sobrepresiones en las paredes de los silos debidas al vaciado

JUAN RAVENET, Dr. ingeniero industrial

582 - 14

sinopsis

El autor analiza cronológicamente las teorías y experiencias emitidas por los principales especialistas mundiales en materia de silos.

Se estudian igualmente algunas de las más importantes Normas utilizadas en diversos países.

Se trazan las curvas de presiones de cada autor y Norma, aplicadas a una celda estándar.

En un gráfico se superponen todas las curvas obtenidas, apareciendo una dispersión del 215 %. Esta dispersión se debe a que muchos autores omiten los fenómenos dinámicos producidos durante el vaciado y que tantas grietas, deformaciones y accidentes han ocasionado.

INTRODUCCION

En este artículo se pretende hacer un estudio comparativo de las teorías de los más prestigiosos especialistas en materia de silos. En muchas ocasiones el desconocimiento, por parte del ingeniero que diseña una instalación para el almacenaje de cualquier producto granular, de las presiones reales que aparecen en un silo, conduce a un defectuoso cálculo de la obra y a serios problemas durante el funcionamiento. Por otro lado, la falta de literatura adecuada en materia de silos, y la aparición en libros de construcción de un capítulo dedicado al cálculo de silos, en el cual se transcribe la teoría clásica de presiones laterales del tipo exponencial, omitiéndose el apartado importantísimo de efectos dinámicos durante el vaciado.

En este estudio se considera un silo con una relación altura-lado o diámetro superior a 5 (silo alto). Se considera que la boca de salida

está centrada (en caso de vaciado excéntrico el problema se complica aún más debido a la disimetría del vaciado). Por último, se considera el almacenaje de productos granulares sin cohesión (el almacenaje de productos cohesivos implica otros problemas de diseño de tolvas y extractores para evitar la interrupción del flujo de vaciado y en los cuales no vamos a profundizar).

PRESIONES HIDROSTATICAS

A mediados del siglo pasado se inició la construcción masiva de grandes silos para el almacenaje de cereales; fundamentalmente su construcción era de hormigón armado, metálicos o de madera, y para el cálculo de las presiones sobre las paredes se consideraban presiones hidrostáticas. Es decir, que tanto la presión lateral como la presión sobre el fondo venía dada por la fórmula:

$$P_h = h \cdot \gamma \quad [1]$$

Siendo:

P_h = Presión a una profundidad determinada (en kp/m^2).

h = Altura desde el borde superior de la celda a la sección considerada (en m).

γ = Densidad del producto almacenado (en kg/m^3).

Roberts, I ⁽¹⁾, en el año 1881, realiza los primeros ensayos en maquetas a escala reducida para determinar las presiones laterales y sobre el fondo, y llega a la conclusión de que estas presiones no siguen una ley hidrostática sino exponencial.

Comprueba que existe un rozamiento interno entre granos y un coeficiente de rozamiento grano-pared, de lo que se deduce que parte del peso del grano almacenado es absorbido por las paredes por rozamiento, quedando el fondo con una presión inferior a $h \cdot \gamma$.

Comprueba también que la velocidad de salida es prácticamente constante durante todo el vaciado e independiente de la altura de cabeza.

CURVAS DE PRESIONES LATERALES DEL TIPO EXPONENCIAL

Janssen ⁽²⁾, en el año 1895, establece por vez primera la fórmula para el cálculo de presiones en un silo, al considerar el equilibrio de fuerzas en una rebanada elemental de masa ensilada.

En la figura 1 puede verse el equilibrio de fuerzas a partir de las cuales se obtienen las presiones verticales:

$$P_v = \frac{w \cdot R}{\mu' \cdot k} (1 - e^{-(\mu' \cdot k/R) \cdot h}) \quad [2]$$

Siendo:

P_v = Presión vertical (en kp/m^2).

w = Densidad (en kg/m^3).

R = Radio hidráulico medio de la celda (en m).

μ' = Tangente del ángulo de rozamiento grano-pared.

h = Altura desde el borde superior de la celda a la sección considerada (en m).

Para la obtención de las presiones laterales se aplica la siguiente fórmula:

$$k = \frac{\text{Presiones horizontales}}{\text{Presiones verticales}} = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad [3]$$

ϕ = Ángulo de rozamiento interno del grano.

k se ha obtenido experimentalmente, siendo su valor igual a 0,60 y numéricamente por aplicación de la fórmula [3], dando un valor de 0,36.

La presión lateral tiene como valor:

$$P_h = k \cdot P_v = \frac{w \cdot R}{\mu'} (1 - e^{-(\mu' \cdot k/R) \cdot h}) \quad [4]$$

TEORIA ESTATICA DE JANSSEN. PRESIONES ACTIVAS

$$P_v = \frac{wR}{\mu' k} (1 - e^{-\frac{\mu' k}{R} h})$$

$$P_h = k P_v = \frac{wR}{\mu'} (1 - e^{-\frac{\mu' k}{R} h})$$

$$k = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = 0,36.$$

Experimentalmente, $k = 0,6$.

Equilibrio de fuerzas según la teoría de Janssen.

Fig. 1

En la celda estándar (fig. 20) se ha representado esta curva con el número 4.

Janssen ha considerado el equilibrio de una masa en reposo; por tanto, la teoría es válida durante el llenado, pero no durante el proceso de vaciado, ya que se rompe este equilibrio y se pasa a un estado plástico. Por otro lado, el factor k —relación entre presiones horizontales y verticales— no queda perfectamente definido, ya que varía entre muy amplios valores.

Airy ⁽³⁾ en Inglaterra y en el año 1897, basándose en la teoría del empuje de tierras y teniendo en cuenta el equilibrio de fuerzas en el plano de deslizamiento (fig. 2), determina las presiones laterales en función de tres valores:

w = Densidad.

μ = Tangente del ángulo de rozamiento interno del grano.

μ' = Tangente del ángulo de rozamiento grano-pared.

Con este procedimiento salva el tener que definir el factor k .

Es el primer autor que define dos grandes grupos de celdas o silos:

- Celdas bajas.* El plano de deslizamiento corta a la superficie libre del cereal antes que a la pared opuesta.
- Celdas altas.* El plano de deslizamiento corta a la pared opuesta de la celda.

Este es el caso que nos ocupa y la presión lateral tiene como valor:

$$P = \frac{w \cdot b}{2} \cdot (2h - b \cdot \operatorname{tg} \theta) \frac{\operatorname{tg} \theta - \mu}{1 - \mu \cdot \mu' + (\mu + \mu') \cdot \operatorname{tg} \theta};$$

Siendo:

$$\operatorname{tg} \theta = \sqrt{\frac{2h}{b} \cdot \frac{1 + \mu'^2}{\mu + \mu'} + \frac{1 + \mu^2}{\mu + \mu'} \cdot \frac{1 - \mu' \cdot \mu}{\mu + \mu'} - \frac{1 - \mu' \cdot \mu}{\mu + \mu'}}$$

Airy no realiza ensayos experimentales para comprobar su teoría. En la celda estándar (fig. 20) se ha representado esta curva con el número 11.

Estos dos autores, Janssen y Airy, inspiran sus teorías en las teorías del Empuje de tierras de Coulomb y Rankine. Sabemos que el valor de

$$k = \frac{1 - \operatorname{sen} \phi}{1 + \operatorname{sen} \phi}$$

Teoría de Airy basada en el plano de deslizamiento.

Fig. 2

da origen a presiones activas o de llenado; durante el vaciado las presiones pasan al estado pasivo y el coeficiente k vale:

$$k = \frac{1 + \operatorname{sen} \phi}{1 - \operatorname{sen} \phi}$$

La aplicación de estas fórmulas da origen a la curva 13 de la figura 20 y por aplicación de las fórmulas del Empuje de tierras.

TEORIA DE REIMBERT ⁽⁴⁾

En el año 1941 realiza ensayos en maquetas a escala reducida para determinar las presiones laterales que aparecen en las celdas durante el llenado y el vaciado.

Contrariamente a la teoría de Janssen, demostró:

- 1) Que la relación entre presiones horizontales y presiones sobre el fondo no es constante, sino que varía con la altura del material ensilado y la forma del silo.
- 2) Que en un silo rectangular las presiones laterales no son las mismas sobre la pared larga que sobre la pared corta.

Presiones laterales sobre las paredes.
Ensayo efectuado en el silo de Chateau-London.
 P_{11} = Presiones de llenado; P_v = Presiones de vaciado.

Presiones laterales sobre las paredes.
Ensayo efectuado en el silo de Chateau-London para mayor caudal de salida.
 P_{11} = Presiones de llenado; P_v = Presiones de vaciado.

Curvas de llenado y vaciado, obtenidas en silos reales mediante el empleo de galgas extensométricas.

Fig. 3

En el año 1953 efectúa ensayos con galgas extensométricas, en dos silos metálicos reales, donde habían aparecido deformaciones. Los valores de sobrepresión obtenidos fueron de 1,76 y 2,39 (fig. 3). Reimbert coloca en el interior de la celda un tubo perforado, denominado columna de vaciado estático y que ya era utilizado por los ingleses a principios de siglo. Mediante este dispositivo se evitan los fenómenos dinámicos, ya que toda la masa vacía por la parte alta del tubo, permaneciendo el resto de masa ensilada, en reposo, y por tanto en equilibrio de acuerdo con la teoría de Janssen.

En la figura 20 vemos esta curva representada con el número 1.

TEORIA DE JENIKE ⁽⁵⁾

Lleva a cabo estudios sobre el comportamiento de productos granulares en la Universidad de Utah, Salt Lake City. Inicián-

dolos en el año 1954. Jenike distingue, fundamentalmente, dos tipos de flujo (fig. 4):

- 1) *Flujo másico*. Al abrirse la boca de salida, toda la masa se pone en movimiento.

Fig. 4

- 2) *Flujo de embudo.* Al abrirse la boca de salida, se forma un conducto central por donde el material almacenado va fluendo. El resto de la masa permanece en reposo.

Según Jenike, los fenómenos que se producen en un silo son:

- Durante el llenado aparecen las presiones activas. La masa alcanza un estado elástico-activo. Figura 5, las presiones siguen la curva de Janssen.
- Durante el vaciado aparecen las presiones pasivas. La masa alcanza un estado plástico-pasivo. Figura 6, las presiones se supone son del tipo del empuje pasivo de Rankine, aumentando rápidamente hasta un cierto valor, para luego permanecer constantes.
- Onda de sobrepresión.* Al abrirse la boca de salida, la parte inferior de la celda pasa del estado activo al pasivo (fig. 7). Existe una onda de transición (la rayada), cuyo volumen no pertenece ni al estado activo ni al pasivo. La diferencia entre las presiones activas y las pasivas [área inferior rayada, figura 7, posición (b)] es igual al volumen del grano en transición. Para que exista equilibrio esta fuerza se ha de aplicar en algún sitio, y éste es en la zona donde la onda expansiva toca a las paredes de las celdas. En dicho punto aparecen dos presiones: una normal y de valor el área rayada de las curvas de presiones activa y pasiva y una fuerza de rozamiento de valor $P \cdot \tan \theta$. La fuerza P se desplaza hacia arriba alcanzando el valor máximo en el cuerpo de la celda, para luego decrecer a cero.

La fuerza P desarrollada depende del tamaño de la celda, la compresibilidad del sólido y el caudal de extracción. Una onda puede durar desde una fracción de segundo hasta valores mayores. Cuando es muy rápida, es peligrosa, ya que puede llevar una componente dinámica. La onda puede alcanzar un valor de 50 veces mayor a la presión de llenado calculada y esto suceder en una banda muy estrecha.

Para sólidos muy duros como rocas, la banda de sobrepresiones es tan estrecha que, a veces, no es detectada ni con la colocación de galgas extensométricas. Para sólidos relativamente blandos y elásticos no son posibles estos valores.

El flujo másico es el que más posibilidades tiene de que se produzca la onda de sobrepresión. En el caso de flujo de embudo, si el cono de vaciado no toca a la pared, las presiones puntuales no actúan sobre la pa-

Teoría de Jenike.
 P_a = Cargas iniciales, presiones activas.

Presiones activas o de llenado.

Fig. 5

Teoría de Jenike.
 P_p = Presiones pasivas, cargas de flujo.

Presiones pasivas o de vaciado.

Fig. 6

red, sino sobre la masa de grano en reposo, de tal manera que las presiones transmitidas a la pared serán uniformemente repartidas y amortiguadas. En la figura 20 se ha representado la curva de Jenike con el número 14.

Presiones activas y pasivas. Onda de sobrepresiones.

Fig. 7

TEORIA DE WALKER ⁽⁶⁾

En el año 1965 y en Inglaterra desarrolla su teoría sobre el flujo de materiales en tolvas. Son tenidas en cuenta las fuerzas que actúan sobre una rebanada elemental, que es simultáneamente elástica dentro de ella misma y a lo largo de las paredes de las tolvas.

Durante el llenado se aplican presiones de acuerdo con la teoría de Janssen; pero durante el vaciado, en vez de aplicar la teoría clásica de Coulomb y Rankine del Empuje de tierras, se aplica un factor relación entre presiones horizontales y verticales igual a:

$$k = \frac{1 - \sin^2 \delta}{1 + \sin^2 \delta} ; \text{ en vez de: } k = \frac{1 - \sin \delta}{1 + \sin \delta}$$

Siendo δ = Angulo de rozamiento interno del producto almacenado.

En la figura 20 se ha representado la curva de Walker con el número 15.

SAFARIAN ⁽⁷⁾

Especialista y responsable del proyecto estructural de muchas instalaciones para el almacenaje de cereales, determina que existe un creciente interés, por parte de los ingenieros en todo el mundo, en conocer las causas de las fallas estructurales de la mayoría

de silos que han sufrido deformaciones y grietas. Los resultados de los estudios indican claramente los fallos de la teoría clásica de Janssen, que aún se aplica con proliferación en los Estados Unidos. Las presiones calculadas para el material en reposo tienen que ser correlativamente aumentadas para el material en movimiento.

Safarian distingue las presiones según el tipo de celda (cilíndrica, cuadrada, poligonal) y según su situación (celdas interiores, exteriores) y en función de la relación altura-lado.

Safarian, mediante la colocación de un coeficiente mayorante, generaliza las fórmulas y teorías de Janssen y Reimbert (fig. 20, números 5 y 2, respectivamente).

HANDLEY Y PERRY ⁽⁸⁾

Han llevado a cabo experiencias en maquetas rectangulares, de lados $28,4 \times 20,8$ cm. Se ha supuesto una altura de sólido ensilado en la celda de 55 cm: 30 cm corresponden a la tolva y 25 cm a la parte recta de la celda.

Handley y Perry introducen en la celda una pildora radiosensitiva que mide presiones verticales; su peso específico es muy parecido a la del cereal a almacenar, así como sus dimensiones de 2,5 cm de longitud. La ventaja de la pildora es que se mueve inmersa en el flujo del material almacenado du-

rante el vaciado. Tal como puede verse en la figura 8, se colocó la pildora: en un primer ensayo, en el centro de la celda; en un segundo ensayo, en una posición intermedia entre el centro y la pared; y en un tercer ensayo, junto a la pared de la celda. En cada ensayo se efectuó el vaciado y se midieron las presiones sobre el fondo. En las figuras 9, 10 y 11 pueden verse los resultados de las mediciones correspondientes a las posiciones A, B y C. Indiscutiblemente, la tolva, en su transición con la celda, tiene un efecto decisivo sobre las presiones. Conocidas las presiones verticales, se pueden determinar las horizontales, considerando la relación entre presiones verticales y horizontales, variable entre 0,3 y 0,6; así como la relación de densidades entre productos utilizados y la relación entre radios hidráulicos de las maquetas utilizadas.

Las presiones horizontales para la maqueta estándar considerada pueden verse en la figura 12, que corresponde a la curva 17 de la figura 20.

Celda experimental utilizada por Handley y Perry. Diversas posiciones de la pildora sensitiva en el interior de la celda.

Fig. 8

Presiones verticales, en kp/m^2 .

POSICION A

Presiones sobre el fondo. Pildora radiosensitiva colocada en la posición A.

Fig. 9

Presiones verticales, en kp/m^2 .

POSICION B

Presiones sobre el fondo. Pildora radiosensitiva colocada en la posición B.

Fig. 10

Presiones verticales, en kp/m^2 .

POSICION C

Presiones sobre el fondo. Pildora radiosensitiva colocada en la posición C.

Fig. 11

Presiones horizontales máxima y mínima obtenidas para (0,6 y 0,3) a partir de las presiones verticales (posición C).

Presiones horizontales máxima y mínima obtenidas a partir de las presiones verticales, posición C.

Fig. 12

CALCULO DE PRESIONES LATERALES POR CONSIDERACION DE LOS VALORES MAXIMO Y MINIMO

Ingenieros del Ministerio de Agricultura francés han realizado ensayos para determinar valores máximos y mínimos de las propiedades fundamentales para la determinación de presiones tales como:

- *Peso específico.* De acuerdo con la forma de la celda, caudal de llenado y altura de caída, se determinaron los valores máximo y mínimo.
- *Angulo de rozamiento interno.* Se determinó la variación de este ángulo en función del esfuerzo normal y en una celda especialmente diseñada y denominada de cizallamiento.
- *Angulo de rozamiento grano-pared.* Se determinó la variación de este valor en función de los diversos tipos de paredes: lisas, rugosas, hormigón armado, chapa metálica, madera.

Tomando los valores máximos, y por aplicación de la fórmula clásica de Janssen, se obtuvieron presiones laterales máxima-máximum; igualmente tomando los valores mínimos, se obtuvieron presiones laterales mínima-minimórum.

Estos valores corresponden a las curvas 18_M y 18_m de la figura 20.

NORMAS DE DIVERSOS PAISES

1) Normas Alemanas DIN 1 055.

Hoja 6 ⁽⁹⁾

Como consecuencia de una serie de averías y accidentes acaecidos en grandes silos construidos en Alemania, se encarga a ingenieros la redacción de una nueva Norma para el cálculo de silos. Las presiones se determinan en función del radio hidráulico y el ángulo de rozamiento interno del grano. No interviene el coeficiente de rozamiento grano-pared.

Las presiones de llenado están inspiradas en la teoría de Janssen. Para la determinación de las presiones de vaciado se aplica un valor del ángulo de rozamiento grano-pared del orden del 75 % del ángulo de rozamiento interno del grano. El coeficiente de sobrepresión calculado resulta ser del orden del 40 %. No obstante, hay una reducción de presiones en la parte inferior de la celda y debida al efecto tolva.

Se distinguen tres tipos de productos en función de la granulometría. Los conocimientos actuales son ciertamente deficientes y requieren amplios estudios posteriores. Ahí donde las condiciones reales no estén suficientemente conocidas, deberán ser tomadas en consideración Normas de seguridad.

Estas Normas están especialmente estudiadas para silos de hormigón y ensilado de cereales; no es válida para el ensilado de harinas.

Las presiones de llenado y vaciado han sido representadas en la figura 20 con las curvas 3_{11} y 3_v .

2) Norma Oficial Russian Standard ⁽¹⁰⁾

Esta Norma, basada en la teoría de Janssen, modificada mediante la colocación en diversas zonas del silo de coeficientes mayorantes. En la figura 13 puede verse que se ha aplicado un coeficiente mayorante de 2 en la zona II, que corresponde a la mitad del silo, y comprendido entre las cotas $+0,15 H$ y $+0,65 H$, contadas a partir de la parte inferior de la celda.

En la figura 20 la curva 6 corresponde a esta Norma.

3) Norma Russian CNIPS Standard ⁽¹⁰⁾

Esta Norma, basada igualmente en la teoría de Janssen, sufre la variación de presiones por aplicación de coeficientes mayorantes

variables. En la figura 14 puede verse que se ha aplicado un coeficiente mayorante de 1,5 en la zona II comprendida entre las cotas $+0,30 H$ y $+0,70 H$, contadas a partir de la coronación del silo.

En la zona III aplica un coeficiente mayorante de 2 y queda comprendida entre las cotas $+0,70 H$ y $+0,88 H$, contados a partir de la coronación del silo. Existe una zona V que corresponde a la tolva. Se aplica un coeficiente mayorante de 1,5.

En la figura 20 la curva 8 corresponde a esta Norma.

4) South African CSIR Standard ⁽¹⁰⁾

Basada igualmente en la teoría de Janssen. El silo se divide en cuatro zonas (fig. 15). La zona I comprende una altura de $0,35 H$, a partir de la coronación del silo. Se aplica un coeficiente mayorante de 1,25.

La zona II comprende una altura de $0,50 H$ entre las cotas $+0,35 H$ y $+0,85 H$. Coeficiente mayorante igual a 2.

La zona III comprende la parte $0,15 H$ inferior del silo. El coeficiente mayorante que se aplica es de 1,25.

La zona IV corresponde a la tolva y se aplica un coeficiente mayorante de 1,5. En la figura 20 la curva 7 corresponde con esta Norma.

FORMULA DE PLATONOV ⁽¹¹⁾

Se parte asimismo de la curva de Janssen. En este caso (fig. 16) se van aplicando a diversas profundidades coeficientes mayorantes que varían desde 1,89 en la parte superior hasta 2,16 en las proximidades de la unión tolva-silo. A partir de este punto el coeficiente de sobrepresión empieza a disminuir, y en la transición con la tolva es inferior a la unidad. A continuación vuelve a aumentar hasta alcanzar el valor de 1,80 junto a la boca de salida.

En la figura 20 la curva 9 corresponde a la fórmula de Platonov.

FORMULA DE NAKONZ ⁽¹⁰⁾

Basada, como todas ellas, en la curva de Janssen. Se aplican coeficientes mayorantes que son muy reducidos, tal como puede verse en la figura 17.

En la parte alta del silo se prevé un coeficiente de sobrepresión de 1,58.

Norma Oficial Russian Standard.

Fig. 13

Norma Russian CNIPS Standard.

Fig. 14

South African CSIR Standard.

Fig. 15

Fórmula de Platonov.

Fig. 16

Fórmula de Nakonz.

Fig. 17

En la parte baja del silo este coeficiente disminuye muy rápidamente, para confundirse prácticamente con la curva de Janssen en el tercio inferior.

En la figura 20 la curva 10 corresponde a la fórmula de Nakonz.

PRESIONES PRODUCIDAS EN CELDAS CON COLUMNAS DE DEPRESION (4 y 12)

Uno de los dispositivos que con más éxito se ha utilizado para evitar sobrepresiones de vaciado, es la columna de vaciado estático, o columna de depresión. Este dispositivo ya se empleó en las primeras instalaciones que se realizaron en Inglaterra a principios de siglo.

El sistema consiste en colocar en el interior de la celda o silo un tubo perforado, tal como puede verse en la figura 18, que produce un vaciado superior de la celda, permaneciendo el resto de la masa inmóvil y, por tanto, sin sobrepresiones.

En la figura 19 puede verse cómo el primer cereal, que vacía, lo hace a través de los planos AB y CD y por los agujeros B y C. Cuando ya no queda nada de cereal en esta zona, se inicia el vaciado de las zonas ABGH y DCFE y a través de los orificios F y G.

De esta forma se consigue que toda la masa ensilada permanezca en reposo, produciéndose el vaciado por la parte alta de la celda.

No obstante, hay que tener mucho cuidado con este dispositivo, ya que, si no está bien dimensionado, la masa pasará del estado estático al dinámico y aparecerán las sobrepresiones de vaciado.

RESUMEN DE LAS TEORIAS ESTUDIADAS

En la figura 20 se ha recogido el resumen de todas las teorías emitidas por los más importantes especialistas mundiales. La dispersión de los resultados es del 240 % y debida, fundamentalmente, al desconocimiento de

Celda dotada de columnas de depresión.

Fig. 18

Celda dotada de columnas de depresión. Vaciado ordenado y sin sobrepresiones.

Fig. 19

Presiones horizontales obtenidas en una maqueta $30 \times 30 \times 198$ cm. Tolva de 45° de pendiente y vaciado centrado. Relación altura lado igual a 7.

1. Teoría de Reimbert paredes lisas.—2. Teoría de Reimbert generalizada, según Sargis S. Safarian.—3. Norma alemana DIN 1 055. Presiones de llenado.—3_M. Norma alemana DIN 1 055. Presiones de vaciado.
4. Fórmula de Janssen.—5. Fórmula de Janssen generalizada, según Sargis S. Safarian.—6. Oficial Russian Standard.—7. South African CSIR Standard.—8. Russian CNIPS Standard.—9. Fórmula de Platonov.—10. Fórmula de Nakonz.—11. Fórmula de Airy.—12. Presiones hidrostáticas.—13. Fórmulas del Empuje de tierras de Coulomb y Rankine.—14. Teoría de Jenike.—15. Fórmula de Walker.—16. Presiones producidas en celdas con columnas de depresión.—17. Fórmula de Handley y Perry.—18_M. Presiones laterales, valores máximos.—18_m. Presiones laterales, valores mínimos.

Confrontación de los resultados experimentales con las curvas teóricas.

Fig. 20

las sobrepresiones de vaciado, que aparecen en el momento de abrirse la boca de salida y producidas por la rotura del equilibrio estático de la masa.

Un desconocimiento del movimiento de la masa en el interior del silo, es la causa de

la omisión de los coeficientes de sobrepresión. Esta dispersión en los resultados trae, como consecuencia, una serie de deformaciones, grietas e incluso hundimientos ocurridos en grandes silos para el almacenaje de cereales. Las figuras 21 y 22 son dos claros

Deformaciones en celdas metálicas producidas por sobrepresiones durante el vaciado.

Fig. 21

ejemplos de deformaciones ocurridas en silos metálicos, por no ser tenidos en cuenta los valores de las sobrepresiones de vaciado.

ENSAYOS EFECTUADOS POR EL AUTOR ^(12, 13 y 14)

El autor del presente artículo ha realizado una serie de fotografías en maquetas de caras transparentes para determinar el flujo de vaciado de los productos granulares, en el interior de los silos. Mediante el estudio de las secuencias de las fotografías de vaciado se pueden predecir las presiones que aparecerán en las paredes.

Para completar el estudio se han llevado a cabo ensayos experimentales en una maqueta con placas de plexiglás, donde se han colocado galgas extensométricas que nos permiten medir microdeformaciones y, por tanto, conocer las presiones laterales durante el llenado y vaciado. En la figura 20 se han superpuesto las curvas experimentales de llenado y vaciado para la celda estándar y se han representado por P_{11} y P_v , respectivamente.

Las curvas experimentales presentan sus valores máximos en las partes bajas de las celdas, con coeficientes de sobrepresión de hasta 1,75 y que están de acuerdo, cualitativamente, con las presiones obtenidas por especialistas como: Platonov, Geniev, Kovtun, Kim, Tahktamishev, Safarian, Jenike, y en

Deformaciones en silos metálicos cilíndricos debidas a sobrepresiones de vaciado.

Fig. 22

total desacuerdo con especialistas como: Janssen, Airy, Reimbert, Normas Alemanas DIN 1 055, etc.

CONCLUSIONES

Las normas a tener en cuenta para efectuar el diseño y cálculo de un silo son las siguientes:

- Determinar el tipo de material a ensilar, con el conocimiento de los ángulos de rozamiento interno, del cereal con las paredes del silo, y de la densidad.
- La relación altura, lado o diámetro del silo a diseñar es muy importante, ya que de ella depende el que las presiones aparezcan en la parte alta o baja de la celda.
- Conocer exactamente el tipo de vaciado. Es muy importante que la boca de salida se encuentre centrada. En el caso de necesitarse un vaciado excéntrico hay que prestar mucha atención a las presiones disimétricas que aparecerán a lo largo de una sección en planta del silo, situada encima de la boca de salida.
- Cuando el producto a ensilar es cohesivo, se plantea un nuevo problema: La aparición de bóvedas con interrupciones continuas de flujo, y que obliga a diseñar la dimensión óptima de la boca de salida, así como la adecuada pendiente de las paredes de la tolva. Por otro lado, se han de tener en cuenta las sobrepresiones que aparecen sobre el fondo y sobre las paredes debidas a la caída de bóvedas.
- Según la teoría aplicada, se han de tener en cuenta coeficientes mayorantes que cubran las sobrepresiones de vaciado.

BIBLIOGRAFIA

1. ROBERTS, I.: «Determination of the vertical and lateral pressures of granular substances». *Proceedings Royal Society*. London, V. 36, año 1884, pp. 225-240.
2. JANSSEN: «Experiments on grain pressures in Silos». *Verein Deutscher Ingenieure zeitschrift*. V. 39, año 1895, pp. 1045-1049.
3. AIRY: «The pressure of grain. Minutes of Proceedings». *Institution of Civil Engineers*. London, V. 131, año 1897, pp. 347-358.
4. REIMBERT: *Silos. Traité Theorique et Pratique*. Editions Eyrolles. Paris, año 1956.
5. JENIKE: «Bins Load». *Jour. of the struc. div. ASCE*. Año 1968, ST4, pp. 1011-1039.
6. WALKER: «An approximate theory for pressures and arching in hoppers». *Chemical Engineering. Science*. Año 1966, V. 21, pp. 975-997.
7. SAFARIAN: «Desing Pressure of Granular Materials in Silos». *ACI*, V. 66, N° 8, año 1969, pp. 647-655.
8. HANDLEY Y PERRY: «Stresses in granular materials flowing in converging hoppers sections». *Powder Technology*, V. 1, N° 5, February, año 1968, pp. 245-251.
9. NORMA ALEMANA DIN 1055: Hoja 6.
10. THEIMER: «Failures of reinforced concrete grain silos». *Journal of Engineering for Industry*. Transaction ASME. Año 1969, May, pp. 460-477.
11. TURITZIN: «Dynamic pressure of granular material in deep bins». *Proceedings ASME*. V. 89, ST2, April 1963, pp. 49-73.
12. RAVENET: *Sobrepresiones en las paredes de los silos debidas al vaciado y efectos producidos por efecto de la tolva y excentricidad del vaciado*. Tesis doctoral, mayo 1974. ETSIIB. Universidad Politécnica de Barcelona.
13. RAVENET: *Silos metálicos de gran capacidad para el almacenaje de cereales. Manutención y Almacenaje*. Noviembre 1974, pp. 33-41.
14. RAVENET: «Presiones en las paredes de los silos». *Revista DYNA*. Asociación Nacional de Ingenieros Industriales. Año XLIX, diciembre 1974, pp. 537-545.

résumé

Surpressions aux parois des silos dues au vidage

Juan Ravenet, Dr. ingénieur industriel

L'auteur analyse chronologiquement les théories et les expériences émises par les principaux spécialistes mondiaux en matière de silos.

Il étudie également quelques-unes des plus importantes normes, utilisées en divers pays, et trace les courbes de pressions de chaque auteur et norme, appliquées à une cellule standard.

Toutes les courbes obtenues se superposent sur un graphique, où il apparaît une dispersion de 215 %. Cette dispersion est due au fait que bon nombre d'auteurs font abstraction des phénomènes dynamiques produits lors du vidage et qui ont été la cause d'un grand nombre de fissures, de déformations et d'accidents.

summary

Pressures in the silo walls due to the outlet

Juan Ravenet, Dr. Ind. Eng.

Chronologically the author analyzes the theories and experiences published by the main world specialists on the subject of silos.

Further, some of the most important Norms used in various countries are being studied. The compression curves by each author and Norm are drawn, applied to a standard cell.

In a diagram all the curves are superimposed and a dispersion of 215 % is obtained. This dispersion is due to the fact that many authors leave out the dynamic phenomena produced during the outlet and which have caused so many cracks, deformations and irregularities.

zusammenfassung

Druck in Silowänden auf Grund der Entleerung

Juan Ravenet, Dr. Ing. Ind.

Chronologisch analysiert der Verfasser die von den Hauptspezialisten der Welt veröffentlichten Theorien und Erfahrungen in Bezug auf Silos.

Ebenfalls werden auch einige der bedeutendsten, in verschiedenen Ländern gebräuchten Normen studiert.

Es werden die an eine Standardzelle verwendeten Drucklinien jeden Verfassers und jeder Norm angerissen.

In einem Diagramm werden alle erhaltenen Linien übereinander gelegt und weisen dabei eine Streuung von 215 % auf. Diese Streuung entsteht dadurch, dass viele Verfasser die dynamischen Phänomene, die während der Entleerung entstanden sind und die so viele Risse, Verformungen und Unebenheiten verursachen, auslassen.