

SILOS: NO LES FALTEMOS EL RESPETO

¿Por qué colapsan los silos de granos? (Parte 1)

por Roberto Hajnal, director de Hajnal y Cia SA y miembro CD de APOSGRAN



El diseño de un silo requiere un profundo conocimiento especializado.

La construcción e implementación de una planta de silos es una tarea que abarca varias disciplinas: esencialmente hay una parte que corresponde a la ingeniería electromecánica y otra que corresponde a la construcción donde, los esfuerzos provocados por el material ensilado influyen en la ingeniería civil. Este es el objeto de este artículo y de otros sucesivos sobre este tema.

Los silos poseen un alto índice de colapso estructural, los accidentes son recurrentes en todas partes del mundo y muy actuales. Veamos referencias muy recientes.



Los silos son las estructuras más peligrosas de la ingeniería civil

Son más peligrosas que la construcción de un edificio o hasta un puente. ¿Porqué? En la ingeniería civil, lo controversial y difícil es calcular con precisión las sobrecargas de una estructura. Mas allá de los efectos atmosféricos locales (viento o temporales o sismos), común a todas las construcciones, el cálculo de una estructura se basa en el peso de la estructura y las cargas de uso, que básicamente son su **peso propio y la sobrecarga**, (que tiene que ver con su uso).

En un edificio habitacional, la carga más importante es el peso propio, representa el 90%, y la sobrecarga está definida por normas, según el uso del local (250kg/m²-300Kg/m²).

La sobrecarga es muy baja respecto del peso propio, quizás un 10%. En un edificio industrial, lo mismo, solo que la sobrecarga será más importante, (1.000Kg/m² - 3.000Kg/m²), quizás representa un 20% de la carga del edificio.

En un puente el peso propio es muy preponderante y la sobrecarga: el paso de un tren o vehículos puede tener una relación de 90%/10% (peso propio/sobrecarga) o menos, depende del vano libre del puente y también si es de hormigón o metálico.

El peso propio, en todos los casos, es muy fácil de calcular y puede hacerse con tanta precisión que hasta se podría definir con decimales. En cambio, la incertidumbre siempre está en el cálculo de las sobrecargas, nunca en el peso propio. En las obras de arquitectura, como en casi todas las obras de ingeniería, como un puente, las sobrecargas de cálculo son muy exageradas, con una hipótesis de recurrencia tan eventual, que, casi se podría afirmar, que nunca van a ocurrir.

Los 250 kg/m² de sobrecarga de cálculo de un edificio convencional, pensemos en nuestra propia casa, ¿cuándo y dónde tendremos 250Kg sobre el piso? ¿Y cuántos metros cuadrados puede llegar a ocupar esa carga? Nunca estará sobre toda la superficie de la losa, quizás en una muy pequeña fracción.



Colapso silo de 15.000 tons (MT), 07/2021



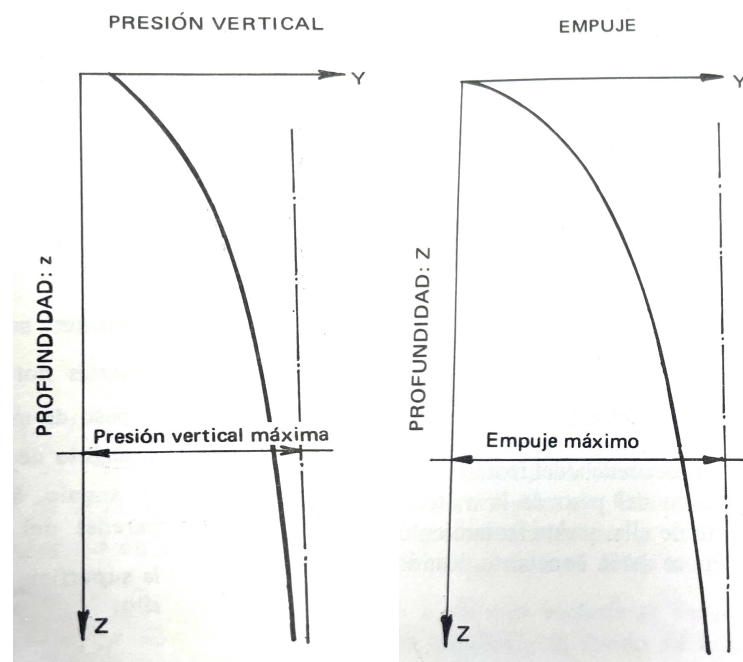
México-Puerto de Veracruz, 3 muertos, 10/2017

Por extraño que parezca, existen más razones para el colapso de un silo de granos que para el colapso de un puente. Es que, **en un silo, la sobrecarga es la carga de uso**, no es una carga eventual, es una carga real que siempre estará presente y actuando sobre la estructura. Aquí, **en los silos, la relación es totalmente inversa**. La carga de uso (sobrecarga), en silos metálicos puede ser más del 95% y el peso propio sólo un 5% o menos. Por ejemplo, un silo metálico de 5.000 tons. pesa, sin fundaciones, algo menos de 50 tons, o sea, en este caso, el peso propio es aprox. 1% y la sobrecarga 99% (relación 1/99). En silos de hormigón el peso propio es aprox. 10% con una sobrecarga de 90%.

El agravante es que **en los silos la sobrecarga o carga de uso es dinámica, se mueve**, con diferentes configuraciones del flujo en función de la geometría del silo, de las características del producto y del tipo de salida que tiene, generando distintas sobrepresiones.

El problema es muy complejo y difícil de cuantificar. La determinación de los esfuerzos relativamente elevados que solicitan a las paredes bajo el efecto del empuje y del rozamiento ejercidos por el material almacenado ha sido objeto de muchas hipótesis. Los primeros constructores de silos calcularon las paredes como si fueran solicitadas por la acción de un líquido de la misma densidad del material almacenado.

Después, otros constructores intentaron extender a los silos la teoría y el cálculo del empuje de tierras sobre muros de contención. Más tarde diversos autores demostraron, por una parte, que estos métodos de cálculo eran errados y, por otra parte, que el empuje de los granos y la presión sobre el fondo del silo no aumentan indefinidamente (como el agua), sino que tienden hacia límites determinados.



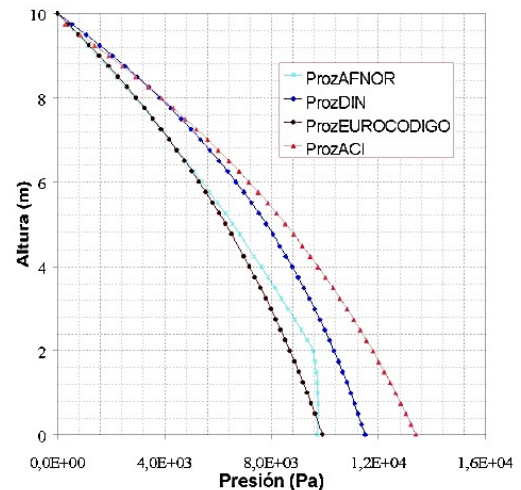
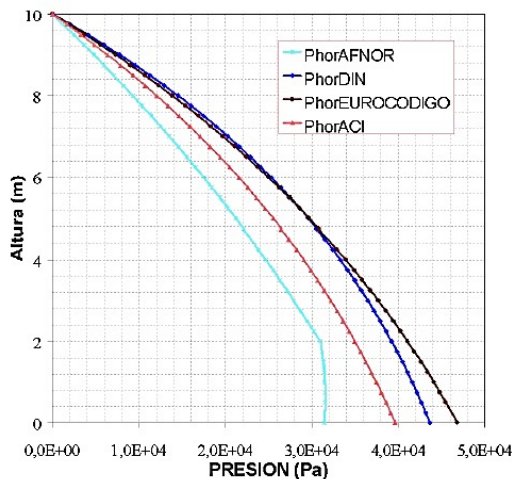
Hay muchas investigaciones a lo largo de muchas décadas, más de un siglo, con diferentes resultados, inclusive, hoy en día, hay diferencias de cargas entre diferentes normas aplicadas.

La primera norma específica para el cálculo de presiones en silos fue la norma alemana DIN 1055/6:1964 basada en los trabajos de los lngs. Pieper y Wenzel de la Universidad de Braunschweig y fue revisada en 1987 y 2005.

En Estados Unidos, la primera norma fue la ACI 313-77, para silos de hormigón, publicada en 1977 y revisada en 1983, 1991 y 1997 y luego la American Standard ANSI / ASAE EP433 1988 (Rev.2011) y así, sucesivamente, en Rusia, Gran Bretaña, Francia AFNOR, Australia AS 3774 (1996) y hoy en Europa el "EN 1991-4: EUROCODE 1. Actions on structures - Part 4: Silos and tanks." *European Committee for Normalisation*.

En **Argentina**, fue publicada la norma IRAM 8015:1977 para el cálculo de silos metálicos y fue reformulada recientemente, en enero 2020, como **norma IRAM 8150**. "Silos Aéreos de Acero para Almacenamiento de Granos". Los fabricantes locales de silos metálicos han logrado su aprobación que favorecerá la estandarización, profesionalizará el sector y

elevará la vara de la calidad de los silos que se puedan comercializar en el país. Por ahora se aprobó la norma como ‘uso no obligatorio’, el próximo objetivo que tienen es lograr un reglamento técnico que vuelva obligatorio su uso, de esta manera, se va a limitar la comercialización de silos de dudosa calidad. En **Brasil**, de acuerdo con nuestro conocimiento, no existe todavía una norma específica para el cálculo de presiones en las paredes de silos, a pesar del empeño realizado por diversas universidades. Los fabricantes utilizan la norma DIN 1055/6 de 1987 o Rev. 2005.



Las presiones de vaciado horizontales y verticales de rozamiento según diferentes normas

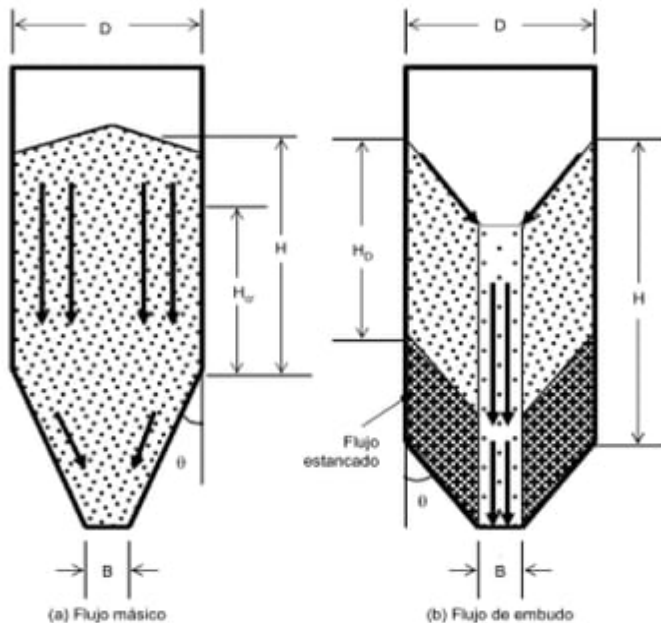
¿Qué pasa dentro de un silo?

Imaginen que cuando un silo está lleno y estático (no se lo llena ni se lo vacía), hay:

- una cierta presión horizontal sobre las paredes,
- una fricción que es una carga vertical sobre las paredes y
- un peso o carga sobre el fondo.

Cuando un silo está lleno es suficiente una abertura extremadamente pequeña del registro de salida para que se cree el escurrimiento de una cantidad insignificante de granos que produce inmediatamente un movimiento descendente en casi toda la masa de granos, lo que rompe el equilibrio de esta y provoca un importante aumento de los empujes sobre las paredes.

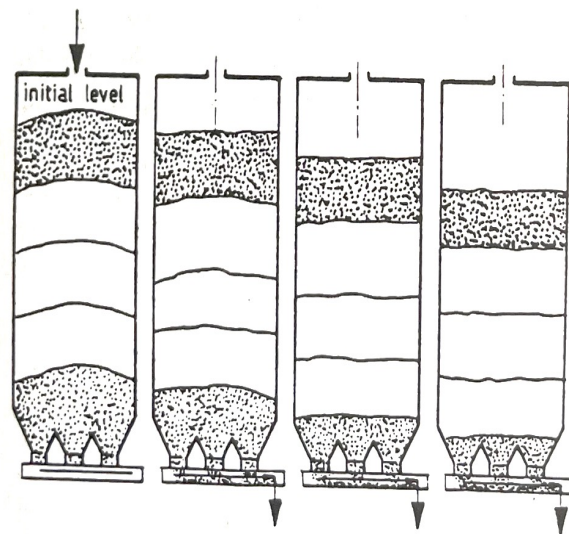
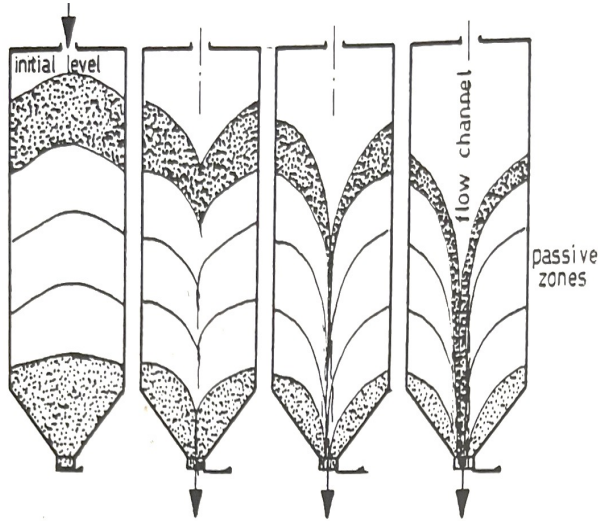
Los granos próximos a las paredes descienden con menor velocidad, retenidos por el frotamiento sobre aquellas, mientras que, en el eje central, la velocidad de descenso es mayor, formándose un cono de vaciado en la parte inferior y un embudo en la parte superior. Es lo que se denomina **“flujo centrado o en embudo”**.



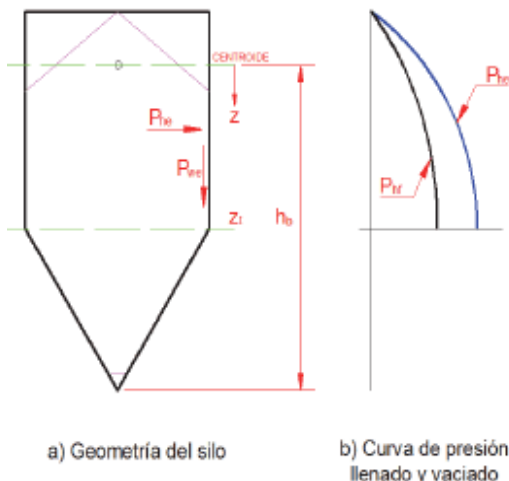
Es decir, cuando se abre el registro de salida y sale el primer grano, toda la masa del silo se pone en movimiento y genera altas sobrepresiones laterales durante el vaciado que pueden, según la esbeltez del silo (es la relación altura/diámetro), más que duplicar las presiones de llenado (x2 o más), que son aquellas cuando el silo está estático. El grano que entró último sale entre los primeros.

Flujo centrado o embudo: “First in/Last Out”, algunos granos quedan quietos y otros se mueven

Flujo másico o “en masa: “First in/First out”, Todos los granos se ponen en movimiento durante el vaciado



El **flujo másico** o “**en masa**” es cuando la masa ensilada baja casi como un líquido, en masa, no se segrega ni quedan espacios estancados. El grano que entró primero, sale entre los primeros y el último que entró sale último. Los empujes contra las paredes y el fondo son muy superiores a las presiones ejercidas con el flujo centrado o de embudo, casi duplican las presiones de vaciado, por lo que superan el coeficiente de seguridad y, como consecuencia, es bastante frecuente que un flujo másico no previsto, fisure o colapse un silo. En este artículo solo nos ocupamos del “flujo centrado o en embudo” que es lo que generalmente ocurre en los silos con granos almacenados. En un próximo artículo veremos cómo y cuándo se genera el “flujo másico”. Principalmente ocurre cuando se instalan dispositivos de ayuda a la descarga, poniendo todo el fondo en movimiento. Es importante no confundirlos y estar prevenidos.



El fenómeno de las **sobre presiones de vaciado**, que son un multiplicador que aumenta las presiones de llenado, se descubrió y cuantificó en Francia (los Ing. Marcel y André Reimbert, padre e hijo) en ensayos de laboratorio y confirmado en silos reales, en la década del '40. Recién se implementó en las normas alemanas DIN 1055 en 1964 y posteriormente en las normas ACI 313 en los EEUU en 1977. El Ing. André Reimbert formaba parte de este comité.

Existen todavía muchos silos en uso en el mundo, incluso en nuestro país, que son anteriores de aquellas épocas donde los esfuerzos están calculados solamente con las **presiones de llenado**.



Argentina-Rojas (PBA) silo de 1966 agrietado el 30.01.2021

EEUU--DFP Ag silo de 1980 , oxidado, colapsa el 7.02.2022

¿Cómo es que esos silos todavía están en pie?

Es que en la ingeniería, tenemos un **“coeficiente de seguridad”**, que las normas definen para cada tipo de aplicación y para los materiales y suelos que van a soportar esas estructuras. Es un multiplicador que, se supone, absorbe todas las imprecisiones, no solo de cálculo, sino también constructivas, de los materiales y del terreno.

Este **“coeficiente de incertidumbre”** salva muchas vidas y muchos activos.

La habilidad de un ingeniero o el objetivo de la obligatoriedad de aplicación de una norma es que le estructura siempre tenga incluido ese coeficiente de seguridad, durante todo su vida útil. No que se vaya consumiendo. Entonces, cuando algo falla, es porque el error es muy importante. Pero en los silos es diferente, las cargas de uso no son una sobrecarga eventual. Cuando definimos una carga máxima, esta puede llegar a ser superada por un estado de carga nuevo no previsto, es decir, las sobrecargas existen en su verdadera magnitud y casi todo el tiempo de uso.



Paraguay, Coop Sommerfeld, 1.10.2022



EEUU- Maryland, 11.10.2020

Causas de las fallas en un silo

Las principales fallas estructurales presentadas en silos metálicos y de hormigón ocurridos en los últimos años, son debido principalmente al desconocimiento de los fenómenos que ocurren dentro del silo por las acciones generadas por el producto almacenado como por las condiciones de flujo.

Resulta muy evidente que las fallas recurrentes son por:

- el **dimensionamiento incorrecto** de los elementos metálicos y de hormigón,
- la **operación incorrecta** de los usuarios.

El silo tiene una vida limitada, por lo que cuando llegan al final de su vida útil, conviene reemplazarlos. Muy pocos lo hacen. Una de las causas frecuentes de la falla de un silo son los años de su uso. Una de las principales compañías de seguros de EEUU en la industria del almacenamiento de granos comentó que los silos metálicos construidos antes de 1995 tenían una esperanza de vida de 25 años. Después de 1995 el diseño mejoró y ahora tiene una expectativa de vida de alrededor de 30 años. Esto no se cumple. En casi todos lados, se los siguen operando, inclusive hay silos construidos en la década de 1960 y principios de 1970. Por suerte, éstos se usan, en general, para almacenaje puro y sólo se llenan y vacían una o dos veces al año.



EEUU-Sylvania GA, colapso de silo oxidado, octubre 2019



EEUU- Iowa, silo (1970) colapsado en marzo 2022



EEUU, silo de duelas de hormigon (1960) colapsado en 2017



EEUU, Miami Valley, silo metálico (1975) colapsado enero 2018

En un artículo de GRAIN JOURNAL Marzo/Abril 2014 escrito por Wayne Bauer, muy conocido de APOSGRAN, ex director de Seguridad y Protección de Star of the West Milling Co, de EEUU, publica datos estadísticos de EEUU informados por una compañía de seguros, quienes estiman que la cantidad de colapsos catastróficos de silos están en el rango de 6-8 por año. Fallas o deformación de paredes que no terminan en colapso pueden ser una o dos veces más de la cifra anterior, es decir otros 6 a 12 por año, lo que hace un total de aprox. 15-20 siniestros por año en EE. UU solamente. El tipo de silos involucrados en este tipo de fallas fueron, según:

Antigüedad de los silos con colapsos:

- 37% tenían de 1 a 15 años
- 23% tenían de 16 a 25 años
- 40% tenían 26 años o más.

Capacidades individuales:

- 17% tenían una capacidad de 250 tons. o menos
- 55% tenían una capacidad de 251 tons. a 2.500 tons
- 28% tenían una capacidad de 2.501 tons o más.

Diámetro del silo:

- 16.7% de 3,00m a 6,70m
- 26.2% de 7,30m a 9,15m
- 35.7% de 11,00m a 18,30m
- 21.4% de 18,30m a 36,00m

La opinión prevalente es que la industria está viendo colapsos en silos de 40-50 años donde ya se veían muy necesitados de una reparación, que nunca se hizo, y que estos silos estaban soportando presiones para las cuales no habían sido diseñados. Por otra parte, también se están viendo más colapsos en silos nuevos que en viejos.



Un silo de 1917 , colapsó el 12.02.2022.

Uno de los viejos silos de ladrillo cerámico de un molino en Villa María, Córdoba, Argentina, se rompió en su base, y derramó una gran cantidad de trigo a la calle. **Aguantó 105 años!!!**

El ladrillo se dejó de usar para levantar silos hace más de 70 años.



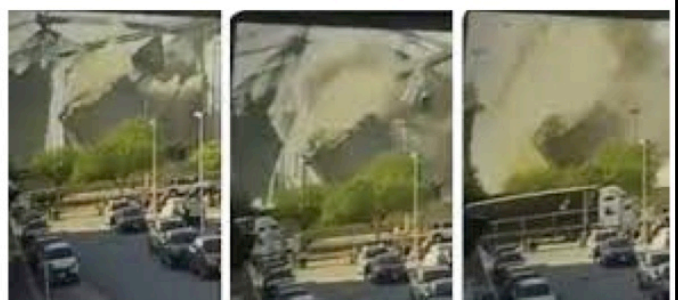
EEUU-The Andersons, Delphi, Indiana-19.09.2022



Argentina-Colapso silo en Puerto San Martin (SF), 2 heridos, 02.08.2021.



México-Colapso silos en Torreón, Puebla, 3 muertos -16.05.2022



México-Secuencia del colapso de silos en Torreón, Puebla, mayo 2022

Suele haber una falta de información o de no tener en cuenta, por parte de los proyectistas, acerca de las propiedades físicas del producto almacenado que afectan significativamente las presiones, pudiendo conducir a colapsos estructurales. Por eso queremos presentar, de forma sucinta, los principales factores que influyen el comportamiento estructural en silos. Para eso precisamos conocer un poco de teoría para entender, luego, las buenas y las malas prácticas.

UN POCO DE TEORIA

Los silos son estructuras especiales sujetas a muchas condiciones de carga no convencionales, diferentes, que dan como resultado modos de falla inusuales. La falla de un silo puede ser devastadora, ya que puede ocasionar la pérdida del contenedor, la contaminación del material que contiene, la pérdida de material, los costos de reemplazo, el daño ambiental, el daño a construcciones vecinas, posibles lesiones a personas y hasta incluso, la muerte de gente.

Las fallas de silos pueden ser simples o espectaculares, debido a explosión y/o estallido, por cargas asimétricas creadas durante el llenado o vaciado, por una gran presión sobre el suelo y no uniforme, por problemas en las fundaciones, por corrosión en silos metálicos, por deterioro en silos de hormigón y por problemas operativos.

Los problemas estructurales pueden ser inherentes a los problemas funcionales ya que los silos están solicitados mecánicamente a partir del contacto del producto ensilado con sus distintas partes constitutivas y, si ese contacto resulta imprevisible y desordenado, dificulta su correcto dimensionamiento, entonces los silos pueden tornarse en estructuras inestables y peligrosas.

Importancia de las características del producto ensilado

Los granos que habitualmente se almacenan en silos constituyen un medio pulverulento o pseudo-sólido sin cohesión, cuyas leyes de equilibrio no están todavía bien definidas o, son controversiales. Es que para el equilibrio de una masa pulverulenta ensilada aparecen el factor tiempo, la velocidad de llenado, la forma en que los granos son acopiados, la altura de caída de los granos para el llenado de los silos, y la compresibilidad del material. Todo esto tienen una gran importancia porque son todos factores que influyen sobre las **características principales del producto ensilado** que son:

- *densidad aparente*
- *ángulo de talud natural*
- *ángulo de frotamiento interno entre los granos*
- *coeficiente de frotamiento sobre las paredes.*

Para la determinación de cada una de estas características hay mucha y diversa bibliografía y normas, con tablas que brindan datos para asumir el cálculo del silo. La siguiente tabla, para paredes lisas, sirve como referencia:

| <i>Materia ensilada</i> | <i>Peso medio kg/m³</i> | <i>Ángulo de talud natural φ</i> | <i>Coefficiente de rozamiento con las paredes</i> |
|-----------------------------|--|---|---|
| Avena | 500 a 540 | 26° a 28° | 0,359 a 0,466* |
| Trigo | 750 a 840 | 24° a 26° | 0,361 a 0,466* |
| Lino | 600 a 680 | 23° a 26° | 0,308 a 0,414* |
| Maíz | 780 a 820 | 26° a 29° | 0,308 a 0,424* |
| Malta | 530 a 600 | 21° a 23° | 0,325 a 0,445* |
| Cebada | 550 a 690 | 25° a 29° | 0,325 a 0,456* |
| Guisantes | 800 a 880 | 24° a 26° | 0,268 a 0,445* |
| Arroz | 580 a 620 | 24° a 26° | 0,394 a 0,601 |
| Harina | 500 a 800 | 35° a 45° | 0,577 a 0,840 |
| Cemento | 1.400 a 1.500 | 30° a 40° | 0,477 a 0,555 |
| Antracita | 780 a 820 | 26° a 28° | 0,466 a 0,510 |
| Carbón graso | 800 a 850 | 35° a 40° | 0,404 a 0,700 |
| Carbón seco | 820 a 880 | 27° a 32° | 0,345 a 0,650 |
| Cenizas | 635 a 750 | 35° a 40° | 0,730 a 0,840 |
| Coque | 440 a 500 | 37° a 41° | 0,466 a 0,730 |
| Mineral de hierro | 1.900 a 2.100 | 43° a 46° | 0,730 a 0,840 |
| Arena seca | 1.600 a 1.800 | 38° a 45° | 0,510 a 0,785 |
| Piedra triturada | 1.700 a 1.850 | 40° a 45° | 0,510 a 0,785 |

OBSERVACIÓN para contratos o especificaciones de compra

Estas variaciones de las características físicas de los productos almacenados tienen una incidencia muy importante sobre los cálculos de los esfuerzos. Por eso es importante que las especificaciones de compra o los contratos entre el comprador de un silo y el proveedor o constructor fijen de forma precisa estas características (las mínimas y máximas) a fin de que los silos construidos o provistos tengan la capacidad de soportar esos esfuerzos máximos.

Determinación de las solicitaciones máximas

Para entender porqué debemos tenerle RESPETO A LOS SILOS es importante que conozcamos brevemente estos fenómenos, que son múltiples y siempre están presentes. La enumeración a continuación puede resultar tediosa, pero lo que se quiere es que se tome verdadera conciencia que es un tema vidrioso y delicado. Lo haremos simple, sin indicar ninguna fórmula, mencionaremos los factores que intervienen en las mismas.

Es importante conocer que la determinación del método de cálculo de un silo tiene en cuenta un montón de consideraciones, lo que demuestra la complejidad del tema, entre ellos:

- a.- las características del material ensilado
- b.- la naturaleza de las paredes (lisas o rugosas)
- c.- sobrepresiones debido al vaciado
- d.- influencia de la excentricidad del vaciado
- e.- variaciones o modificaciones en las características del material ensilado como pueden ser en su densidad, frotamiento interno y frotamiento sobre la pared.

Aumento del contenido de humedad

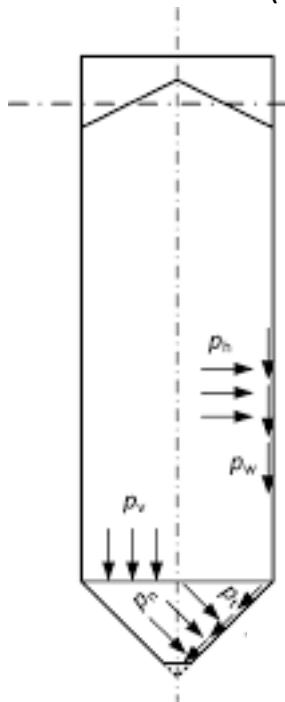
Según el artículo *“The throat of Brazilian Agricole production: The breakdown of vertical silos”*, publicado en el Research, Society and Development, v. 10, n. 8, e14510817253, 2021 por un equipo de 6 investigadores de la Universidad Federal de Campina Grande, Brasil, la norma norteamericana American Standard ANSI / ASAE EP433 1988 (R2011), informa que si el contenido de humedad durante el almacenaje aumenta un 4% o más, se genera un aumento de las presiones laterales de llenado (condición estática) seis veces mayor (x6) y para un aumento de 10% en la humedad del producto durante el almacenaje, la presión lateral se aumenta por un factor de 10 (x10). Cifras muy impactantes. Por lo que recomienda que los silos sean diseñados y manejados de forma tal de evitar un aumento de humedad por encima del 1-2% durante el almacenaje.

La densidad puede variar sensiblemente por la altura del silo por el simple hecho que la compresión de las capas inferiores por el peso de las capas superiores hace aumentar la densidad de los granos del fondo. Por ejemplo, un trigo de 750 Kg/m³ puede aumentar a 800 Kg/m³ y hasta 830 Kg/m³, factor que hay que tener en cuenta en los cálculos, adoptando la densidad máxima o un promedio, es decir 800 Kg/m³.

Es común ver en las tablas de capacidad de silos que los fabricantes informan una capacidad nominal del silo y otra capacidad superior atendiendo al fenómeno de compactación de los granos.

El frotamiento interno de los granos también se encuentra modificado por este aumento de densidad, pero aquí influye también la humedad del producto almacenado que impacta considerablemente sobre el frotamiento físico de cada grano.

El frotamiento sobre las paredes también varía, tanto para paredes lisas como rugosas, por las mismas razones que con la sobrecarga debido al peso de las capas superiores y a la variación de humedad. Esta última también producida por condensación dentro del silo y sus consecuencias (fermentación, capas endurecidas, etc.).



Esfuerzos sobre las paredes de los silos

Las paredes verticales de los silos cilíndricos están solicitadas por dos esfuerzos principales: el **empuje horizontal p_h** debido al material ensilado que tiende a abrir el cuerpo del silo según sus generatrices y la **fuerza de rozamiento vertical p_w** debida al rozamiento de los granos con las paredes, que son esfuerzos verticales de compresión.

Esfuerzos sobre el fondo de los silos

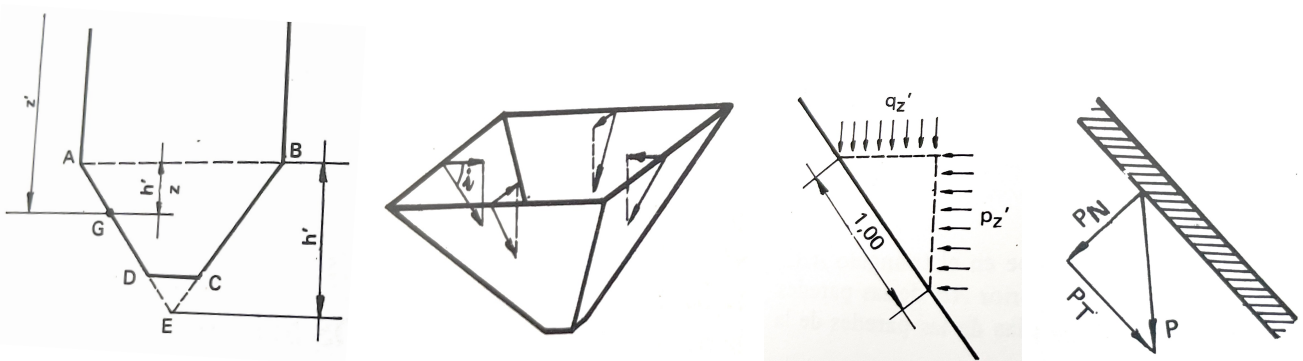
Las **presiones verticales sobre el fondo p_v** son función de la densidad máxima del grano, del ángulo de frotamiento interno máximo entre granos y del ángulo de frotamiento mínimo de los granos sobre las paredes.

Esfuerzos sobre las tolvas de silos

La interfase, tolva con las paredes verticales, es un potencial punto de conflictividad. Su forma es generalmente troncocónica en silos cilíndricos, o piramidal en silos cuadrados o rectangulares. Para el cálculo se supone que los granos transmiten la misma presión vertical que ejercen al nivel del nacimiento de las paredes verticales, es decir, al nivel de la unión de las paredes de los silos con las paredes inclinadas de las tolvas.

Se consideran las siguientes cargas:

- la presión vertical ejercida por los granos en el borde inferior de las paredes verticales (que se descomponen en p_n y p_t sobre la pared inclinada de la tolva).
- el peso de los granos que llena la tolva
- el peso propio de las paredes de la tolva
- el peso de aparatos fijados a la tolva



Cargas y descomposición de fuerzas que actúan sobre una tolva

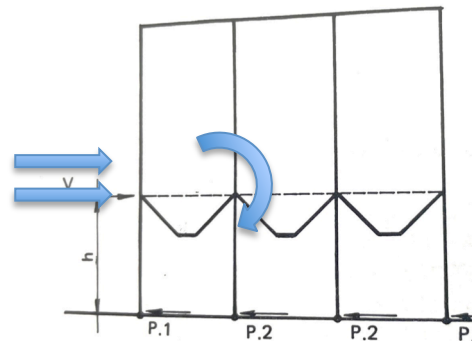
Con tolvas excéntricas o asimétricas el tema se complica más.

Esfuerzos sobre las columnas de soporte de los silos

Estas trabajan a flexión compuesta bajo el efecto de las cargas verticales debido al peso propio de la estructura, al peso de los granos ensilados, a las reacciones verticales originadas por la acción del viento y al momento de vuelco debido a la presión horizontal del viento. El silo tiende a volcarse bajo el efecto del viento lo que genera esfuerzos verticales suplementarios en las columnas.

Esfuerzos por viento

Las fuerzas de viento que se consideran son las presiones positivas y negativas que actúan simultáneamente y no deben ser menores a los Códigos de Construcción para la zona en cuestión. La distribución de la presión del viento debe tomar en cuenta las estructuras adyacentes y, sobre todo, la flexión circular debida al viento en los silos vacíos.



Esfuerzos por los cables de termometría

Hay que tener en cuenta, en las cargas sobre el techo, las cargas pulsantes de tracción generadas por los cables de termometría. No se deben instalar si no han sido previstos de origen. Un error común es colocar termometría en silos que no lo tenían previsto de antemano.

Otras fuerzas y presiones

Además de los esfuerzos por los granos almacenados, deben agregarse los efectos del peso propio, nieve, térmicos y sísmicos, posible formación de arcos por apelmazamiento, el colapso de estos arcos, si los hubiere. Cada tipo de carga se multiplica por un factor de carga según establece la norma que se utilice.

Veremos en un próximo artículo la gran importancia del **aumento de presión por la descarga excéntrica** o por aberturas de descarga laterales que causan presiones laterales desiguales sobre las paredes.

El vaciado de los silos

Este es un tema particularmente importante porque los colapsos de silos generalmente ocurren durante su vaciado, estando en operación. Como vimos, hay importantes esfuerzos secundarios sobre las paredes y las tolvas. Estas sobrepresiones de vaciado son especialmente peligrosas cuando, además, el vaciado no se realiza por un orificio central, sino por una descarga excéntrica.

El vaciado y llenado simultáneo de los silos

Existe un nuevo estado de cargas, no muy conocido y difundido, que tiene un coeficiente que aumenta aún más las presiones de vaciado. Es **cuando se “transila” sobre el mismo silo**. Ampliaremos en otro artículo. Es un estado que casi nadie tiene en cuenta y muy común que ocurra en la operación de una planta.

Algunas otras particularidades del vaciado

El vaciado de silos verticales es generalmente por gravedad. Cualquier modificación de las características de escurrimiento del material ensilado puede comprometer este vaciado, a punto de complicarlo totalmente. Si hay una toma de cohesión más o menos importante de esta masa ensilada puede alcanzar a neutralizar toda posibilidad de escurrimiento natural, se frena el flujo. Esto es el caso, por ejemplo, en silos con materiales cohesivos como polvos, cáscaras, subproductos, harinas, coque, azúcar, pellets, fertilizantes u otros. Esto puede suceder por:

- las capas inferiores sobrecargadas por el peso de las capas superiores están siendo comprimidas y por el peso, cohesionan y apelmazan el producto almacenado haciendo variar sensiblemente su ángulo de frotamiento interno, formando arcos, puentes o bóvedas, muy peligrosos, que interrumpen el libre escurrimiento y pueden hacer colapsar el silo.
- migraciones de humedad dentro de la masa de producto pueden llegar a causar la aglomeración de las partículas entre sí, afectando el libre escurrimiento.
- el calentamiento de la materia ensilada por efecto de una mala conservación.

La primera causa, por compactación, casi no tiene solución, salvo por medios mecánicos para romper el nuevo equilibrio de la masa ensilada.

La segunda causa, por migraciones de humedad, solo se puede evitar cuidando que el producto almacenado tenga un tenor de humedad lo más bajo posible para que no tome cohesión en estado de reposo y se mantenga la fluidez de escurrimiento libre.

La tercera causa, por calentamiento, se neutraliza con el tratamiento del material ensilado, por ejemplo, en el caso de cereales, es el secado previo y la aireación de los silos o con la instalación de sistemas exhaustores del aire caliente en el techo para evitar la condensación dentro del silo y la auto-combustión de los granos. Ver caso Port Arthur:



¿Qué hay que hacer?

Es muy importante capacitar a las personas que operan las plantas de almacenaje y silos en su uso. Uno de los grandes problemas con los silos metálicos es que se pueden dañar si no se descargan correctamente.

Para cuidar un silo se debe evitar la descarga excéntrica a toda costa. Si hay aberturas laterales del silo, hay que asegurarse que están diseñados adecuadamente y que los esfuerzos adicionales que se generan hayan sido contemplados en el cálculo estructural del silo.

También, los **efectos negativos de una mala operación de los sistemas de aireación pueden** provocar corrosión de las paredes y alrededor de la base del silo. Además, los efectos de la temperatura del aire pueden deteriorar los silos de hormigón. La corrosión por lo general ocurre cerca de la base del silo si no se tiene un sello hermético. Si no se sella de manera efectiva para impedir que el agua entre, el agua se alojará en el borde de la base del silo y entra en contacto con el grano. Si esto sucede el grano se estropea, aparece el moho, se produce ácido, que ataca el revestimiento de la pared del silo y este literalmente desaparece en poco tiempo.



En silos de hormigón a menudo aparecen grietas internas en las paredes, pero no es un gran problema si las grietas son verticales. Si son horizontales, es más peligroso, estas son más pequeñas y se astillan alrededor de la grieta, por lo que hay que repararlas de inmediato. Si se produce en la parte exterior, permitirá la entrada de agua y por ende corroerá la armadura de refuerzo.

Reflexiones finales de esta 1ra parte

Las principales causas de fallas estructurales son las fallas directamente relacionadas con:

- el tipo de flujo ocurrido dentro del silo
- carga y / o descarga excéntrica
- alteración de las propiedades de los productos almacenados (peso específico, ángulo de fricción interno de los granos, ángulo de fricción con la pared)
- inestabilidad del contenido del silo.

Se concluye que gran cantidad de accidentes en estas estructuras podrían evitarse o mitigarse con un conocimiento previo, por parte de los proyectistas y de los responsables de la operación, sobre los fenómenos más importantes en los silos.

La falta de conocimiento sobre el comportamiento estructural de los silos verticales y la forma en que se están utilizando en la práctica, resultan en altos riesgos de accidentes. Existe una clara necesidad, tanto para el proveedor como para el usuario, de estar seguros del diseño, montaje, operación y mantenimiento del silo.

Por eso es muy importante contratar siempre a profesionales y empresas reconocidas y competentes, solventes en el conocimiento y tecnología de silos.

Resulta así comprobado que los silos poseen un alto índice de colapso estructural y que el objetivo de la divulgación de estos riesgos y accidentes es para que sirva como precedente en los nuevos proyectos, así como para la rehabilitación de silos existentes.

No cabe duda que los silos son una apasionante disciplina, que hay que tratar con respeto.

roberto@hajnal.com.uy

Buenos Aires, 18 de marzo 2023