesible esta metodología de cálculo a los proyectistas. Dichos programas permiten elaborar macros en lenguaje de programación propio, para generar un modelo que permita simular el comportamiento de un silo. El programa comercial empleado fue el ANSYS 5.5.

En cuanto a las leyes del comportamiento del material ensilado, para el cálculo de los empujes en la pared del silo hemos considerado, en una primera aproximación, el criterio elástico. Posteriormente, en otros trabajos, incorporaremos criterios elastoplásticos adaptados a materiales granulares.

Así pues -y en resumen- en este trabajo nos fijamos el objetivo de investigar la influencia que en los empujes estáticos tiene la excentricidad de la boca de salida, realizando un análisis de excentricidades mayores a las contempladas en el Eurocódigo-1⁽⁷⁾.

2. Generación del modelo

En cuanto al planteamiento del problema en M.E.F. con ANSYS, nos encontramos que para el cálculo de empujes en silos con tolva excéntrica es preciso usar el método de los elementos finitos en tres dimensiones. Las primeras investigaciones fueron encaminadas a la elección del elemento que simulará el material ensilado, así como el elemento que simulará el rozamiento grano-pared.

Para ello desarrollamos un primer modelo de silo cilíndrico con fondo plano, de comportamiento conocido, validando los resultados obtenidos mediante el método de los elementos finitos con otros métodos de cálculo y normativa existente. Tras numerosas pruebas optamos por la elección del elemento SOLID-45 para el mallado de los volúmenes del material ensilado; se trata de un sólido estructural en tres dimensiones. El elemento se encuentra definido por 8 nodos, con tres grados de libertad en cada nodo: translaciones en las direcciones X, Y, Z. En cuanto a propiedades admite el análisis de plasticidad, dilatación, tracción, esfuerzo de tensión, deflexión y grandes deformaciones.

En cuanto a la simulación del rozamiento grano-pared optamos por emplear el par de contacto TARGET-170 CONTACT-173. Para realizar el mallado del rozamiento, seleccionamos las áreas de la pared del silo y las mallamos con el elemento TARGET-170. Posteriormente seleccionamos las áreas de rozamiento del grano y las mallamos con el elemento CONTACT-173, situándose los nodos de este último sobre las caras de los elementos SOLID-45 que se encuentran en contacto con la pared. Los elementos TARGET-170 (mallado de la pared del silo), y CONTACT-173 (mallado de las áreas de rozamiento del material almacenado) constituyen el PAR DE CONTACTO, estableciéndose las fuerzas de rozamiento grano-pared entre los nodos de ambos elementos.

Una vez definidos los elementos a emplear pasamos a la generación del modelo de silo objeto de estudio, un silo cilíndrico con tolva excéntrica con las siguientes dimensiones (ver figura 1):

- Altura del silo:	Hs = 10,5 m
- Altura de la tolva:	T = 2.5 m
- Altura del cilindro:	H = 8 m
- Radio del silo:	R=3 m
- Ancho de la franja de unión silo tolva	2A = 1,4 m
- Radio de la boca de salida:	Rt = 0.5 m
- Excentricidad de la tolva (%):	Exct. = $0-100 \%$
- Ángulo que forman las generatrices de	e la tolva situadas
en el plano XZ, con la horizontal:	α , β = variable
(según excentri	cidad de la tolva).

Dichas medidas se corresponden según la clasificación del Eurocódigo con un silo esbelto (Hs / $D \ge 1,5$).

3. Análisis de esfuerzos en el silo

Para el estudio de empujes en los silos con tolvas con distintas excentricidades, se generan tres linealizaciones del esfuerzo (LESF1, LESF2, LESFUNION), ver figura 2. Para cada una de ellas se solicitan los resultados de presiones horizontales y verticales.

LESF1: se trata del estudio de los empujes en una generatriz del cilindro y su continuación con la correspondiente de la tolva, ambas situadas del mismo lado del desplazamiento de la boca de salida.

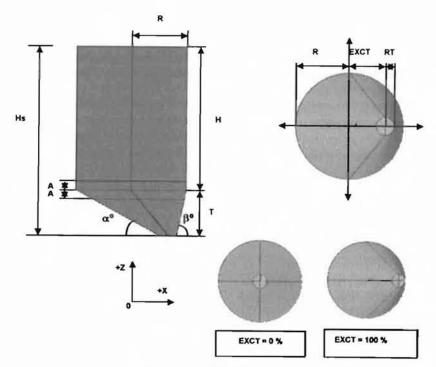


Figura 1.- Geometria del modelo.

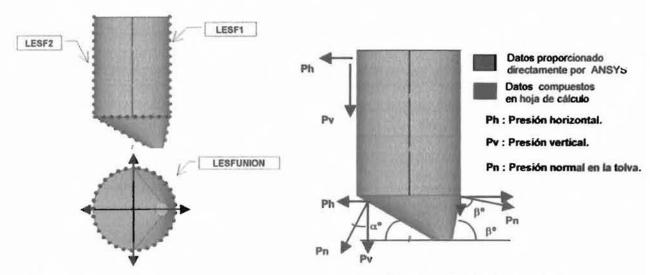


Figura 2.- Linealización de esfuerzos en el silo.

Figura 3.- Análisis de esfuerzos en el silo.

LESF2: Opuesta a la anterior.

LESFUNION: Consiste en el estudio de los empujes en la unión silo-tolva, dado que es conocido que es aquí donde se producen los mayores empujes. Como puede verse, esta linealización del esfuerzo recorre el perímetro de la circunferencia de la unión silo-tolva.

Para conocer, en el caso de la tolva, la presión normal (Pn) a la superficie de la pared es preciso componer los datos proporcionados por el programa según la ecuación:

$$Pn = Ph \ sen^2\alpha \ \acute{o} \ \beta \ + Pv \cos^2\alpha \ \acute{o} \ \beta$$

En el caso de los análisis de esfuerzos a lo largo de la circunferencia que recorre la unión silo-tolva (LESFUNION), y considerando la unión silo-tolva como el inicio de la tolva, el ángulo va variando a medida que recorremos la circunferencia cuando la tolva es excéntrica (figura 3). Una vez conocida la magnitud angular en cada punto de la circunferencia, el análisis de la Pn se realiza según la ecuación anterior

4. Comparación de los empujes en tolva centrada con otros métodos de cálculo y normativa existente

Una vez descrito el modelo, en este apartado pasamos a comparar los empujes obtenidos mediante el M.E.F. para un silo con tolva centrada con otros métodos de cálculo y normativa, existentes en la actualidad. Este estudio nos permitirá abordar con mayor seguridad los estudios posteriores con tolvas excéntricas, para los cuales en algunos casos no existe normativa debido al desconocimiento del comportamiento de estas estructuras en estado estático bajo estas condiciones.

Como material almacenado se ha elegido el trigo, mostrándose en la tabla 1 los datos de entrada necesarios para la obtención de las curvas de empujes, en lo que se refiere al material almacenado.

Las curvas de empujes obtenidas se muestran en la figura 4:

Del estudio de dichas curvas se sacan las siguientes conclusiones acerca de la comparación de los empujes en tolva centrada con la normativa existente:

. Las curvas de empujes según M.E.F. en la pared del cilindro, hasta las proximidades de la unión silo-tolva siguen la misma tendencia que los métodos de cálculo propuestos por la normativa existente, coincidiendo en los valores para este tramo con la Norma Francesa, pero siendo inferiores a los propuestos por la Norma Alemana y el Eurocódigo.

- . El M.E.F. coincide con el Eurocódigo al situar los mayores empujes en la unión silo-tolva, a diferencia de la Norma Francesa y la Norma DIN, según las cuales éstos se sitúan ya dentro de la tolva.
- . En la pared de la tolva, el Eurocódigo propone una disminución constante en los empujes hasta la boca de salida, mientras que según el M.E.F. se obtiene un descenso inicial muy acusado, para luego seguir una tendencia paralela a la del Eurocódigo, en la forma, pero no en los valores, ya que según el M.E.F. éstos son en torno al 47 % menores. Esto coincide con lo propuesto por JENIKE en 1968, el cual planteó esta disminución de presiones en la pared de la tolva, nada más empezar a recorrerla.

5. Discusión acerca de la excentricidad límite recogida en el Eurocódigo

En el Eurocódigo, para el cálculo de los empujes en la pared del silo en estado estático, no se propone ninguna corrección cuando la boca de salida es excéntrica, respecto de centrada, indicando que la excentricidad del centro de la boca de salida (e₀) no debe de ser superior a 0,25dc, siendo de el diámetro del silo en el caso de silos cilíndricos.

En el modelo generado en M.E.F. en este trabajo, una

TABLA 1

Datos de entrada necesarios para la ejecución del programa desarrollado en M.E.F.

Peso específico del grano (kN/m³)	9
Módulo de elasticidad del grano (kPa)	5.000
Coeficiente de Poisson	0,3
Coeficiente de rozamiento grano-pared	0,25

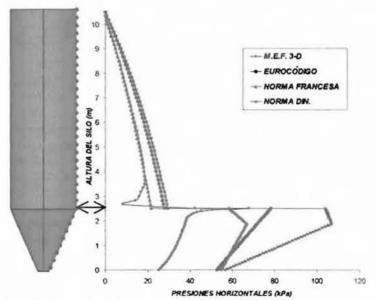


Figura 4.- Comparación de los empujes en tolva centrada según el M. E. F. en 3-D con la normativa existente.

excentricidad del centro de la boca de salida $e_0 = 0.25$ ·dc se corresponde con una excentricidad de la tolva del 60 %

En la figura 5 se comparan las curvas de empujes en la pared, obtenidas mediante el M.E.F. para una excentricidad del 60 % en LESF1 y LESF2, con la del Eurocódigo.

Si analizamos los empujes en la pared de la tolva, los dos métodos de cálculo sitúan el máximo de empujes en la unión silo-tolva, produciéndose una disminución en los mismos hasta alcanzar la boca de salida. Cabe comentar que en el modelo elaborado según el método de los elementos finitos, tanto en tolva centrada como en LESF1 para una excentricidad del 60 %, existe una reducción inicial entre los 2,5 y los 2 m de altura mucho más acusada que la que recoge el Eurocódigo, mientras que en LESF2 para una excentricidad del 60% la curva es prácticamente paralela a la del Eurocódigo.

Ahora bien, mientras que el Eurocódigo propone unos empujes estáticos para tolva centrada, y los considera válidos hasta una excentricidad límite de 0,25 dc (excentricidad del 60% en nuestro modelo), mediante el M.E.F. podemos observar la redistribución de los mismos en la pared de la tolva cuando ésta es excéntrica, aumentando del lado opuesto al desplazamiento de la boca de salida (LESF2) y disminuyendo del lado contrario. Así, observamos que cuando se descentra la tolva en un 60%, los valores aumentan en torno al 11,4% del lado de LESF2 con respecto a tolva centrada, viéndose compensado este aumento con una disminución del lado de LESF1 en torno al 10% (en la unión silo-tolva, zona donde se encuentra el máximo de empujes).

Esto nos lleva a concluir, con respecto a la excentricidad límite admitida en el Eurocódigo, que:

Se podría utilizar un método de cálculo menos conservador, en el Eurocódigo, para los empujes normales a la pared de la tolva, cuando ésta se encuentra centrada y elaborar unos coeficientes que recogiesen las variaciones que se producen en estado estático cuando se descentra la misma.

Influencia de la excentricidad de la tolva en los empujes

En este apartado se analiza la variación en los empujes estáticos debidos al peso del material almacenado al variar la excentricidad de la tolva, en silos cilíndricos con pared rígida.

En este estudio, partiendo de un silo cilíndrico con tolva centrada, hemos ido variando la excentricidad de la misma, realizando el análisis de los empujes obtenidos para las distintas excentricidades (ver figura 6).

En cuanto a los parámetros del material almacenado, se han considerado éstos constantes, ya que el objeto de estudio en este apartado es la variación de los empujes debida a la variación de las características geométricas del silo. Como material almacenado se ha elegido trigo de la variedad Camacho, cuyas características ya fueron expuestas anteriormente.

En la figura 6 se muestran las curvas normales a la pared en LESF1 y LESF2 para las distintas excentricidades analizadas.

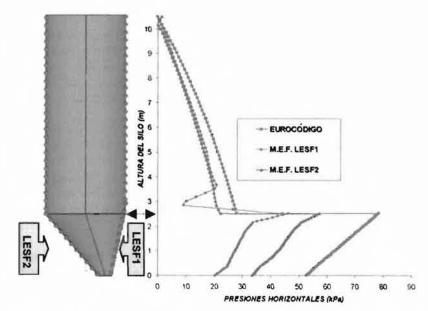


Figura 5.- Presiones normales a la pared en LESF1 y LESF2. Análisis de la variación de esfuerzos para excentricidad del 60%. Comparación con el Eurocódigo.

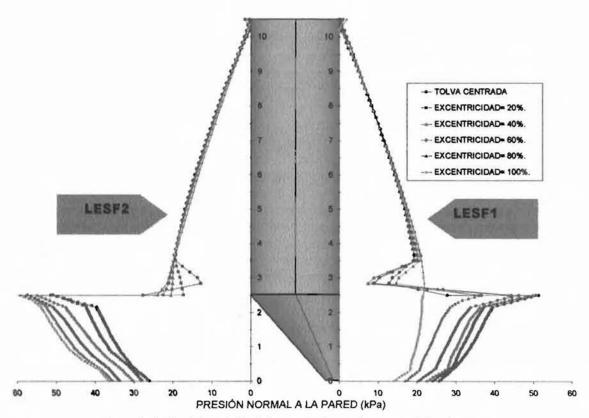


Figura 6.- Análisis de la variación de los empujes al variar la excentricidad de la tolva.

En un primer estudio de las mismas se observa que entre los 10,5 m (parte superior del silo) y los 3,5 m. de altura, los empujes normales a la pared apenas se ven afectados de la excentricidad de la tolva, para encontrar las principales diferencias entre los 3,5 m y la boca de salida.

Por otro lado, en un primer análisis superficial, se observa que, en general, mientras que en LESF1 la presión normal a la pared del silo disminuye al aumentar la excentricidad de la tolva, en LESF2 ocurre lo contrario, aumentando los empujes con la excentricidad.

En un análisis más exhaustivo se puede observar que las mayores variaciones en los empujes al variar la excentricidad de la tolva en ambas linealizaciones del esfuerzo (LESF1 y LESF2) se localizan en el punto de unión silo-tolva y a lo largo de la pared de la tolva.

En la figura 7 se puede observar la variación de las presiones normales a la pared de la tolva, justo en el punto de unión silo-tolva en ambas linealizaciones del esfuerzo.

Como podemos observar en dicha figura, en LESF1 la presión disminuye de modo continuo al aumentar la excentricidad de la tolva, produciéndose los menores empujes para una excentricidad del 100%, encontrándose unas diferencias de empujes del 57,89 %, en comparación con la situación de tolva centrada (considerando tolva centrada el 100% del valor de la presión).

En LESF2 la presión normal a la pared aumenta al hacerlo la excentricidad de la tolva, dándose en este caso los
mayores empujes para una excentricidad del 100%, siendo éstos un 15,47% mayores que en tolva centrada
(considerando tolva centrada el 100% del valor de la
presión). Cabe matizar el hecho de que para una
excentricidad del 20 % la curva de los empujes sufre una
disminución con respecto a tolva centrada en lugar de
aumento; sin embargo, esta disminución para el caso
excentricidad del 20 % sólo se da en la unión silo-tolva,
puesto que a medida que empezamos a recorrer la tolva a
lo largo del LESF2 se corrige, mostrando la misma
tendencia de aumento de la presión normal al aumentar la
excentricidad (Ver figura 6).

En la tabla 2 se muestra la variación en la presión normal a la pared de la tolva en el punto de unión silo-tolva para las dos linealizaciones del esfuerzo en porcentaje. Se considera la presión en tolva centrada como el 100 %. El signo (+) indica que los empujes son mayores a los de tolva centrada en ese punto y el signo (-) significa que son menores.

Como podemos observar, la disminución de empujes que se produce del mismo lado del desplazamiento de la tolva no se ve compensada con el aumento que se produce del lado contrario, como podremos comprobar más adelante; ello es debido a la redistribución de empujes que se produce en el interior del silo, a medida que se descentra

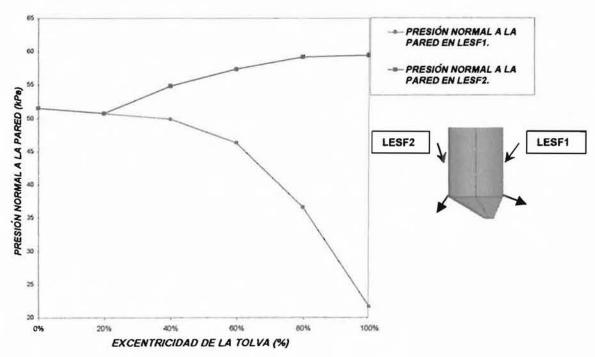


Figura 7.- Presión normal a la pared de la tolva en la unión silo-tolva para LESF1 y LESF2. Análisis de la variación de esfuerzos para distintas excentricidades.

TABLA 2

Variación en % de la presión normal a la pared de la tolva, en el punto de unión silo-tolva

EXCENTRICIDAD	0%	20%	40%	60%	80%	100%
LESF1	-0	-1,47	-2,91	-9,89	-28,89	-57,89
LESF2	0	-1,49	+6,58	+11,43	+14,98	+15,47

la tolva. Así, para excentricidades mayores del 60%, el máximo de empujes horizontales dejan de situarse en el punto de la unión silo-tolva perteneciente a LESF1, y pasa a situarse en los laterales de la unión silo tolva próximos a LESF1.

Además, la composición de presiones horizontales y verticales en la componente normal a la tolva se ve afectada por el ángulo que forma la generatriz del cono de la tolva en que se analiza el esfuerzo. Dicho ángulo varía con la excentricidad de la tolva.

En la figura 6 se observa que la presión normal a lo largo de la pared de la tolva disminuye en LESF1 a medida que aumenta la excentricidad, mientras que en LESF2 aumenta. Dicha disminución o aumento se conserva hasta la boca de salida; es por este hecho por el que, el análisis de la variación de los empujes en la boca de salida es indicativo de lo que ocurre en la pared de la tolva. En la figura 8 se muestran las curvas de la presión normal en la boca de salida para LESF1 Y LESF2 variando la excentricidad. En la tabla 3 se muestra el % de variación de los empujes en este punto con respecto a tolva centrada.

Las mayores presiones normales a la pared en la unión silo-tolva (ver figura 9), se sitúan en el cruce con LESF2, mientras que las menores, en el cruce con LESF1. Ello nos confirma que las dos linealizaciones verticales del esfuerzo (LESF1 y LESF2) se sitúan en la zona donde se producen los mayores y los menores empujes normales a la pared

Por otro lado, también se puede observar el fenómeno comentado anteriormente, según el cual, el aumento de presiones de un lado no se compensaba con la disminución del lado opuesto, hecho debido a la redistribución de presiones en el interior del silo a medida que se descentra la tolva; así, podemos ver cómo a partir de excentricidades del 60% aparecen unos lóbulos en las curvas, en los laterales de la unión silo-tolva próximos a LESF1.

Para cualquiera de las excentricidades analizadas, los empujes obtenidos mediante el Método de los Elementos Finitos, en estado estático, son menores que los propuestos por el Eurocódigo.

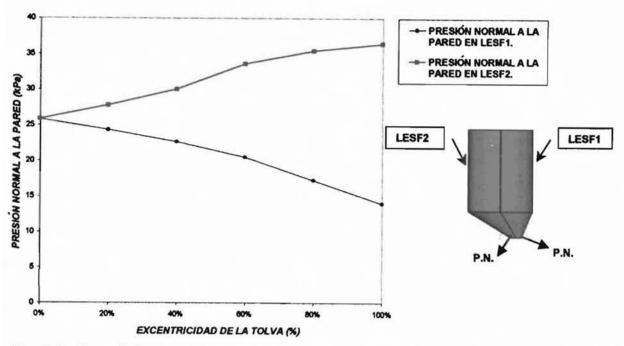


Figura 8.- Presión normal a la pared en la boca de salida para LESF1 y LESF2. Análisis de la variación de esfuerzos para distintas excentricidades.

TABLA 3

Variación en % de la presión normal a la pared de la tolva, en la boca de salida

EXCENTRICIDAD	0%	20%	40%	60%	80%	100%
LESF1	-0	-5,95	-12,31	-20,69	-33,35	-45,66
LESF2	0	+7,44	+15,97	+29,90	+36,93	+41,02

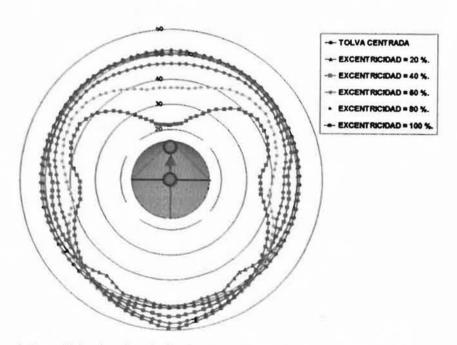


Figura 9.- Presión normal a la pared de la tolva en la unión silo-tolva (LESFUNION). Análisis de la variación de esfuerzos para distintas excentricidades.

En la figura 10 se muestra la distribución de presiones horizontales (P.H.) en una sección del silo producida por un plano definido por LESF1 y LESF2. En dicha figura se puede observar como las mayores presiones horizontales se producen en la unión silo-tolva, yendo en aumento hacia LESF1 a medida que aumenta la excentricidad de la tolva, hasta alcanzar una excentricidad del 60% en que comienzan a disminuir, hecho debido a la redistribución de presiones en el interior del silo, ya comentada.

Observando la distribución de presiones horizontales desde otra perspectiva (ver figura 11) puede verse como las mayores presiones horizontales se sitúan en la unión silotolva y sufren aumento hacia este punto de LESF1 a medida que aumenta la excentricidad, hasta que a partir de una excentricidad del 60% comienzan a distribuirse hacia los laterales de la unión silo-tolva próximos a LESF1, desplazándose del punto de LESF1 situado en la unión silo-tolva.

Este hecho está en concordancia con los lóbulos que aparecen en la figura 9 y explican el fenómeno de que el aumento de empujes del lado opuesto al desplazamiento de la boca de salida no se corresponda numéricamente con la disminución de presiones que se produce del lado opuesto.

Por otra parte, en la figura 12 se observa que la presión

vertical desciende en el punto de unión silo-tolva en ambas líneas de esfuerzo con respecto a tolva centrada, a medida que aumenta la excentricidad de la tolva, siendo el descenso en dicho punto más acusado en LESF1 que en LESF2.

Dicho descenso se compensa con el aumento que experimenta desde LESF2 hacia el interior del silo y hacia la parte inferior de la tolva (ver figura 13). En ella podemos ver como las máximas presiones verticales se van reordenando del lado de LESF2, al mismo tiempo que descienden por la pared de la tolva a medida que aumenta la excentricidad, mientras que en LESF1, van descendiendo en la unión silo-tolva de manera más acusada, al mismo tiempo que se va descargando la pared próxima a esta zona.

7. Conclusiones

De la influencia de la excentricidad de la tolva en los empujes podemos concluir, a modo general, según los expuesto anteriormente, que, según el Método de los Elementos Finitos:

. La excentricidad de la tolva no afecta a los empujes en la pared del cilindro hasta zonas próximas de la misma a la unión silo-tolva.

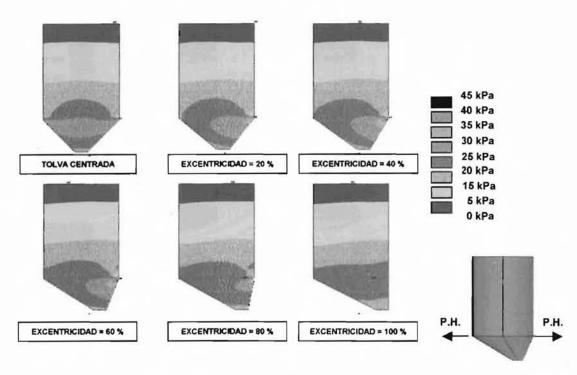


Figura 10.- Distribución de presiones horizontales en el interior del silo variando la excentricidad de la boca de salida.

- . Las variaciones en los empujes, a medida que la tolva se va descentrando, se producen ya desde las zonas próximas de la pared del cilindro a la unión silo-tolva y hasta la boca de salida (entre los 3,5 m de altura y la boca de salida con las dimensiones de silo consideradas).
- . El máximo de empujes normales a la pared del silo se sitúa en la unión silo-tolva, del lado contrario al del desplazamiento de la boca de salida, para cualquier excentricidad, aumentando en este punto a medida que aumenta la excentricidad de la tolva.

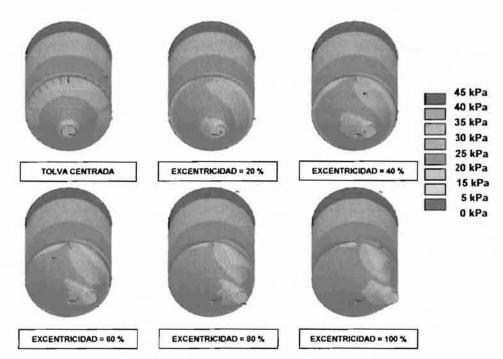


Figura 11.- Distribución de presiones horizontales en la tolva variando la excentricidad de la boca de salida.

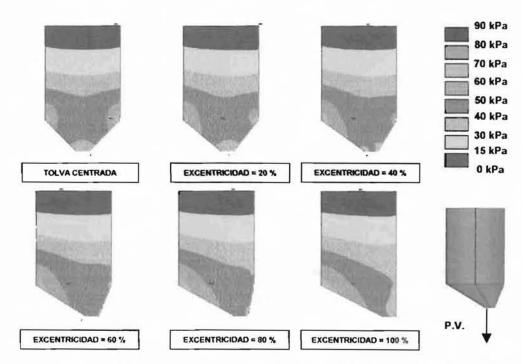


Figura 12.- Distribución de presiones verticales en el interior del silo variando la excentricidad de la boca de salida.

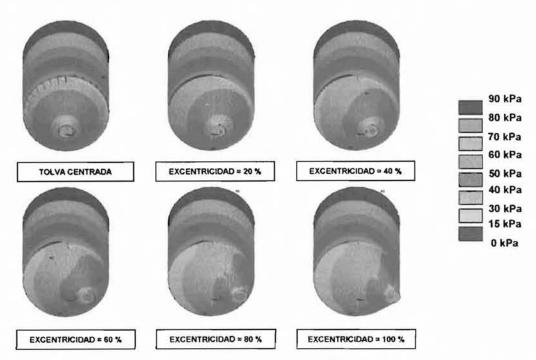


Figura 13.- Distribución de presiones verticales en la tolva variando la excentricidad de la boca de salida.

- . La disminución que se produce del mismo lado al del avance de la excentricidad de la salida de la tolva no se corresponde numéricamente con el aumento del lado opuesto, debido a la redistribución de presiones que se producen en el interior del silo.
- . La presión normal a la pared de la tolva, aumenta del lado opuesto al de desplazamiento de la boca de salida a medida que se descentra la misma, encontrándose las mayores diferencias para una excentricidad del 100%, las cuales alcanzan una variación, en comparación a cuando la tolva está centrada del 15,47 % en la unión silo-tolva y del 41,02 % en la boca de salida.
- . El aumento en los empujes, comentado en el punto anterior, se ve compensado con una disminución en el mismo lado que el avance de la tolva, encontrándose en esta zona los empujes menores para una excentricidad del 100%, los cuales difieren respecto a cuando la tolva está centrada en un 57,89 % en la unión silo tolva y un 45,66 % en la boca de salida.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) ACI313-91: "Recommended practice for design and construction of concrete bins, silos, and bunkers for storing granular materials".
- (2) AGUADO, P. (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.

- (3) ANSYS User's Manuals or Revision 5.3 (1998). Vol. I, II, III, IV and V. Swanson Analysis Systems, Inc. Houston (USA).
- (4) AYUGA, F. (1995): "Los Empujes del Material Almacenado en Silos". Informes de la Construcción. Vol. 46 Nº 436. marzo/abril 1995.
- (5) AYUGA, F.; GUAITA, M.; AGUADO, P. (2001): Static and Dynamic Silo Loads using Finite Element Models. Journal of Agricultural Engineering Research. Vol. 78, n° 3. Marzo 2001.
- (6) DIN 1055 part 6 (1987): Design loads for buildings. Loads in silo bins.
- (7) ENV 1991-4. Eurocode 1: Basis of design and actions on structures. Part 4: Actions on silos and tanks.
- (8) GUAITA, 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.
- (9) JANSSEN H. A. (1895): "Versuch über Getreidedruck in Sillozellen [Experiments on grain loads in silo cells]". Zeischrift des Verein Deutscher Ingenieure. 39, 1045-1049
- (10) JENIKE, A. W. y JOHANSON, J.R. (1977): "Construction of concrete silos", presented to Norwegian Society of Chartered Engineers.
- (11) SAFARIAN, SARGIS S. y HARRIS, E. C. (1985): "Design and construction of silos and bunkers." Ed Van nostrand reinhold company.
- (12) THEIMER, O. F. (1970): "Betrachtungen Über Druckverhaltnisse in Silozelen" Deutsche Müller-Zeitung, Helf 4. Enero 1970.