DISEÑO DE UN SILO CILÍNDRICO PARA EL ALMACENAMIENTO DE PRODUCTOS GRANULARES

ANEXO-I

ANEXO A MEMORIA PRINCIPAL

I. ANEXOS.

1. TEORÍAS, ESTUDIOS Y NORMAS DE LOS ESPECIALISTAS MÁS DESTACADOS EN EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SILOS
   1.1. PRESIONES HIDROSTÁTICAS EN EL DISEÑO DE UN SILO.
   1.2. TEORÍA DE PLEIZNER A PARTIR DE ENSAYOS EXPERMENTALES.
   1.3. TEORÍA DE AIRY A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES.
   1.4. TEORÍA DE JAMIESON A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES
   1.5. TEORÍA DE MARCEL REIMBERT A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES
   1.6. TEORÍAS DE MARCEL Y ANDREÉ REIMBERT A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES
   1.7. TEORÍA DE SCHEER A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES
   1.8. TEORÍAS DE HOFFMAN, CAQUOT Y DESPEYROUX A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES
   1.9. TEORÍAS DE KVAPIL A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES
   1.10. ESTUDIO DEL FLUJO MEDIANTE EL VACIADO DE UNA MAQUETA DE CARAS TRANSPARENTES DE TORSTEN KALLSTENIUS.
   1.11.TEORÍAS DE ZAKRZEWSKI A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES
   1.12. TEORÍAS DE ALEXANDER TURITZIN A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES.
   1.13. TEORÍAS DE TAKHTAMISHEV A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES
   1.14. TEORÍAS DE KIM A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES
   1.15. TEORÍAS DE KOVTUM Y PLATONOV A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES
   1.16. TEORÍAS DE D. LENCZNER A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES ENSAYOS SOBRE EL FLUJO. FORMA DEL FLUJO.
   1.17. TEORÍAS DE D. LAFORGE Y BORUFF A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES.
   1.18. NORMAS ALEMANAS DIN 1055
   1.19. TEORÍAS DE RUDOLF KVAPIL A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES. FLUJO POR GRAVEDAD DE LOS MATERIALES GRANULARES EN TOLVAS Y CELDAS.
   1.20. TEORÍAS DE HANDLEY A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES. ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS ESFUERZOS INTERNOS EN LOS SÓLIDOS GRANULARES FLUYENDO
   1.21. TEORÍAS DE JENIKE Y JOHANSON A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES.
   1.22. TEORÍA DE THEIMER A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES. FALLAS EN SILOS DE HORMIGÓN ARMADO PARA GRANOS.
   1.23. TEORÍA DE SARGIS S. SAFARIAN A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES. PRESIONES DE DISEÑO DE LOS MATERIALES GRANULARES EN SILOS.
   1.24. TEORÍA DE LUMBROSO A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES.

DETERMINACIÓN NUMÉRICA DE LOS ESFUERZOS EJERCIDOS POR LA MASA ALMACENADA EN LOS SILOS.
1.25. TEORÍA DE GARG A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES. PRESIONES MÁXIMAS DE LOS MATERIALES GRANULARES EN SILOS.

2. FORMAS DEL FLUJO DE VACIADO EN LOS PRODUCTOS GRANULARES.

2.1. INTRODUCCIÓN.
2.2. EL FLUJO DE VACIADO DE LOS PRODUCTOS GRANULARES.
2.2.1. FORMA DEL FLUJO DE VACIADO SEGÚN KVAPIL.
2.2.2. FORMA DEL FLUJO DURANTE EL VACIADO SEGÚN CHWETZOFF.
2.2.3. FORMA DEL FLUJO DURANTE EL VACIADO SEGÚN LENCZNER.
2.2.4. FORMA DE FLUJO DURANTE EL VACIADO SEGÚN DEUTSCH Y CLYDE.
2.2.5. FORMA DEL FLUJO DURANTE EL VACIADO SEGÚN McCABE.
2.2.6. FORMA DEL FLUJO DURANTE EL VACIADO SEGÚN PIEPER.
2.2.7. FORMA DEL FLUJO DURANTE EL VACIADO SEGÚN JENIKE.
2.2.8. FORMA DE FLUJO DURANTE EL VACIADO SEGÚN LAFORGE Y BORUFF.
2.2.9. FORMA DEL FLUJO DURANTE EL VACIADO SEGÚN PATERSON.
2.2.10. FORMA DEL FLUJO DURANTE EL VACIADO SEGÚN PATERSON.

a) Silo con tolva de 27º de pendiente y paredes lisas tanto en silo como en tolva.
b) Silo con tolva de 50º de pendiente y paredes lisas tanto en el silo como en la tolva.
c) Silo con tolva de 73º de pendiente y paredes lisas tanto en silo como en tolva.

2.2.11. FORMA DEL FLUJO DURANTE EL VACIADO SEGÚN TINGATE.

3. VACIADO EXCÉNTRICO. TEORÍAS DE LOS ESPECILISTAS MUNDIALES MÁS IMPORTANTES.

3.1. JAMIESON. 1904. CANADÁ.
3.2 REIMBERT. 1943. FRANCIA.
3.3. NORMA DIN 1055. 1964. ALEMANIA.
3.4. JENIKE. 1967. USA.
3.5. SAFARIAN. 1969. USA.
3.6. THEIMER. 1969. ALEMANIA.
3.7. PIEPER. 1969. ALEMANIA.
3.8. GARG. 1972. INDIA.
3.9. NORMAS FRANCESAS. 1975.
3.10 NORMA DIN 1055. (CORRECCIÓN 1980).

4. TEORÍAS Y ENSAYOS REALIZADOS POR EL Dr. RAVENET

4.1. FLUJO DE VACIADO EN MAQUETAS DE CARAS TRANSPARENTES
4.1.1. VACIADO CENTRADO. RELACIÓN ALTURA-LADO IGUAL A 6.
4.1.2. VACIADO CENTRADO. RELACIÓN ALTURA-LADO IGUAL A 2.
4.1.3. CELDA DOTADA DE COLUMNAS DE VACIADO ESTÁTICO.
4.1.4. CELDAS DOTADAS DE SALIDAS MÚLTIPLES.
4.2. ENSAYOS REALIZADOS CON GALGAS EXTENSOMÉTRICAS.
4.2.1. MAQUETA UTILIZADA.
4.2.2. GALGAS EXTENSOMÉTRICAS.
4.2.3. ENSAYOS REALIZADOS EN MAQUETAS CON TOLVA A 45º DE PENDIENTE. VACIADO CENTRADO. RELACIÓN ALTURA-LADO IGUAL A 6.
4.2.4. ENSAYOS REALIZADOS EN MAQUETA CON TOLVA A 45º DE PENDIENTE. VACIADO CENTRADO. RELACIÓN ALTURA-LADO IGUAL A 1.5.
4.2.5. CELDA DOTADA DE COLUMNAS DE VACIADO ESTÁTICO.
4.2.6. CELDA DOTADA DE SALIDAS MÚLTIPLES.
4.3. CONFRONTACIÓN DE LOS VALORES EXPERIMENTALES CON LAS FOTOGRAFIAS DE FLUJO DE VACIADO.
4.3.1. VACIADO CENTRADO. RELACIÓN ALTURA LADO IGUAL A 6.
4.3.2. VACIADO CENTRADO. RELACIÓN ALTURA-LADO IGUAL A 1.50.
4.3.3. MAQUETA DOTADA DE COLUMNAS DE VACIADO ESTÁTICO.
4.3.4. MAQUETA DOTADA DE SALIDAS MÚLTIPLES.
4.4. CONCLUSIONES.
4.5. RESUMEN DE LAS TEORÍAS EMITIDAS.

5. EXPLOSIONES EN SILOS.

1. TEORÍAS, ESTUDIOS Y NORMAS DE LOS ESPECIALISTAS MÁS DESTACADOS EN EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SILOS

1.1. PRESIONES HIDROSTÁTICAS EN EL DISEÑO DE UN SILO.

Los primeros grandes silos para almacenamiento de cereales se construyeron en hormigón armado y se aplicaron presiones hidrostáticas de valor; $P=h.\gamma$

Aplicando presiones hidrostáticas, los espesores de la pared resultaban excesivamente elevados; por otro lado, esta teoría **no tenía en cuenta los esfuerzos de rozamiento** que aparecen en las paredes y que la teoría hidrostática no prevé.

Como puede verse, según esta teoría, la presión sobre un punto es constante e independiente de la dirección. Otro dato importante es que el caudal de salida a través de un orificio es variable y función de la altura de cabeza.

Muy pronto los pioneros en el diseño de silos se dieron cuenta de que la diferencia más importante entre un **fluido y un producto pulverulento** era el rozamiento interno entre partículas de este último, y que hace que aparezca un rozamiento grano-pared y un caudal de vaciado prácticamente constante e independiente de la altura de cabeza del producto ensilado.

Esta propiedad es la que distingue fundamentalmente a un fluido de un material pulverulento y hace que un depósito especialmente diseñado para almacenamiento de fluidos no sea apto para almacenamiento de productos pulverulentos (debido a los esfuerzos de rozamiento). A la inversa, un depósito especialmente diseñado para almacenamiento de productos pulverulentos no es apto para almacenamiento de fluidos (debido a las presiones horizontales).

Según Roberts cualquier dato basado en las reglas aplicables a la hidráulica (presión hidrostática) no puede ser aplicado. Cualquier cálculo basado en reglas aplicables a gravas y arenas tampoco puede ser aplicado ya que el rozamiento entre partículas y la densidad de los productos induciría a resultados incorrectos.

Demostró que la presión sobre el fondo alcanza su valor máximo cuando el material almacenado en la celda alcanza una altura igual a dos veces el diámetro, aproximadamente. Por lo tanto es lógico pensar que la presión lateral ha de ser menor que la presión sobre el fondo. La presión que gravita sobre el fondo de la celda, según las experiencias de ROBERTS, corresponde a una altura de grano igual al diámetro de la celda y la presión lateral máxima corresponde a una altura de grano igual a 0.368 D. D= diámetro de la celda.

Conclusiones: radio hidrálico= l/4 para silos cuadrados e igual a D/4 para silos cilíndricos. Las presiones laterales son las mismas para un silo cuadrado que para un silo circular en los que el diámetro es igual al lado.

1.2. TEORÍA DE PLEIZNER A PARTIR DE ENSAYOS EXPERMENTALES.

1) la relación entre la presión lateral y la vertical es mayor para pequeñas alturas de grano;
2) El valor de K varía en función del tipo de pared de la celda y rugosidad de la misma;
3) Que la presión lateral a veces se dobla cuando se produce el vaciado del silo
4) Que en el caso de un vaciado excéntrico, la presión aparece en el lado opuesto a la boca de salida.

1.3. TEORÍA DE AIRY A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES.

En el año 1897, mediante el uso de la cuña de deslizamiento, AIRY deriva su teoría para obtener las presiones laterales sobre las paredes de un silo, así como el peso del producto ensilado que es absorbido por las paredes por rozamiento.

Estas fórmulas han sido usadas extensivamente por ingenieros ingleses, en el cálculo y construcción de silos de madera, acero y hormigón armado.

Para todos estos materiales, Airy determina los dos coeficientes μ y μ'(por experimentación) que, junto con la densidad del producto almacenado, son suficiente para la obtención de las presiones laterales.

Airy establece el equilibrio de la cuña de deslizamiento que es soportada por el grano en reposo a lo largo del plano AE y por la pared de la celda AC, ejerciendo contra ésta la presión P, que es la que pretendemos calcular.

Airy distingue dos tipos de celdas:

1) celdas bajas, en las que el plano de deslizamiento corta a la superficie libre del grano antes que a la pared de la celda.

2) celdas altas, en las que el plano de deslizamiento corta a la pared de la celda antes que a la superficie libre del cereal.

La presión sobre el fondo es la diferencia entre el peso total almacenado en la celda y la fuerza absorbida por las paredes por rozamiento.

1.4 TEORÍA DE JAMIESON A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES.

Los primeros silos construidos en el campo del almacenamiento de cereales en Norteamérica eran de madera. Su construcción se realizaba mediante la unión de tablones, hasta alcanzar un espesor máximo de 20 cm en función de las dimensiones de la celda.

La altura máxima de la celda era de unos 20 m. Los espesores en la pared eran dictados por la práctica y siempre en función de las deformaciones aparecidas; por tanto no existía un estudio de las presiones laterales y sobre el fondo.

Según los experimentos realizados en silos reales de Jamieson se llega a las siguientes conclusiones:

- Las presiones laterales de Jamieson son 1,08 superiores a las de Janssen, en cambio las presiones sobre el fondo solamente son el 0,66 de las presiones de Janssen .
- En los ensayos realizados prácticamente no ha habido sobrepresiones de vaciado, la causa es debida a que el dispositivo de medición de las presiones laterales se colocó en la parte inferior de la celda y el embudo producido durante el vaciado no ha afectado a esta membrana.
- En el cálculo de las presiones verticales existe una importante discrepancia de valores entre Jamieson y Janssen, donde la diferencia es del 52% que puede ser decisiva a la hora de calcular tolvas y losas de fondo bajo en silos.

Según los experimentos realizados en maquetas de Jamieson se llega a las siguientes conclusiones:

- Se efectuaron tres ensayos en maqueta, midiendo presiones laterales de llenado y vaciado, considerándose en el primer ensayo una pared rugosa, con un ángulo de rozamiento con el grano de 25º.

- En el segundo ensayo la pared de la maqueta es de madera, y considerada como lisa, con un ángulo de rozamiento con el grano de 22º y por último maqueta con pared de chapa lisa y ángulo de rozamiento de 19º.

- Las paredes laterales, al pasar de pared rugosa a pared lisa aumentan en un 12% y si pasamos a pared muy lisa, el aumento es del 33%.

1.5 TEORÍA DE MARCEL REIMBERT A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES.

Durante la permanencia del grano en los silos se produce un fenómeno de solidificación de la masa; su consecuencia es la disminución de las presiones laterales que se acentúa sobre todo en la parte baja.

Durante el vaciado, las presiones laterales son inferiores a las medidas durante el llenado, excepto cuando se produce vaciado excéntrico, en cuyo caso se pueden producir importantes sobrepresiones.

De forma general, y para el caso de orificios de vaciado centrados, se admite que el incremento de presiones laterales es del 10% como máximo.

Después de cincuenta años de numerosos ensayos, han aparecido muchas divergencias que en muchos casos provienen de la imperfección de los aparatos de medida utilizados.

Actualmente podemos resumir como sigue el conocimiento clásico del ensilado de cereales:

- la presión de los granos sobre las paredes de los silos sigue una ley diferente a las presiones del empuje de tierras y a las presiones hidrostáticas;
- la relación entre presiones laterales y presiones sobre el fondo no es constante, sino que varía con las características del grano y la geometría de la celda;
- la presiones de los cereales en movimiento es como máximo un 10% como máximo;
- las presiones laterales y verticales son función de la geometría de la celda.

Teoría de REIMBERT.

La conclusión que se impone es que los ensayos efectuados por JANSSEN dan origen a presiones netamente inferiores a la realidad.

Podemos decir que, contrariamente a la teoría clásica:

- el coeficiente K, igual a la relación entre presiones horizontales y verticales, no es constante y varía con la altura del material ensilado y con la geometría de los silos;
- en un silo rectangular, la presión media no es la misma sobre las paredes largas que sobre las cortas;

- dos silos con idéntico radio hidráulico, pero con distinta forma geométrica, tienen presiones diferentes sobre las paredes.

Conclusión de los ensayos realizados con cápsulas manométricas.

1) Los ensayos realizados demuestran que las presiones ejercidas sobre las paredes de los silos, por una masa pulverulenta, siguen la misma ley y están de acuerdo con las curvas teóricas.

2) Los ensayos han sido realizados con materias pulverulentas compresibles, como cebada, a continuación se realizaron con materias incompresibles como arena.

3) Los ensayos realizados con cebada, se efectuaron con granos de 3 a 4 mm de grueso. Las fórmulas obtenidas no hacen referencia a espesor de granos.

1.6 TEORÍAS DE MARCEL Y ANDREÉ REIMBERT A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES

Cuando el silo está lleno, basta con una abertura extremadamente pequeña en la boca de vaciado, que produzca la salida de una cantidad insignificante de grano, para producir inmediatamente en casi la totalidad de la masa ensilada un movimiento descendente que rompe su equilibrio y provoca un aumento importante en los empujes sobre las paredes.

Cuando la boca de salida de la celda se abre, prácticamente toda la masa almacenada se pone en movimiento provocando un aumento considerable de los esfuerzos horizontales contra las paredes.

REIMBERT halló un procedimiento que evita que la masa se ponga en movimiento, realizándose el vaciado por capas sucesivas, empezando por arriba y de tal manera que la masa inferior permanece inmóvil.

Este resultado se obtiene colocando en el eje del silo o celda, y en toda su altura, un conducto de vaciado formado esencialmente por una serie de tramos de tubo y en la parte inferior colocado sobre la boca de salida de la celda.

Cuando el silo está lleno, la presión ejercida sobre las paredes es función del radio hidráulico medio de la celda y por tanto mayor que la presión dentro del tubo con un radio hidráulico medio mucho más pequeño.

Cuando se abre la boca de salida, son los granos que se encuentran en el interior de la columna antidinámica los que se ponen en movimiento, mientras que la masa ensilada permanece en reposo.

Cuando los granos en la parte alta del tubo antidinámico han bajado dejando libre el orificio entre tubos, entonces penetra el grano de la parte alta de la celda, permaneciendo el resto de la masa ensilada inmóvil.

Por lo tanto, el vaciado se efectúa de forma ordenada y sin sobrepresiones, siendo los esfuerzos sobre las paredes estáticos o de llenado denominados activos.

1.7 TEORÍA DE SCHEER A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES

SCHEER calcula la presión horizontal siguiendo el siguiente proceso: conociendo la presión sobre el fondo, el peso total del material almacenado en la celda y el coeficiente de rozamiento, se calcula la diferencia entre el peso total del material almacenado en la celda, el peso que gravita sobre el fondo y obtendremos el peso de material que carga sobre las paredes. Este valor, dividido por el coeficiente de rozamiento grano-pared, da la presión lateral total sobre las paredes. Este valor, finalmente dividido por el área lateral, da la presión en Kg/m2.

Este método, aplicado al caso de arena o soja, da resultados mucho mayores que los obtenidos experimentalmente.

Un dato muy significativo, y creemos de gran importancia, fue el incremento de las paredes laterales en un 300% debido a la caída accidental del plato de fondo una distancia de 1,26 cm.

- Para el caso de vaciado centrado no aparecen sobrepresiones de vaciado, de acuerdo con los valores obtenidos experimentalmente.
- Para el caso de vaciado excéntrico, el lado opuesto a la boca de salida sufre un incremento de presiones del 20%.
- Para el caso de semillas de soja, grava y arena, los valores de K no siguen la teoría de Janssen.
- Los resultados experimentales obtenidos son válidos para silos con relación altura-lado o diámetro igual a 3,6.

1.8 TEORÍAS DE HOFFMAN, CAQUOT Y DESPEYROUX A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES

El año 1916 **HOFFMANN** da la primera llamada de alerta, al indicar que la teoría de **JANSSEN-KOENEN** es solamente válida para el llenado del silo, pero no cuando se vacían las celdas, alcanzándose sobrepresiones, según **PRANTE** de 5.

REIMBERT, CAQUOT y DESPEYROUX publican sus investigaciones admitiendo durante el vaciado coeficientes de sobrepresión de 2.

Pueden aparecer dos tipos de vaciado en una celda:

1) Vaciado centrado y uniforme de la celda que, según veremos, **JENIKE** define como flujo másico.

2) Vaciado por un conducto central de toda la masa. Este flujo se llama **pipe flow**.

En el caso de **flujo másico**, el rozamiento del grano con la pared es insuficiente para evitar el movimiento de la masa ensilada, por lo que la presión sobre la pared en movimiento es igual a la presión en reposo. Este razonamiento es apoyado por **WASTLUND**. En el caso del **flujo de conducto**, el rozamiento con las paredes es suficiente para evitar el movimiento de la masa ensilada en contacto con la pared, apareciendo en el centro y produciendo fuerzas horizontales suplementarias sobre las paredes.

Al inicio del vaciado se presenta el flujo másico, mediado el vaciado aparece una combinación entre el flujo másico, mediado el vaciado aparece una combinación entre el flujo másico y el de embudo, y al final del vaciado se presenta el caso de flujo de embudo.

Este ensayo nos indica la clave para el conocimiento del flujo de vaciado para la determinación de presiones sobre las paredes. Las curvas obtenidas experimentalmente indican que las sobrepresiones aparecen inmediatamente en el momento de abrirse la boca se salida, en este instante se presenta el flujo másico.

1.9 TEORÍAS DE KVAPIL A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES

KVAPIL, año 1955, efectuó un estudio exhaustivo de la descarga de productos granulares en maquetas. Llegó a la conclusión de que hay un primer movimiento vertical y tiende a romper el contacto vertical de granos. Posteriormente hay un segundo movimiento donde los granos ruedan y cambian de posición en dirección horizontal, con el efecto del movimiento vertical. Ambos volúmenes en movimiento forman elipsoides.

Efectos dinámicos

Durante el vaciado, ensayos efectuados demuestran que aparecen sobrepresiones de vaciado. REIMBERT sugiere la colocación de tubos de vaciado antidinámicos para evitar sobrepresiones de vaciado. El procedimiento fue usado anteriormente por MIERSCH en silos de Frankfurt-am-Main a principios de siglo. En este caso el tubo central consiste en pequeñas piezas de tubo conectadas entre sí.

DUHLE es el precursor en la instalación de tubos antidinámicos en el silo de Alexandra Dock (Liverpool). Otros diseñadores han intentado buscar dispositivos especiales para evitar sobrepresiones de vaciado.

Este sistema era ya conocido a finales del siglo XVIII incorporando varios canales uniformemente repartidos sobre la superficie de la tolva, diseñada para asegurar el hundimiento uniforme de la masa en la celda.

HUART, el año 1855, divide la tolva del silo en dos canales fijados con un sistema de guías carriles.

KVAPIL estudia también los efectos de tubos de media abertura de descarga vertical y guiados, lo que produce un movimiento vertical y paralelo hacia abajo.

1.10. ESTUDIO DEL FLUJO MEDIANTE EL VACIADO DE UNA MAQUETA DE CARAS TRANSPARENTES DE TORSTEN KALLSTENIUS.

El análisis de los esfuerzos alcanzados cuando se vacía un silo es facilitado mediante el estudio del flujo de la masa ensilada, tal como ha sido efectuado por KALLSTENIUS en un extenso trabajo. El autor efectuó ensayos en silos cilíndricos cortados por la mitad, de 250 mm de radio y 500 mm de altura.

Las bocas de salida eran de 8 mm, 25mm y 50 mm, respectivamente. La maqueta se llenó con arena en capas horizontales de dos colores, uno gris y otro amarillo; al vaciarse pudo verse perfectamente el cono invertido que la arena produce y que es más o menos amplio en función del grado de compactación de la arena y de la boca de salida, que por cierto tiene gran influencia.

En la **Fig. 1** pueden verse fotografías del flujo de vaciado.

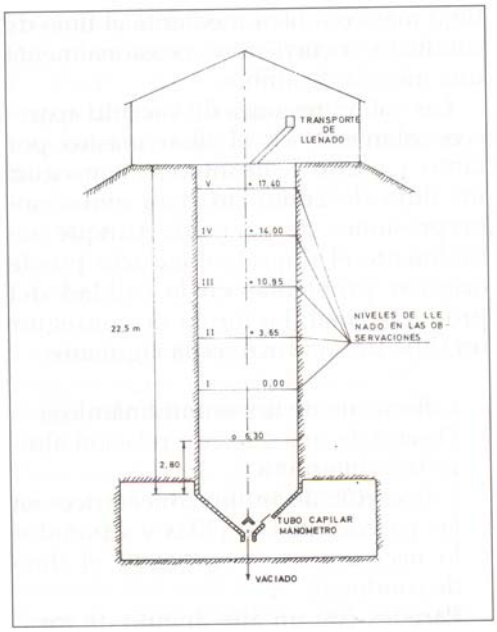


Figura 1. FLUJO DE VACIADO

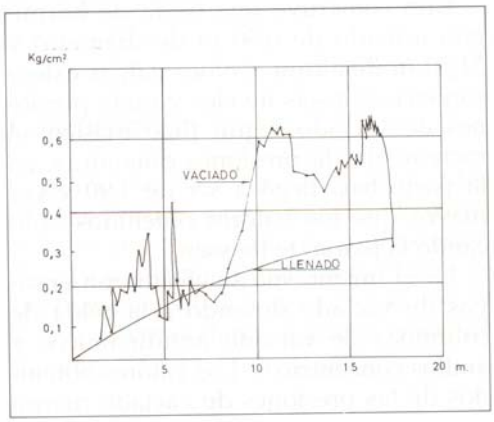


Figura 2. Curvas de presiones de llenado y vaciado con una sobrepresión de 2,00.

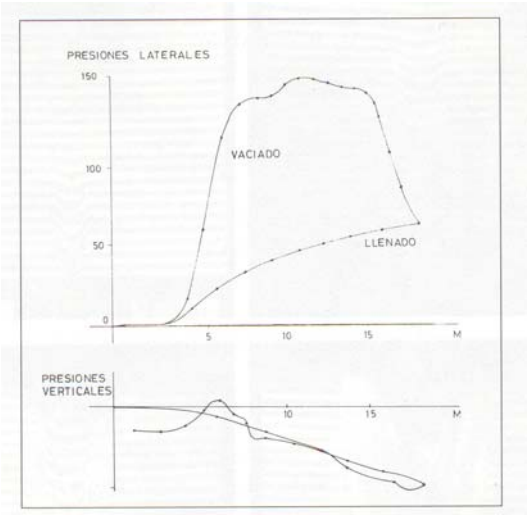


Fig. 3. Curvas de presiones de llenado y vaciado con una sobrepresión de 2,37.

1.11. TEORÍAS DE ZAKRZEWSKI A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES

Diseño de silos para almacenamiento de cereales

Empieza estudiando las características del grano, en lo que hace referencia a la densidad, ángulo de rozamiento interno y coeficiente de rozamiento grano-pared. Comienza por establecer una relación de especialistas que dan sus valores experimentales o teóricos para el caso de trigo o maíz.

De la teoría de Reimbert saca la conclusión que es válida para el llenado pero no para el vaciado.

La teoría de Janssen admite la constancia de la relación K=P/Q. Dorr, en 1924, prueba que esta suposición no es correcta, ya que K es variable aunque dentro de unos estrechos límites. De forma similar a Airy, resuelve el problema bajo la suposición de que la presión del grano actúa en dos paredes paralelas de longitud infinita; así omite la influencia del rozamiento sobre las paredes y considera un sistema co-planar de fuerzas, cuando en realidad esto es un problema espacial y debe ser considerado como tal.

Frolich, en 1934, toma como base para su método los principios de mecánica del suelo y considera la distribución de esfuerzos en el suelo bajo una fuerza concentrada, actuando sobre la superficie.

Jaky, en 1948, propone el valor para K=p/q= 1-sen ϕ, que es mayor que el valor dado por Janssen. Algunos autores como Walker, indican que K es igual :

$$K = (1-\text{sen}^2\phi)/(1+\text{sen}^2\phi)$$

Konen propone el valor de :

$$K= \text{tg}^2(\pi/4-\phi/2)$$

Efectos dinámicos

Sabemos que la variación del coeficiente de rozamiento grano-pared produce una variación de las presiones laterales en las paredes de los silos.

Idénticamente, la variación del coeficiente K produce una variación de las presiones laterales. En la fig... vemos las variaciones de las presiones sobre las paredes en función de los valores de K.

Se comprende, que al iniciarse el vaciado, se rompa el equilibrio estático y varíen los coeficientes de rozamiento grano-pared y coeficiente K. Estos dos factores, sumados, pueden producir incrementos muy importantes de las presiones laterales.

Experimentos en modelos y silos reales han demostrado que las presiones horizontales sobre las paredes de las celdas aumentan sustancialmente durante el vaciado. La magnitud de este incremento depende del caudal de vaciado.

Prante, aunque no obtuvo sobrepresiones de vaciado en sus ensayos efectuados a finales de siglo pasado, sí intuye la aparición de sobrepresiones que, según él, tienen como valor 3 a 4 veces superiores que las presiones de llenado.

Un factor de 2 es comúnmente aplicado en el diseño de las paredes de las celdas. Investigadores de Baku en 1939, muestran que las presiones horizontales son muy irregulares: incluso para una misma altura pueden diferir sustancialmente.

Varios autores comprueban que, durante el vaciado de las celdas, las presiones laterales sobre las paredes de las celdas crecen sustancialmente. La razón de este incremento de presiones laterales puede conocerse mejor si se estudia el comportamiento del grano en el silo durante el vaciado. La fig... muestra sucesivos estados después de que la boca de salida de la maqueta ha sido abierta. Al abrirse la boca de salida, el grano se pone en movimiento encima mismo de la boca de salida, para luego extenderse sobre toda la altura de la celda. Se forma un embudo de vaciado de tal manera que el grano en la superficie superior se desliza sobre sí mismo penetrando en el embudo de vaciado. Moviéndose el grano en el centro de la celda ejerce una presión lateral que es mayor que la de llenado.

El aumento máximo de presión lateral debido a este efecto ocurre a una altura igual, de uno a dos diámetros de la celda, y no en la tolva, como parece ha de suceder.

El autor elude el tubo antidinámico para evitar sobrepresiones de vaciado, ya que toda la masa permanece en reposo y sólo se mueve el grano dentro del tubo y en la superficie superior de la celda.

El autor es consciente de que es necesaria una especificación que dé factores de diseño por la cual la presión del grano pueda ser incrementada durante el vaciado de la celda para evitar serias roturas de la celda.

Conclusión

El autor considera que los métodos presentados por Janssen y Airy para el cálculo de silos de hormigón armado son incorrectos y peligrosos.

Se ha de tener mucho cuidado a la hora de calcular los efectos dinámicos que aparecen durante el vaciado de la celda, debidos al movimiento de la masa ensilada.

También es muy importante tener en cuenta las variaciones de temperatura en silos multicelulares de forma poligonal.

En muchas partes del silo puede ser un factor crítico, ya que las variaciones de temperatura producen importantes momentos flectores en las interceldas que, si son calculadas según la teoría clásica, aparecerán grietas por insuficiencia de sección en la armadura.

1.12. TEORÍAS DE ALEXANDER TURITZIN A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES

Presiones dinámicas ejercidas por los materiales granulares en silos (celdas altas)

En el momento de abrir la boca de salida se inicia el movimiento del producto granular, que puede clasificarse en dos grupos fundamentales:

Muy Importante:

1) Flujo tipo dinámico. Al abrirse la boca de salida, toda la masa se pone en movimiento, esto trae como consecuencia la aparición de grandes incrementos en las presiones laterales durante el vaciado.

2) Flujo tipo no dinámico. Solamente se pone en movimiento la zona central de la masa ensilada, y en sentido vertical; a éste flujo también se le llama de conducto o tubo. Se caracteriza por la ausencia de sobrepresiones de vaciado.

Ketchum describe los resultados de las experiencias realizadas por algunos ingenieros entre 1882 y 1909, y manifiesta que, para silos con boca de salida centrada, la presión de vaciado se incrementa en un 10% con respecto a la de llenado. Sin embargo, en el caso de vaciado excéntrico, el incremento de presiones, medido durante el vaciado, puede llegar a ser de hasta cuatro veces mayor que la presión de llenado

1.13. TEORÍAS DE TAKHTAMISHEV A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES

Efectúa ensayos en maquetas alcanzando valores de presiones de vaciado de 2 a 3 veces mayores que las obtenidas por Janssen. En silos reales, las presiones de vaciado fueron de 1,65 y 1,35 mayores que las de llenado para arena y trigo, respectivamente.

Clasifica el flujo de vaciado en dos tipos:

1) flujo no dinámico sin sobrepresiones de vaciado

2) flujo dinámico con toda la masa en movimiento y con la aparición de sobrepresiones de vaciado.

Es muy importante la forma y caudal de llenado, que influyen de forma decisiva: para llenado lento, presiones más pequeñas que para llenado rápido.

j. Ruud observa que, si se llena y vacía el silo con el mismo caudal, el material que permanece fuera del cono central de vaciado permanece estático , siendo el material que entra en el silo el que a continuación sale.

Reimbert no sugiere ningún método para el cálculo de presiones durante el vaciado, aunque aplica un coeficiente de sobrepresión mayorante; asimismo indica que las sobrepresiones aparecen en la parte alta del silo.

Geniev (Rusia) explica el proceso de vaciado con las sobrepresiones consiguientes: al abrirse la boca de salida hay una disminución de la presión vertical, que resulta de una disminución de la densidad y del ángulo de rozamiento interno.

La masa granular en movimiento tiende a adquirir características de líquido ideal, lo que produce un incremento en las presiones laterales.

Parece que, para evitar el incremento de las presiones laterales, es necesario evitar que toda la masa granular se ponga en movimiento, es decir regular el vaciado, haciendo que se produzca de forma ordenada y progresiva. Un sistema para conseguirlo es la colocación del tubo antidinámicoo de vaciado estático.

1.14. TEORÍAS DE KIM A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES

Al igual que su antecesor, Kim observa que el vaciado puede realizarse de dos maneras: mediante el flujo másico o bien mediante el flujo de conducto, ocurriendo ocasionalmente una mezcla de ambos.

Las sobrepresiones de vaciado aparecen solamente en el flujo másico; interesa, pues, conseguir un flujo de conducto para evitar sobrepresiones de vaciado.

La forma de conseguir un flujo de conducto es la siguiente:

1) Colocación de tubos antidinámicos, que han sido ampliamente comentados.
2) Diseño de silos con una relación altura-lado inferior a 1,5.
3) Colocación de anillos concéntricos en las paredes de las celdas y separados lo necesario para conseguir el flujo de conducto.
4) Paredes con un coeficiente de rozamiento muy grande no producen flujo de conducto, pero existen muchas posibilidades que suceda.

Construyó una celda de hormigón de 6,50 m de diámetro y una altura de 21 m. Para el caso de vaciado, según flujo másico, el incremento de presiones dinámicas en la parte baja llegó a ser de 1,90 veces mayor que los valores obtenidos aplicando la teoría de Janssen. En el mismo silo se efectuaron ensayos de vaciado dotando a la celda de columnas de vaciado antidinámicas y anillos concéntricos. Los valores obtenidos de las presiones de vaciado fueron menores que los obtenidos aplicando la teoría de Janssen.

Los ensayos efectuados por Kim clarifican la influencia de la forma de flujo sobre las presiones laterales en las paredes.

Otro sistema de evitar sobrepresiones de vaciado es diseñar silos multicelulares con interceldas pequeñas, cuadradas o en forma de rombo, que son perforadas y actúan como tubos antidinámicos, permitiendo el vaciado de las celdas grandes a través de estas interceldas.

Los ensayos realizados por Kim han conducido a la siguiente información complementaria:

1) La velocidad de llenado y sus interrupciones no afectan materialmente a la densidad de la masa ensilada y por tanto a las presiones sobre el fondo de la tolva.

2) Para la misma altura de grano en la celda, la presión sobre la tolva durante el llenado es mayor que durante el vaciado.

3) La densidad del producto granular puede afectar al tipo de flujo (másico o de conducto).

4) Durante el llenado, la presión lateral sobre las paredes de la celda es siempre menor que durante el vaciado.

5) En general, durante el vaciado de un silo cilíndrico, la presión lateral no es uniforme a lo largo del perímetro de una sección recta.

6) La carga sobre las paredes (por rozamiento) es mayor durante el vaciado que durante el llenado de la celda.

1.16. TEORÍAS DE D. LENCZNER A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES ENSAYOS SOBRE EL FLUJO. FORMA DEL FLUJO.

El vaciado inicial produce una disminución de densidad en la masa ensilada próxima a la boca de salida, apareciendo un vaciado central en forma de tubo con un diámetro aproximado de 5 cm. El vaciado en forma de tubo progresa hacia arriba, y hasta que no alcanza la superficie superior del grano no empieza éste a moverse. El siguiente paso es un incremento en el diámetro del conducto de vaciado hasta que toca a las paredes, y salvo el cono inferior toda la masa está en movimiento; el vaciado está muy avanzado y este estado coincide con la posición d. El vaciado prosigue hasta que, al final, queda una pequeña porción de grano, formando el ángulo de la cuña de deslizamiento, que es considerablemente mayor que el ángulo de talud natural. Si paramos el vaciado en la posición d y llenamos de nuevo la celda,

al vaciar de nuevo no se forma el conducto de vaciado, sino que toda la masa fluye uniformemente (mass flow).

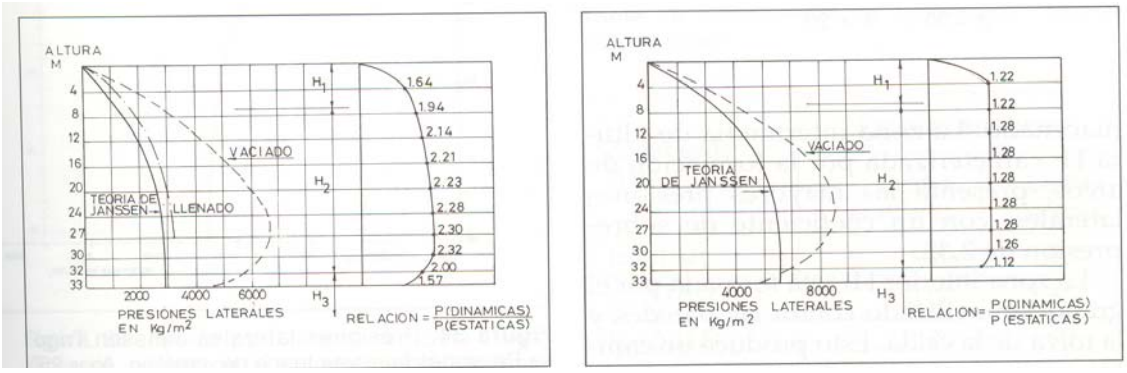


fig. 4. curvas de presiones de llenado y vaciado con una sobrepresión de 2,37.

Resumen

Resultados de ensayos efectuados en maquetas con caras transparentes con arena muestran que la forma del flujo es influenciada por el tipo de arena usada. La forma del flujo depende de si es el primer vaciado o si ya se han efectuado otros vaciados anteriores.

El caudal de vaciado es independiente de la altura del material almacenado y proporcional a $d^{2,86}$, siendo d el diámetro interior de la boca de salida circular.

Ensayos con arena en reposo muestran una distribución de presiones sobre el fondo uniforme para cualquier altura.

La suposición que la relación de las presiones horizontales a las verticales es constante es incorrecta. Este valor de K varía linealmente para pequeñas alturas de masa ensilada, siendo del tipo hiperbólico para grandes alturas, alcanzando el límite de 0,2075.

Ensayos realizados con arena en maquetas demuestran que las fuerzas de rozamiento sobre las paredes son considerablemente mayores durante el llenado y el vaciado, mientras que el producto almacenado permanece en reposo. La fuerza sobre las paredes por rozamiento es mayor durante el vaciado que durante el llenado. La presión sobre el fondo durante el vaciado no es uniforme, sino que varía desde cero hasta el máximo valor junto a las paredes.

1.17. TEORÍAS DE D. LAFORGE Y BORUFF A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES.

Se hace referencia a la determinación del flujo de vaciado en celdas y tolvas, mirando el flujo de una partícula individual, como camino para incrementar el caudal de vaciado. Sabemos que el flujo de vaciado de productos cohesivos se divide en dos partes:

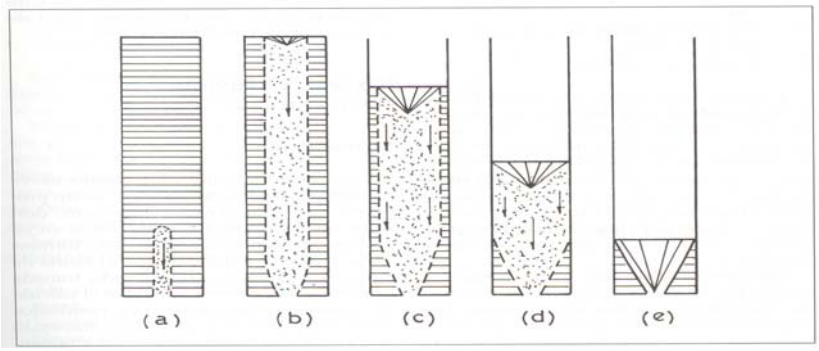


fig. 5. Flujo de vaciado del producto almacenado.

1) Iniciación del flujo.

3) Mantenimiento de este flujo bajo condición de conseguir un caudal determinado.

En los materiales cohesivos, las presiones internas, dentro de la masa ensilada, producen incrementos de compactación y como consecuencia la formación de bóvedas sobre la boca de descarga, que inducen a que el flujo de vaciado quede interrumpido.

El estudio de materiales no cohesivos ofrece la oportunidad de determinar la influencia de los factores que aumentan o retardan el flujo de vaciado. Según Ketchum el caudal de vaciado a través de una boca de salida de diámetro D vale:

$$\text{Caudal} = \kappa\beta D^3$$

Fórmula en su expresión más elemental (ya que no han sido tenidos en cuenta otros factores importantes) para la determinación del caudal de vaciado, y en la que β es igual a la densidad y K un coeficiente que depende de las unidades utilizadas. Para determinar el flujo de vaciado se ha efectuado la superposición de las secuencias de filmación en una maqueta de caras transparentes. Este estudio se ha realizado en celdas de fondo plano y celdas con tolvas de pendientes 20º y 60º. En el caso de fondo plano, aparece una zona de material en reposo que, contrariamente a la opinión general, no se extiende hasta el borde de la boca de salida, sino que queda a unos 25 mm aproximadamente; en esta zona las partículas se mueven horizontalmente y avanzan muy lentamente hacia la boca de salida, ya que van penetrando con mucho trabajo en la corriente de flujo. La partícula A se mueve pasando de la posición A1 a la posición A2 (distancia de 1,3 cm) en 2,42 segundos, lo que equivale a una velocidad de 0,32 m por minuto.

Las velocidades de las partículas dentro de la corriente de flujo las podemos ver en la fig.... se puede apreciar las altas velocidades en el centro de la corriente de flujo y su aceleración a medida que nos acercamos a la boca de salida. En las zonas próximas al límite del material en

reposo, las velocidades han disminuido de forma ostensible, aunque la aceleración hacia la boca de salida prácticamente se mantiene.

En el caso de maqueta con tolva de 20º de pendiente, en la posición a, la zona de material almacenado que permanece en reposo durante el vaciado es sustancialmente más pequeña, y tiene una forma diferente que para el caso de maqueta con el fondo plano.

El movimiento de la partícula B que pasa de la posición B1 a B2 tiene un espacio de 3,8 cm, su velocidad es de 9,5 cm/seg y resulta ser un 64% mayor que para el caso de fondo plano.

Debido al incremento de velocidad, existe un área de extremadas interferencias de las partículas sobre cada lado del orificio, como puede verse en la fig..., posición c. En la boca de salida el flujo puede describirse como turbulento. Este efecto produce el fenómeno de arcos, con formación de arcos intermitentes que sucesivamente se van rompiendo. Este proceso reduce considerablemente el área efectiva de vaciado.

En la posición b, vemos las velocidades de las partículas dentro de la corriente de flujo. Es muy significativo constatar que las velocidades son comparativamente inferiores a las obtenidas en la maqueta con fondo plano, este valor resulta ser del 70%.

De los ensayos efectuados con varios materiales, se comprobó que para todos ellos, la velocidad de vaciado en maquetas con tolvas de 20º de pendiente era menor que en maquetas con fondo plano. Indudablemente la mayor velocidad de entrada en la corriente de flujo de la partícula B en su paso de B1 a B2 frena la corriente de vaciado por gravedad.

En la posición a, vemos una maqueta con tolva de 60º de pendiente, todo el material almacenado está en movimiento. La corriente de flujo converge en la boca de salida sin producir ningún tipo de turbulencia. En la posición b se aprecian las velocidades, que en el centro de la corriente de vaciado son parecidas a las de la tolva de 20º; por el contrario, en las proximidades de la pared son mucho más elevadas.

En la posición c, puede verse la contracción del chorro de vaciado, que encuentra su área mínima ligeramente por debajo de la boca de salida.

Indiscutiblemente la tolva de 60º de pendiente produce un flujo mucho más uniforme y mayor caudal de salida que la tolva de 20º o de fondo plano. Estas observaciones indican que una

tolva con pendiente pequeña aumenta el choque de las partículas que atacan lateralmente al chorro o corriente de vaciado, retardándolo en su proceso de vaciado.

El caudal de vaciado disminuye al aumentar la pendiente de la tolva, suponiendo que partimos de fondo plano, para alcanzar su valor mínimo para una pendiente de la tolva variable entre 20º y 40º, y depende del material.

También se experimentó con maquetas cuyas tolvas de vaciado tenían una salida excéntrica, formando las tolvas dos caras pendientes de 90º y otras dos caras pendientes de 50º y 60º. Se comprobó que el aumento en el caudal de descarga era de un 25 a un 35% del obtenido mediante tolvas convencionales.

1.18. TEORÍAS DE RUDOLF KVAPIL A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES. FLUJO POR GRAVEDAD DE LOS MATERIALES GRANULARES EN TOLVAS Y CELDAS.

El problema del flujo por gravedad de los materiales granulares es muy importante para el buen funcionamiento de celdas y silos y depende de la economía de los trabajos y operaciones a realizar. Por tanto, Kvapil inicia su estudio dividiendo los materiales almacenados en un silo en cuatro importantes grupos:

1) Materiales sueltos
2) Materiales parcialmente sueltos
3) Materiales gruesos
4) Materiales cohesivos

Los materiales sueltos pueden realizar dos movimientos: el movimiento primario es un desplazamiento en dirección de la gravedad. El movimiento secundario es una rotación de las partículas almacenadas, alrededor del centro de gravedad y por efecto de la rodadura entre las partículas; si el rozamiento es grande, este segundo movimiento de rodadura es más difícil de realizarse.

En partículas gruesas, con tamaños mayores de 20 cm pero que contienen un considerable porcentaje de partículas finas y polvo, el movimiento de rotación aún es más restringido. Por otro lado resulta casi imposible definir los límites entre materiales de estos cuatro grupos.

1.19. B.M.H.B. CÓDIGO INGLÉS PARA EL DISEÑO DE SILOS Y TOLVAS. 1985, INGLATERRA.

Este código estudia el flujo de vaciado y las presiones en los silos, celdas y tolvas. Se estudian las propiedades físicas de los materiales a almacenar y los tipos de extractores a colocar en los silos, para conseguir un vaciado correcto.

Proceso de diseño

Este es un código complejo y largo que incluye la tecnología de sólidos. La primera decisión a tomar es saber si el producto almacenado fluye libremente o no.

Se dice que el flujo es libre, si no se presentan problemas o si más del 3% del peso del producto almacenado tiene un diámetro superior a 250 micras.

La segunda decisión a tomar, es qué tipo de flujo se quiere conseguir, másico o de conducto.

Las propiedades físicas de los materiales a almacenar, es otro de los factores a tener en cuenta. Se estudia la forma de la tolva para producir un flujo másico o de conducto, pero sin problemas de vaciado, calculándose las dimensiones de la boca de salida, para que no existan problemas de vaciado.

Finalmente se calculan las presiones laterales y verticales para el caso de flujo másico y de conducto, así como para celdas altas y bajas.

Propiedades de los materiales almacenados

Se determinan las propiedades físicas de los materiales almacenados, obteniéndose los parámetros de una muestra preconsolidada, por aplicación del círculo de Mohr y la teoría de Jenike.

siendo:

δ_i = Ángulo de rozamiento interno.

δ = Ángulo efectivo de rozamiento interno.

$\varnothing$ Ángulo de reposo.

Otro de los factores a tener en cuenta, es el tamaño de las partículas y el contenido de humedad.

Conocidas las propiedades físicas de los materiales a almacenar, se diseña la tolva y dimensión de la boca de salida para el flujo másico y flujo de conducto.

Se analizan todos los sistemas de extracción mecánicos y neumáticos:

- Aireación y fluidificación.
- Vibradores.
- Roscas extractoras.
- Mesas giratorias.
- Cintas extractoras.
- Extracción rotativos de paleta.

Vaciados excéntrico

Cuando el vaciado excéntrico es inevitable, la complejidad del flujo y la distribución de presiones, así como su interacción con la estructura y el material en reposo, para resistir los efectos de la variación de presiones, es tal que se necesitan estudios y complejos.

Para silos cuadrados, rectangulares, multicelulares, el vaciado excéntrico no presenta mayores problemas. Para silos cilíndricos los problemas de ovalización y los momentos debidos a la excentricidad son importantes y pueden dar origen a deformaciones e incluso el hundimiento del silo.

Factores que influyen en las presiones en silos

Los siguientes factores pueden influir decisivamente en las presiones laterales sobre el silo:

- vibraciones que pueden producir un incremento en la densidad y cambios en los ángulos de rozamiento interno y con la pared.
- Cambios en el caudal del vaciado.
- Cambios en el sistema de extracción, modificando la posición del extractor y ocasionando vaciados excéntricos.

- Cambios estructurales en el interior del silo.

- Formación y caída de bóvedas. Colocación de sistemas de ayuda al vaciado.

FLUJO DE VACIADO. DIMENSIONES DE LA BOCA DE SALIDA.

En una maqueta de fondo plano con boca de salida centrada, al iniciarse el vaciado, solamente parte de la masa, se pone en movimiento. Se pueden definir claramente cuatro zonas:

1. Elipsoide de material en movimiento, con semieje mayor a y semieje menor b.
2. Superficie del canal de vaciado de material suelto.
3. Límite de la zona en movimiento.
4. Zona del material en reposo.

Para un material determinado, los parámetros del elipsoide se mantienen independientemente de la inclinación de las caras de la tolva. La inclinación de la tolva, afecta al caudal de salida. El continuo flujo de material por la boca de salida depende de la dimensión de esta boca de salida, que debe ser lo suficientemente grande como para evitar interrupciones y bóvedas.

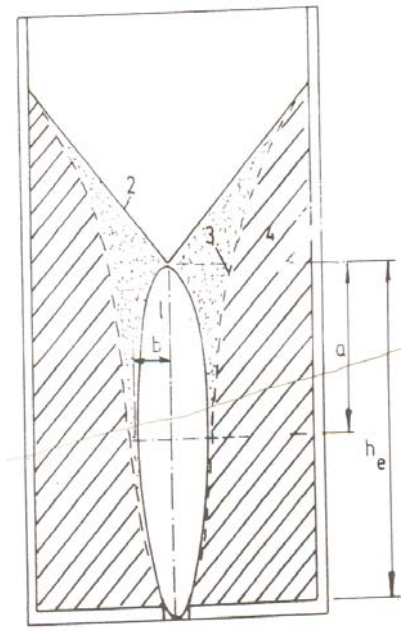


fig. 6. Flujo de vaciado del producto almacenado según Kvapil.

Otro sistema de vaciado utilizado es la colocación de tolvas con una pared vertical y la boca de salida en esta pared. Es interesante hacer notar que el elipsoide que representa el material en movimiento no es vertical, sino que se encuentra inclinado un ángulo A con la pared vertical de la tolva. Las bocas de salida rectangulares son mucho más efectivas que las cuadradas o circulares. Durante el proceso de vaciado de un material suelto existen dos zonas claramente diferenciadas: la zona activa con material en movimiento y la zona pasiva con material en reposo.

Cuando la celda se llena y vacía a intermitencias, nos encontramos con que la zona pasiva permanece estática y es solamente la activa la que se va renovando. Esto acarrea dos serios problemas: pérdida de capacidad real de ensilado y problemas de degradación. Existe una

solución para evitar que se produzca esta zona en reposo de material almacenado. En la **fig.7** podemos ver una celda con salidas múltiples.

Colocación de deflectores

Cuando la actividad de la celda es muy baja, se colocan en el interior dispositivos especiales, denominados DEFLECTORES que permiten ampliar la zona del material en movimiento.

En la fig. 7 podemos ver una celda donde se ha colocado un deflector. Podemos distinguir:

1. Pantalla deflectora. 2. Tolva. 3. Boca de salida.

La anchura D del deflector depende de la altura H y la dimensión de la boca de salida d. Con este dispositivo se amplía la zona activa de celda, o zona de material en movimiento.

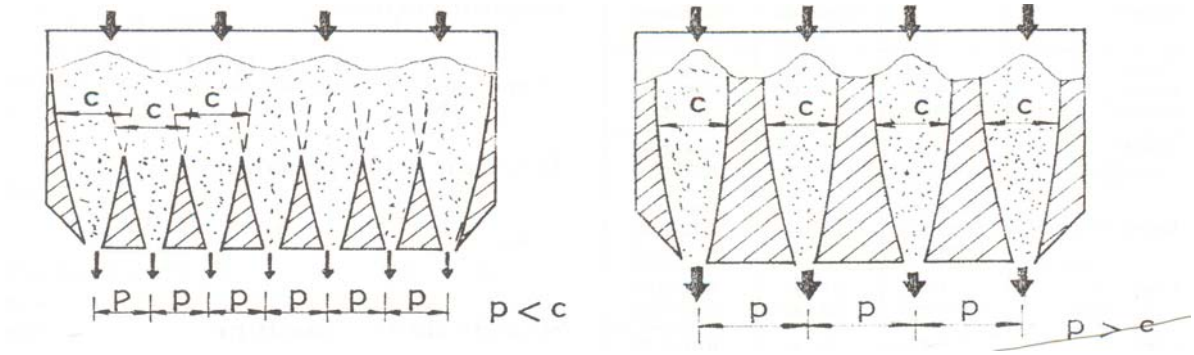


fig. 7. Colocación de deflectores en la tolva según Kvapil.

Propiedades físicas materiales almacenados

Kvapil determina el ángulo de rozamiento de diversos materiales gruesos, con la pared de la tolva de descarga, suponiendo que puede utilizarse en su construcción de hormigón armado, acero y madera.

1.20. TEORÍAS DE HANDLEY A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES. ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS ESFUERZOS INTERNOS EN LOS SÓLIDOS GRANULARES FLUYENDO

La mayor desventaja de la teoría de Janssen es suponer que la relación entre presiones horizontales y verticales (K), es constante en toda la altura del silo.

Debido a la variación y al desconocimiento de este coeficiente K, Airy obtuvo una nueva teoría mediante la cual se obtenían presiones laterales y verticales en función de tres variables:

- ángulo de rozamiento producto ensilado-pared
- ángulo de rozamiento interno del producto ensilado
- peso específico del producto ensilado

Conclusiones de los trabajos teóricos y prácticos

1) El conocimiento de las presiones producidas en las paredes de los silos durante el flujo de vaciado y en particular dentro de la masa fluyente es muy limitado. Por otro lado, la medición mediante aparatos colocados dentro del flujo afecta la forma del flujo y altera los resultados obtenidos.

2) Experimentalmente se ha podido comprobar que el flujo másico crea altas presiones en las paredes de las celdas durante el vaciado.

3) La relación entre presiones horizontales y verticales K no es constante y por tanto no son válidas teorías que parten de que K es constante.

4) Existe poca confirmación experimental de las teorías predecidas por Jenike, Johanson y Walker.

5) Factores externos tales como: forma de la tolva y caudal de vaciado tienen decisiva influencia sobre las presiones generadas durante el flujo de vaciado.

6) La forma del flujo obtenida para un sistema bidimensional es muy diferente de la obtenida en un sistema tridimensional y que por cierto, y debido a la dificultad de la medición, es prácticamente desconocida.

Parece pues necesario efectuar ensayos en maquetas tridimensionales para determinar realmente las presiones de llenado y vaciado contra las paredes y dentro del flujo de vaciado del producto ensilado.

Experimentos realizados con una píldora radiosensitiva por Handley.

La solución para medir de una manera directa presiones laterales y sobre el fondo es mediante una pequeña píldora radiosensitiva (de forma cilíndrica, de 2 cm de longitud y 1 cm de diámetro) y con una densidad muy parecida al producto almacenado. La ventaja de este sistema sobre los demás, incluido los rayos X, es decisiva.

No obstante, esta píldora tiene sus limitaciones ya que la maqueta tiene que ser de plexiglás, para que la señal de la píldora llegue al receptor. Por otro lado las dimensiones de la maqueta varían entre 6 cm y 40 cm aproximadamente.

Se efectuaron ensayos en dos maquetas de las siguientes dimensiones:

1) Maqueta cilíndrica con tolva cónica de plexiglás, con radio de 15 cm y altura de 90 cm, y con tolva variable de 70º, 60º y 50º. Volumen: 70,6 dm^3. Boca de salida: 3,5 cm.

2) Maqueta rectangular, de lados 22,5 cm por 30 cm y altura de 90 c, también de plexiglás.

La píldora radiosensitiva está compuesta de un transmisor y un transductor colocados juntos en el pequeño volumen de 2 cm por 1cm, y puede medir presiones por encima de los 2921 Kg/m^2.

La temperatura de trabajo de la píldora está comprendida entre 90º F a 105º F y el error máximo es del 3%; la capacidad de respuesta es de 0 a 973 Kg/ m^2 en un tiempo de 0,5 segundos. El sistema de trabajo de la píldora es emitir una señal cuya frecuencia varía con la presión. El material ensayado es arena de densidad 1596 Kg/ m^2.

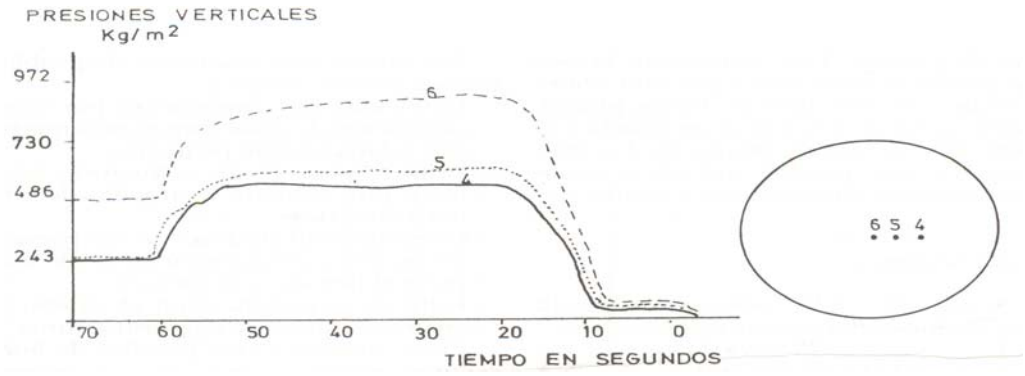


fig. 8. Experimentos realizados por una píldora radiosensitiva por Handley.

Discusión de los resultados obtenidos

En la celda con tolva cónica de 70º la velocidad de la píldora radiosensitiva es la misma en cualquier posición de la celda. Esto queda confirmado por la posición estable de la superficie superior de la arena en la celda. Solamente en los últimos 5 cm se acelera para alcanzar la boca de salida.

La píldora se mueve en el interior de la masa de arena arrastrada en un flujo másico y permanece paralela a la pared hasta el momento en que entra en el cono convergente de la tolva de salida. En este cono la velocidad llega a ser cinco veces superior a lo largo de la celda.

Por encima de la tolva de la celda aparece un arco o bóveda de material y la densidad por encima de él es constante. Por debajo se encuentra el cono de vaciado, y las partículas son aceleradas hasta alcanzar una velocidad cinco veces superior a la que tenía en la parte alta de la celda. Esta aceleración provoca una disminución de densidad en esta zona próxima a la boca de salida.

Algunos autores consideran que la densidad del material en esta zona coincide con la densidad de fluidificación del producto, aunque Handley ha obtenido, para el caso de la arena valores inferiores.

Las figuras 8 y 9 muestran la variación de las presiones verticales en las seis posiciones en que se ha colocado la píldora radiosensitiva.

Generalmente, las presiones junto a las paredes son mayores que en el centro de la celda. Es interesante hacer destacar que cuando se pasa del cuerpo de la celda a la tolva en la posición 1 la presión vertical tiene una bajada brusca de intensidad y luego vuelve a subir, cosa que no ocurre en el resto de posiciones, o sea, a medida que nos desplazamos hacia el centro de la celda. Idénticamente los mismos resultados se obtuvieron para el caso de presiones horizontales.

En la celda con tolva piramidal de 65º, la velocidad de la píldora en el interior de la celda es muy inferior al caso anterior. La densidad siguen siendo inferior a la de fluidificación.

En esta celda se ha colocado la píldora en las posiciones A, B y C. En la posición C, junto a la pared, la presión vertical es menor que en el centro, pero al entrar en la tolva sufre un incremento importantísimo. Este incremento brusco de presiones verticales y por tanto horizontales, en este tipo de tolvas piramidales, se ha de tener muy en cuenta a la hora de efectuar el diseño de las mismas, ya que pueden inducir a serios problemas de deformación y rotura.

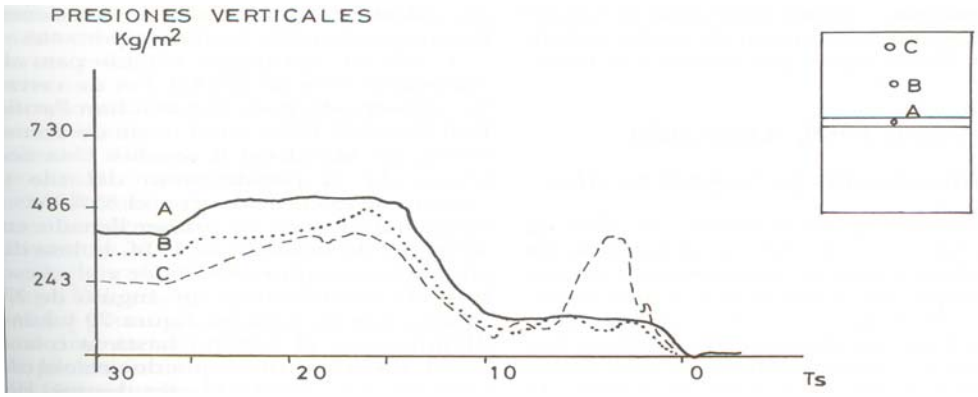


fig. 9. Experimentos realizados por una píldora radiosensitiva por Handley.

Conclusiones

1) En una celda podemos distinguir tres regiones claramente diferenciadas:

a) Por encima del arco de material, la velocidad y la densidad son constantes

b) En la región del arco dinámico, la densidad es mayor y muy parecida a la densidad de consolidación

c) Por debajo del arco, la densidad es muy pequeña, incluso inferior a la densidad de fluidificación y la velocidad es muy elevada, cinco veces superior a la del apartado a).

2) En el caso de la tolva cónica de 70º, el arco dinámico es una semiesfera de radio:

$r=\sqrt{r_2}/2$

siendo r_2 el radio de la tolva.

En el caso de tolva piramidal de 65º, el arco dinámico se forma por encima de la tolva.

3) Por debajo del arco dinámico, la densidad de la arena es de 1181 Kg/m^3 para la tolva cónica de 70º, y 1229 Kg/m^3 para la tolva piramidal de 65º. La densidad de la arena fluidificada es de 1389 Kg/m^3.

4) La baja densidad en las proximidades de la boca de salida es la causa de un flujo de salida bajo, de acuerdo con autores como Kuwai, Rauch y Brawn.

5) La medición de presiones dinámicas muestra diferencias en la magnitud de las presiones a lo largo del diámetro de la tolva y mayores en la proximidad de las paredes.

6) Los resultados experimentales obtenidos en la celda con tolva de 70º muestran la misma forma de esfuerzos que la rigurosa solución de Jenike y Johanson, para presiones en la sección convergente de la celda.

1.21. TEORÍAS DE JENIKE Y JOHANSON A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES.

Esta ecuación es la típica del flujo del sólido que produce un cizallamiento, destruyendo la isotropía del mismo. Durante el flujo, la densidad del sólido es función de las presiones. Cuando las presiones son constantes, el sólido sufre cizallamiento a densidad constante. Cuando las presiones se incrementan, el sólido se compacta, la densidad se incrementa. Cuando las presiones disminuyen, el sólido se expansiona, la densidad disminuye.

Asimismo se expresa la relación entre las presiones principales máxima y mínima e indica que esta relación es prácticamente constante para un amplio campo de magnitudes de las presiones.

A continuación vamos a definir una serie de conceptos básicos que nos permitan seguir el razonamiento de las presiones que pueden aparecer en la celda de un silo.

Estado activo y pasivo de presiones

En un estado activo de presiones, la presión máxima principal actúa en la vertical, o encierra la dirección vertical, mientras que en un estado pasivo de presiones la presión máxima actúa en la horizontal o encierra la dirección horizontal. El estado activo causa contracción vertical y entonces la contracción permite una expansión horizontal del sólido, mientras que el estado pasivo causa contracciones horizontales y expansiones verticales.

Canales de flujo

Es la parte de la masa del sólido dentro de la cual todas las partículas están en movimiento, al abrirse la compuerta de salida y producirse el flujo.

Celda de flujo másico

Cuando el canal de flujo coincide con las paredes y tolvas de la celda, se dice que la celda es del tipo flujo másico. Para que esto suceda, la tolva debe ser suficientemente inclinada y tener paredes muy lisas.

Celdas de flujo de embudo

Cuando se produce el canal de flujo dentro del propio material, quedando todo el material periférico en reposo y siendo el material del centro el que se mueve, existe en el contorno del embudo una zona de cizallamiento entre material en movimiento y material en reposo; a este tipo de flujo se le llama de embudo.

Campo de presiones radiales

Las presiones en un sólido, contenido en una tolva, tienen tendencia a disminuir hasta cero en el vértice de la tolva. Esto se ha demostrado experimentalmente por Jenike, Walker, Handley y Perry, y analíticamente por Smoltczyk y Jenike. Cuando la presión disminuye linealmente se dice que ocurre un campo de presiones radiales.

En el campo de presiones radiales, todas las presiones dadas a lo largo de una generatriz son proporcionales a la distancia al vértice. En general, el campo radial de la tolva no concuerda con el campo de presiones del cuerpo del silo y entonces aparece un campo de perturbaciones.

La perturbación consiste en una ola de sobrepresiones y bajas presiones superpuestas hacia el vértice de la tolva.

En el estudio de una celda aparecen tres tipos de cargas que pasamos a describir.

Cargas en una celda o silo

1) Cargas iniciales. Presiones activas

Consideremos la celda de la **fig 10.** A medida que se va llenando, la masa se contrae y se desarrolla un estado activo de presiones.

Como la masa se contrae, se desliza a lo largo de las paredes. Si la presión en cualquier punto de la pared es P, la fuerza de rozamiento que se desarrolla es:

$\nu = P \, tg\phi'$

La masa no alcanza el estado plástico, pero está en un estado elástico activo de presiones, tanto en el cuerpo de la celda como en la tolva.

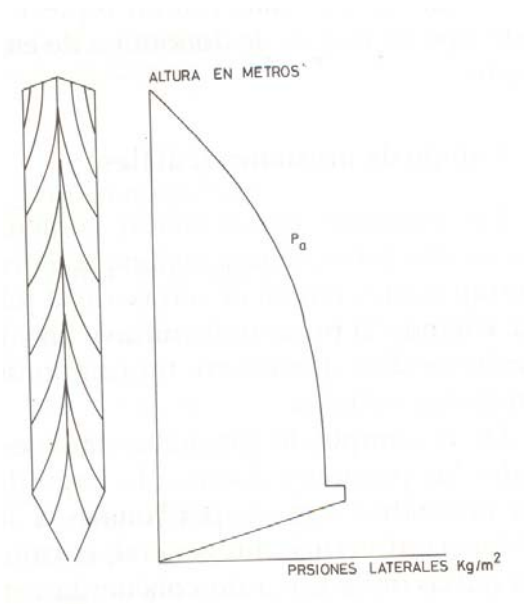


fig 10.Presiones activas al llenarse el silo

En este estado elástico-activo, las presiones laterales siguen una curva de acuerdo con la fórmula de Janssen hasta que alcanza la tolva; aquí hay un incremento de presiones y, a continuación, las presiones decrecen linealmente hasta cero en la boca de salida de la tolva.

2) Cargas de flujo. Presiones pasivas

Supongamos ahora que el sólido está fluyendo continuamente en la celda, y que la celda es de flujo másico. En este estado, la masa del sólido se contrae lateralmente y se expansiona verticalmente. Nos encontramos en un estado plástico pasivo de presiones.

Cuando el sólido se desliza a lo largo de las paredes, cuando fluye, la presión P está otra vez acompañada por una fuerza de fricción ν.

Las presiones se supone son del tipo de empuje pasivo de Rankine, aumentan rápidamente hasta un cierto valor y luego permanecen constantes. En la tolva hay un incremento brusco de presión y luego un descenso lineal hasta cero.

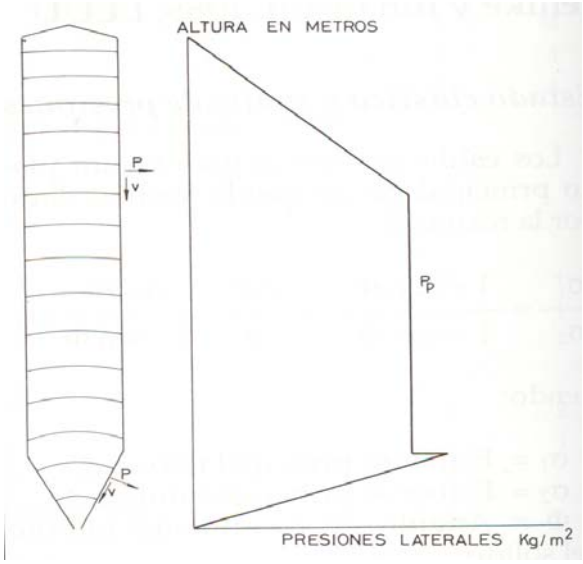


fig 11.Presiones pasivas al vaciarse el silo

3) Cargas de transición. Onda de sobrepresiones

En el diseño de una celda no es suficiente usar una envolvente de presiones de las cargas iniciales y de flujo. Es necesario también considerar las condiciones durante la transición del estado inicial al estado de flujo, o lo que es lo mismo, durante el paso de las presiones activas a las pasivas, fenómeno que sucede mediante una onda de sobrepresiones.

Supongamos una celda que está en condiciones de carga inicial y la boca de salida de la celda se abre. El soporte del sólido sobre la boca de salida es así cambiado o reducido y el sólido sobre la abertura se expansiona verticalmente hacia abajo. Esto reduce las presiones verticales dentro del sólido y causa una transición pasando al campo de presiones pasivas. La presión máxima principal produce arcos sobre la boca de salida. Cuanto más sólido es extraído, la región de flujo se extiende hacia arriba y con él la onda de sobrepresiones.

La fig 12 muestra el momento en que la onda de sobrepresiones se encuentra a la altura Z.

De la onda expansiva hacia arriba prevalece el estado de presiones activas y de la onda expansiva hacia abajo prevalece el estado de presiones pasivas o de flujo. El volumen rayado de sólido no pertenece a ninguno de los dos estados. Este volumen contiene sólido en transición del estado activo de presiones al pasivo.

Sabemos que la curva de presiones es proporcional al peso de la materia ensilada. A la altura Z, la curva de presiones ha disminuido al pasar del estado activo de presiones al pasivo; por tanto, el área rayada en la curva de presiones es igual o proporcional al volumen del sólido en estado de transición e igual a la fuerza P.

Para que exista equilibrio, esta fuerza se ha de aplicar en alguna zona y es el punto donde la onda expansiva toca a las paredes de la celda. En este punto se ejecutan dos fuerzas: una P normal a la pared y de valor el área rayada (de presiones) o del sólido y una fuerza de rozamiento $\nu = P\ tg\phi'$.

La fuerza concentrada P se desplaza hacia arriba con la onda, incrementándose hasta que llega a su valor máximo en la celda propiamente dicha, para luego ir decreciendo hasta cero en la parte superior de la celda.

La fuerza concentrada P que se desarrolla depende del tamaño de la celda, la compresibilidad del sólido y caudal de extracción. Una onda puede durar desde una fracción de segundo hasta valores mucho mayores. Una onda de sobrepresiones muy rápida probablemente es más peligrosa que una lenta, porque además puede contener una componente dinámica.

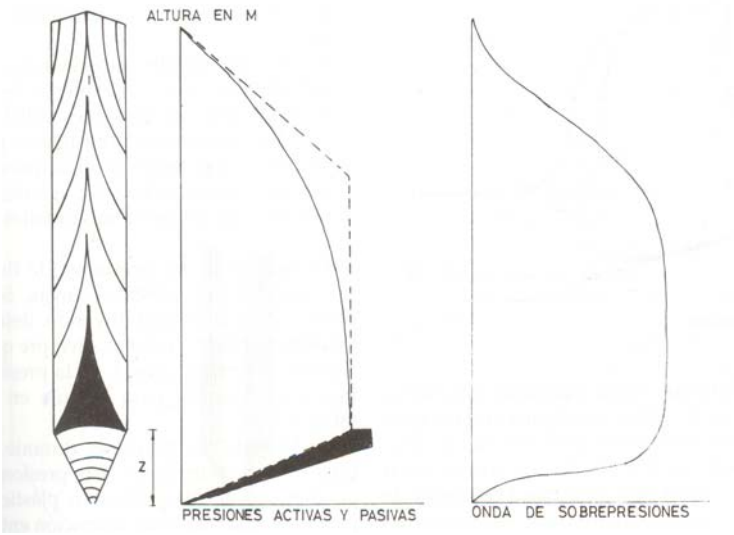


fig 12.Onda de sobrepresiones entre presiones activas y pasivas del silo.

Criterio que gobierna el desarrollo del flujo másico en una celda

Suponiendo que la boca de salida de la tolva es suficientemente grande para que el flujo suceda, el flujo másico requiere que se cumplan las dos condiciones siguientes:

1) La tolva debe ser suficientemente inclinada y lisa para que el campo de presiones de flujo, para un campo radial o perturbador radial, se desarrolle dentro de la tolva.

2) Las presiones ejercidas por el sólido, en la parte cilíndrica de la celda sobre el sólido en la tolva (presiones verticales), deben ser iguales o mayores que las presiones radiales.

La primera condición conduce al límite sobre la inclinación y el ángulo de rozamiento con la pared y es obtenida directamente de las ecuaciones de flujo.

La segunda condición parece satisfacerse cuando la fuerza total vertical ejercida en la unión de la celda con la tolva, por el sólido, excede a la fuerza vertical total del campo radial de la tolva.

En una tolva, las presiones de flujo sólo pueden ser plástico-pasivas. Pueden ser plásticas para el sólido fluyendo (deformación continua) y pueden ser pasivas tal que la presión del arco pueda ser la presión máxima, que es necesaria para el flujo en la parte convergente de la tolva.

En la parte cilíndrica de la celda, las presiones durante el flujo no son restringidas. Las presiones pueden ser plástico-activas o plástico-pasivas. En la región de transición entre las presiones activas y pasivas, las presiones pueden ser elásticas.

La fuerza vertical total Q en canales circulares de gran altura se representa por:

$$Q=q.D^3.\gamma$$

Siendo:

D= Diámetro del canal

γ= Densidad del sólido

q= Parámetro que depende de δ, θ_c, ϕ'.

δ=Ángulo efectivo de rozamiento del sólido.

θ_c= Ángulo de inclinación del canal.

ϕ'= Ángulo de rozamiento con la pared.

Los valores de Q, computados de la ecuación 3, se desarrollan sólo cuando hay una suficiente altura de sólido en el cilindro. La altura suficiente es alrededor de 0,5D a 0,75D para campos pasivos, siendo D el diámetro de la celda, y de 4 a 10 veces el diámetro para campos activos.

Cuando un sólido es extraído de la celda, la cabeza del sólido en la celda desciende continuamente.

Para una altura de sólido, las fuerzas verticales en la transición llegan a ser insuficientes para el campo de presiones radiales. Cuando esto suceda, cesa el flujo másico dentro de la parte superior de la tolva y se desarrolla un flujo de canal parcial. La fig... nos ilustra sobre la celda sin flujo másico (no flow).

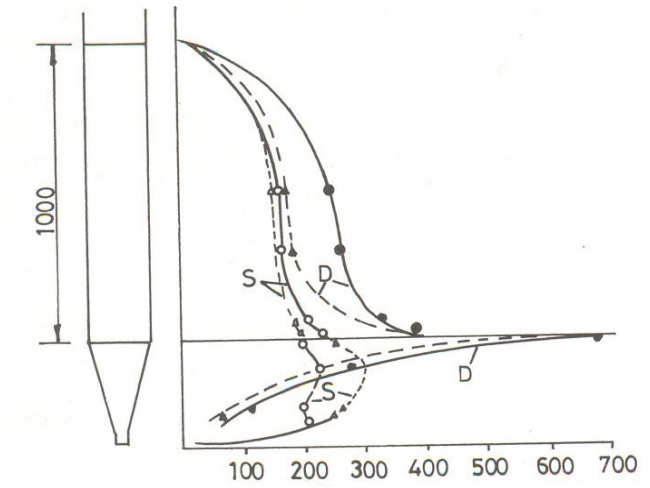


fig 13.Onda de sobrepresión de la conexión pared-tolva

Distribución de las fuerzas concentradas "P" producidas por la onda de sobrepresiones

Las fuerzas concentradas P se distribuyen sobre toda la altura de la celda. El límite superior para la presión máxima se obtiene suponiendo que el sólido es llenado plásticamente en el estado de transición de activo a pasivo.

Los valores de la relación P_{max}/P_a se han obtenido con una función del ángulo de rozamiento con la pared, para un ángulo efectivo de rozamiento del sólido $\delta = 50^o$, como puede verse en la fig...

Para un ángulo de rozamiento con la pared de $\phi' = 20^o$, la relación entre P_{max}/P_a es del orden de 45.

Tales valores no son posibles con sólidos relativamente blandos y elásticos, como grano, pero son posibles con rocas y gravas.

Estas presiones son muy difíciles de medir porque actúan sobre una banda muy estrecha de la pared y en algunos casos llega a ser más estrecha que muchas galgas extensométricas que se

han colocado en la pared. Estas presiones tan elevadas indican la amplia divergencia de los resultados obtenidos por los experimentadores al medir presiones en la pared.

Cargas en las celdas de flujo de embudo

Celdas de flujo de embudo son aquellas en las que no se produce flujo másico debido a que las tolvas no son lo suficientemente inclinadas y lisas. Entonces el flujo no discurre a lo largo de las paredes, sino solamente dentro del embudo que se forma y entonces la onda de sobrepresiones actúa sobre el material que permanece estático alrededor del embudo. Este material amortigua la carga concentrada P de tal manera que una galga extensométrica colocada en la pared de la celda no detectará sobrepresiones puntuales.

Ahora bien, si el flujo de embudo toca a la pared de la celda en una altura determinada, tal como se muestra en la **fig.14**, la onda de sobrepresiones produce el efecto de carga concentrada en este punto de intersección de la pared con la celda.

El flujo de canal en una celda de flujo de embudo no está positivamente definido. Las partes de la región de no flujo pueden estar en estado de presiones plásticas sin satisfacerse las condiciones de velocidad para el estado estable de flujo. Para nuestro caso, el ángulo de cono se supone $2\theta = 50^{o}$, $\theta = 25^{o}$ por lo que el embudo de flujo corta a la pared de la celda a una altura h=0,32 m a partir de la boca de salida.

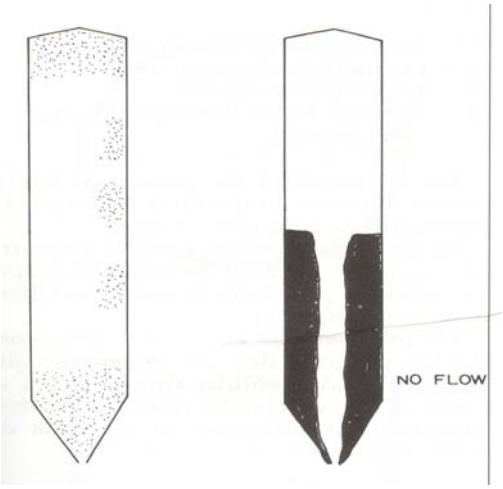


fig 14.Transición de flujo másico a flujo de conducto.

Dibujadas las curvas de presiones activas según Janssen y pasivas siguiendo la teoría de Rankine, del empuje de tierras obtenemos, por encima de 0,32 m, presiones activas y por debajo, presiones pasivas, y en este punto una sobrepresión puntual igual a la diferencia entre las presiones activas y pasivas por debajo de estos puntos. Repitiendo la operación para cada punto obtenemos la curva de sobrepresiones de vaciado.

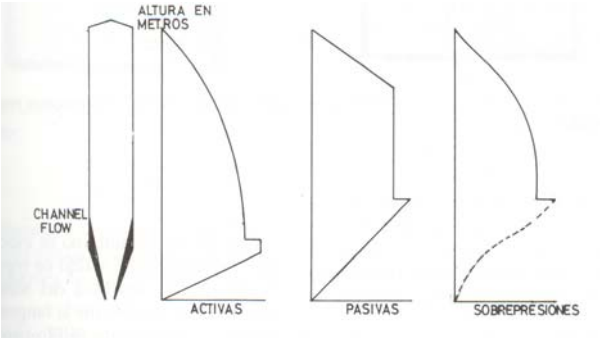


Figura.15. Onda de Sobrepresiones Pasivas

Vaciado centrado

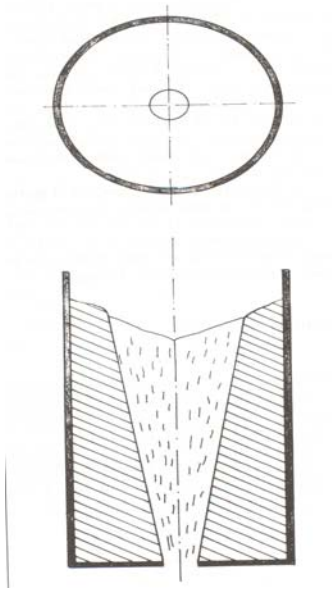


Figura.16. VACIADO CENTRADO

Vaciado excéntrico

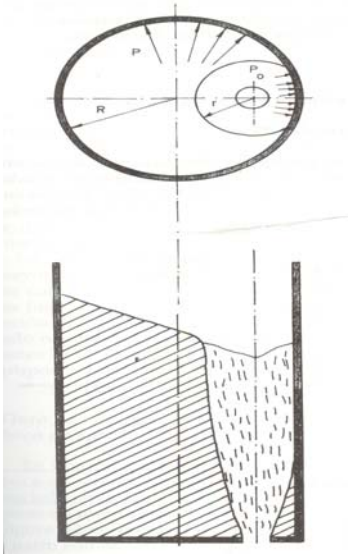


Figura.17. VACIADO EXCÉNTRICO

1.22. TEORÍA DE KLAUS PIEPER A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES. INVESTIGACIÓN MEDIANTE LA MEDICIÓN EN MODELOS DE LAS CARGAS EN SILOS

Ha realizado mediciones en modelos para la determinación de las presiones que aparecen en un silo durante el llenado y el vaciado.

El problema que se plantea es comprobar, mediante la teoría de modelos, que los resultados obtenidos en las maquetas han de ser transferidos a silos reales cuyas dimensiones pueden llegar a ser 40 veces mayores.

La fórmula clásica para la determinación de presiones horizontales es la ya conocida y desarrollada por Janssen.

En esta fórmula existen dos factores variables, que son:

r= F/U= radio hidráulico medio de la celda en metros e independiente de la forma de la celda.

$\mu' = tg\ \varphi'$= tangente del ángulo de rozamiento grano-pared.

La variabilidad de estos dos factores permite pasar de un silo real a una maqueta, utilizando la teoría de modelos y con la seguridad de que las presiones obtenidas en el modelo, comparativamente, serán proporcionales a las aparecidas en un silo real.

Efecto de la aspereza de las paredes del silo

El valor del ángulo de rozamiento de la pared del silo es de gran importancia para determinar la presión horizontal máxima.

Este ángulo de rozamiento grano-pared puede ser estático o dinámico (llenado o vaciado, respectivamente). El rozamiento estático es mucho mayor que el dinámico, lo que ya indica que durante el vaciado aparecerá una sobrepresión horizontal provocada por esta disminución del ángulo de rozamiento grano-pared.

Igualmente la rugosidad o finura de la pared afecta de forma decisiva a las presiones laterales. Así, en la fig... tenemos una serie de ensayos efectuados en una maqueta con cebada tostada.

Densidad: 780 Kg/m^3.

$\delta=\rho$

De tal manera que $\mu' = tg\ \delta = 0{,}56$.

A medida que los ensayos se fueron sucediendo, la pared se fue alisando y el ángulo de rozamiento grano-pared disminuyó, llegándose al valor:

$\mu' = 0{,}37.\ \delta = 0{,}71\ \rho$

Esto representa un aumento de la presión lateral de un 53%, o lo que es lo mismo, un coeficiente de sobrepresión de 1,53.

Ensayos realizados en la maqueta cuadrada, para paredes lisas y paredes onduladas, dieron los valores indicados en la **fig.18** para el silo de pared ondulada, el valor de la presión de vaciado es inferior al valor de la presión de llenado del silo de pared lisa.

Podemos ver en la **fig. 18**:

- un coeficiente de sobrepresión que aparece durante el vaciado en un silo de paredes onduladas es de 1,40;
- si se sustituye la pared ondulada por la pared lisa, durante el llenado ya aparece un coeficiente de sobrepresión de 1,40 y durante el vaciado el coeficiente de sobrepresión pasa a 2.

Efecto de la velocidad de vaciado

En los ensayos efectuados en maquetas a escala reducida se ha podido comprobar que el caudal de llenado y vaciado no afecta a corto plazo al incremento de presiones laterales. No obstante, se pudo comprobar que después de 10 llenados, las presiones horizontales aumentaron aunque de una forma restringida; no obstante, este aumento no se debe al caudal de vaciado sino más bien a la modificación del ángulo de rozamiento producto ensilado-pared.

En cambio, en vaciados excéntricos y boca de salida ranurada parece ser que sí influye el caudal de vaciado, como más adelante veremos.

Comportamiento de materiales muy finos

Cuando productos muy finos, como polvos, son almacenados, el proceso de llenado se produce con una gran cantidad de aire. Como resultado de esta aireación, el ángulo de rozamiento interno del producto almacenado prácticamente es nulo y la masa se comporta como un fluido. La presión lateral es muy elevada. A medida que transcurre el tiempo, el aire va siendo eliminado de la masa y la presión lateral disminuye.

Las características del cemento según la variación de la presión horizontal con el tiempo de almacenamiento son:

Densidad: 1700 Kg/m^3 ρ: 20º δ: 20º λ: 0,50.

El coeficiente de sobrepresión en el momento de llenado en comparación con la norma alemana DIN 1055, hoja 6 es de 2,22.

Paradójicamente, en estos silos las sobrepresiones se producen durante el llenado y a medida que transcurre el tiempo de almacenaje la presión disminuye.

Propiedades de los productos ensilados

El ensayo de determinación de presiones laterales, de una serie de productos, muestra el comportamiento de estos materiales al ser almacenados cereales tales como malta, que

presentan un incremento de presiones laterales del 17% en comparación con los aparecidos generalmente al ensayar otros cereales.

En grandes silos, la densidad que se suele tomar es de 900 Kg/m^3.

Cuando se efectuaron ensayos con cemento (clínker) se midieron fuertes fluctuaciones en las presiones debidas a la formación de arcos intermitentes a una cierta distancia de la boca de salida. Cuando un arco se rompe, hay una bajada brusca de presión que vuelve a aumentar al formarse otro arco o bóveda. Bajo el arco sólo un incremento de presiones puede producirse.

El comportamiento de este material puede producir serios daños en los grandes silos de almacenamiento.

En la fig... podemos ver estas fluctuaciones de las presiones laterales, así como su posición dentro del silo.

Conclusiones

- La serie de ensayos realizados midiendo presiones laterales y sobre el fondo, nos ha permitido conocer la importancia de las relaciones físicas que dictan el comportamiento de la masa ensilada

- Los resultados obtenidos demuestran que las especificaciones o normas estándar para el cálculo de silos, no son totalmente correctas, sino que, por el contrario, son erróneas en una serie de detalles que se han de tener en cuenta si se quiere acometer el diseño de un silo con todo éxito.

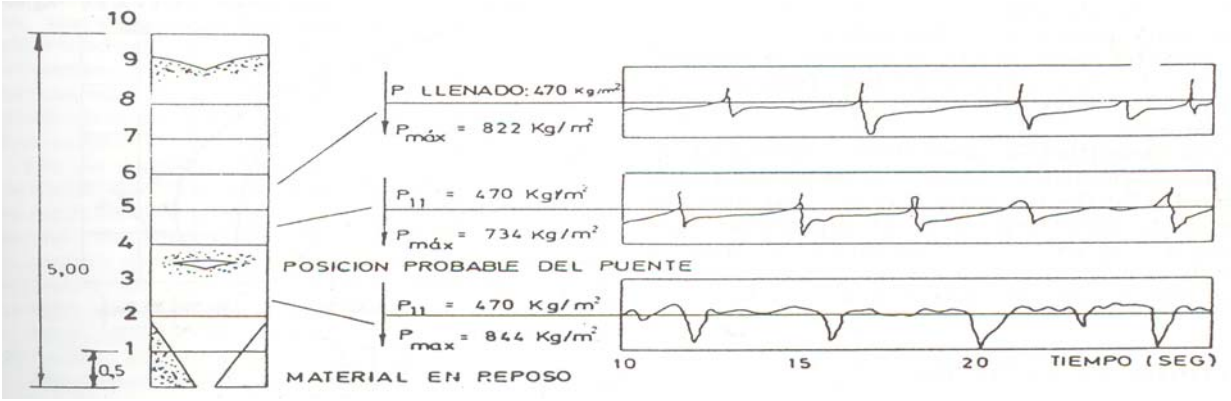


Figura.18. VALORES DE LAS PRESIONES DE LLENADO

1.23. TEORÍA DE THEIMER A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES. FALLAS EN SILOS DE HORMIGÓN ARMADO PARA GRANOS

Causas más frecuentes de fallas en silos

1) En cimientos por concentración de altas cargas en superficies relativamente pequeñas.

2) Gran esbeltez de las estructuras azotadas por el viento y cargas de una forma disimétrica

3) Conocimiento dudoso de las presiones reales que aparecen en el silo durante e llenado y el vaciado

4) Falta de experiencia en la planificación y análisis estático de tales estructuras

Prácticamente todos los silos de hormigón armado tienen más o menos grietas microscópicas que, debido al llenado y vaciado continuo y en silos que no son de hormigón armado pretensado, se incrementan.

Estas grietas hasta 0,2 a 0,3 mm no son peligrosas. Ahora bien, cuando pasan de 4 a 5 mm, la seguridad de la celda está en peligro.

Inexperiencia en el cálculo de presiones estáticas y dinámicas

Las presiones en las paredes de los silos dependen fundamentalmente de las siguientes variables:

1) Peso específico del producto ensilado
2) Ángulo de rozamiento interno del producto ensilado
3) Ángulo de rozamiento con la pared de la celda

La conocida fórmula de Janssen, usada durante muchos años por ingenieros y calculistas, contiene otro importante factor K igual a la relación entre presiones horizontales y verticales.

El valor de K ha sido ampliamente debatido y así:

- las normas USDA dan a K el valor de 0,6
- las modernas normas DIN 1055 dan a K el valor de 0,5 para las presiones estáticas y 1,00 para las presiones dinámicas
- Koenen introduce un valor de K igual a:

  $K= (1-\text{sen}\phi)/(1+\text{sen}\phi)$

  En correlación con la teoría de Rankine de mecánica del suelo para $\phi= 30^{o}$ resulta un valor de K= 0,333

- Los ingenieros rusos usan el valor de K=0,5 para las presiones estáticas.

Otro factor incierto es el ángulo de rozamiento con la pared de la celda.

Las normas DIN 1055 no dan ningún valor específico para los diferentes materiales de la pared de la celda. Ahora bien, para silos de hormigón armado y presiones estáticas, el valor que se especifica es 0,75 ϕ y para las presiones dinámicas 0,60 ϕ. Siendo ϕ el ángulo de rozamiento interno del grano.

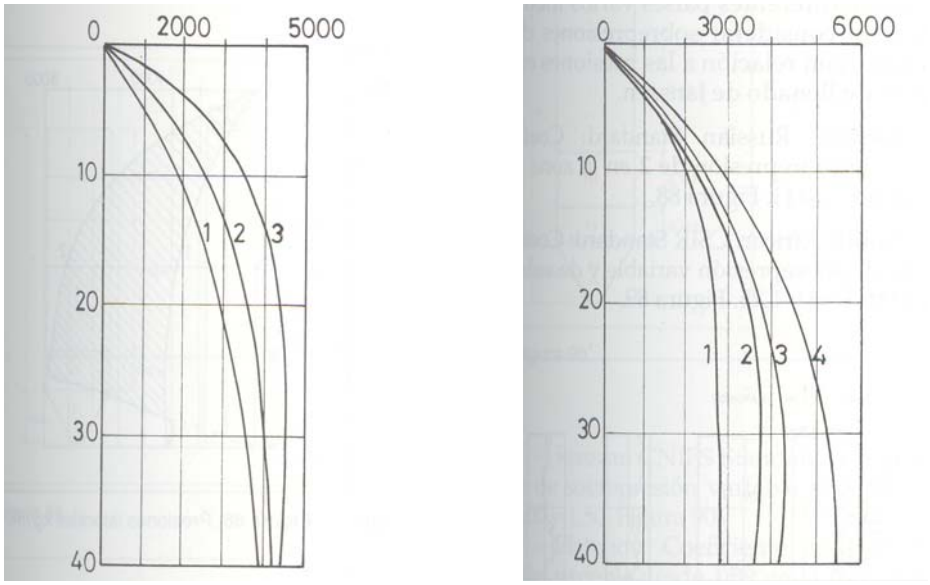


Figura.19. VALORES DE LAS PRESIONES DE LLENADO Y DE VACIADO

Sobrepresiones de vaciado

Las presiones dinámicas que aparecen durante el vaciado y que son mayores que las estáticas, han producido gran polémica debido a la falta de acuerdo que existe entre especialistas para

determinar los valores de estas presiones de vaciado, en función de las presiones estáticas de llenado y que fueron perfectamente definidas por Janssen.

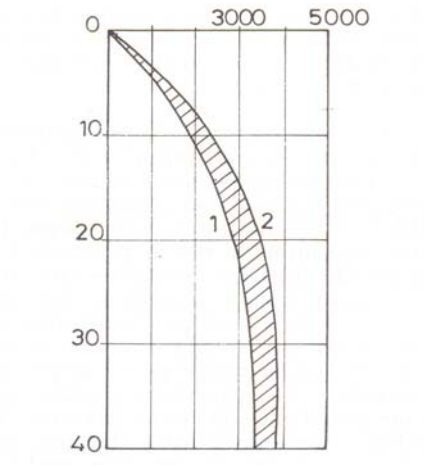


Figura.20. VALORES DE LAS PRESIONES DE VACIADO

- los alemanes generalmente usan en sus silos de hormigón armado un incremento del 10%.
- El Dr. Nakonz aplica unos coeficientes de sobrepresión, basados en los ensayos realizados por Reimbert en Francia.

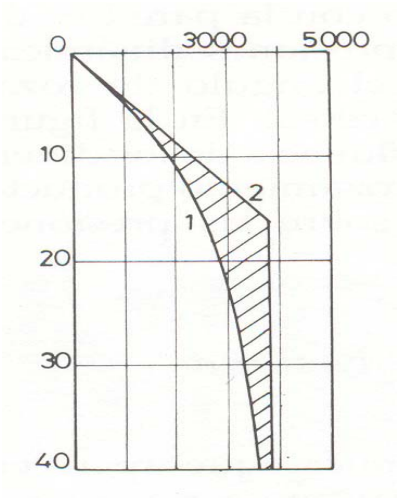


Figura.21. VALORES DE LAS PRESIONES DE VACIADO

- Las primera especificación alemana oficial aplica, para las sobrepresiones, un incremento aproximado del 37% con relación a las presiones estáticas y en la parte baja de la celda. El autor cree que este incremento de presiones es insuficiente, ya que otros especialistas han medido en silos reales incrementos mayores.

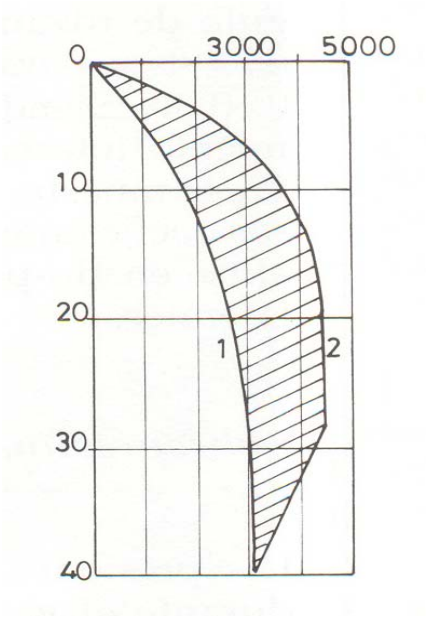


Figura.22. VALORES DE LAS SOBREPRESIONES DE VACIADO

- Platonov, en Rusia, ha obtenido coeficientes de sobrepresión del 232%. Las sobrepresiones, cuando el grano está vaciándose, son causadas, no solamente por la reducción del ángulo de rozamiento interno, sino también por la acción de arqueamiento del grano en el interior de las celdas.

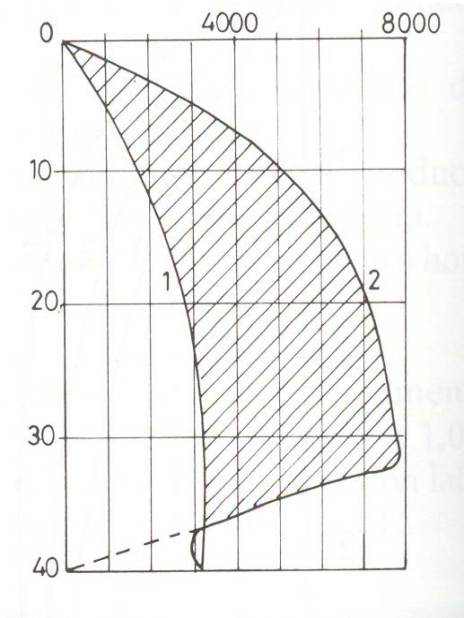


Figura.23. SOBREPRESIONES DE VACIADO SEGÚN PLATONOV

- Cuando el peso del grano sobre el arco crea tensiones mayores que las que soporta, se produce la rotura y aparecen oscilaciones en las paredes de la celda. Platonov y Franz han medido presiones producidas por esta oscilación en silos reales y en función del caudal de vaciado.

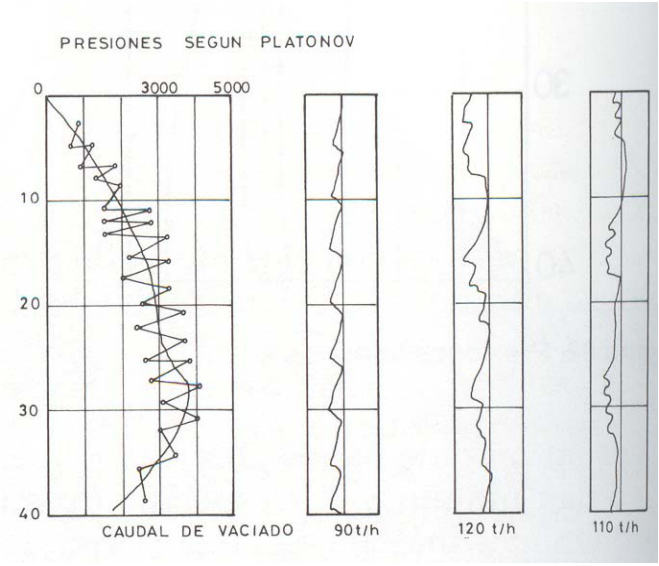


Figura24.FLUCTUACIONES PRODUCIDAS POR LAS BÓVEDAS

De acuerdo con estas experiencias y estudios realizados y anteriormente expuestos, varios métodos para considerar sobrepresiones de vaciado han sido introducidos y usados en diferentes países. Todos estos incrementos se han considerado con relación a las presiones estáticas de llenado de Janssen.

Valores de los coeficientes de sobrepresión:

1) Official Russian CSIR Standard: coeficiente de sobrepresión de 2 en la zona II, de altura 0,50 H.

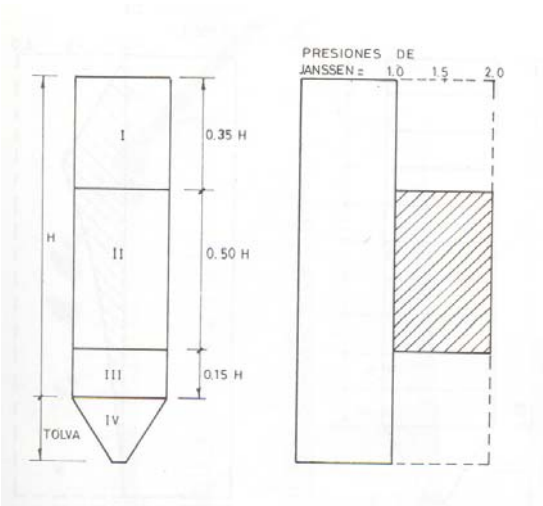


Figura.25.COEFICIENTES DE SOBREPRESIÓN OFFICIAL RUSSIAN

2) South African CSIR Standard: coeficiente de sobrepresión variable y de valores 2, 1,5, 1,25.

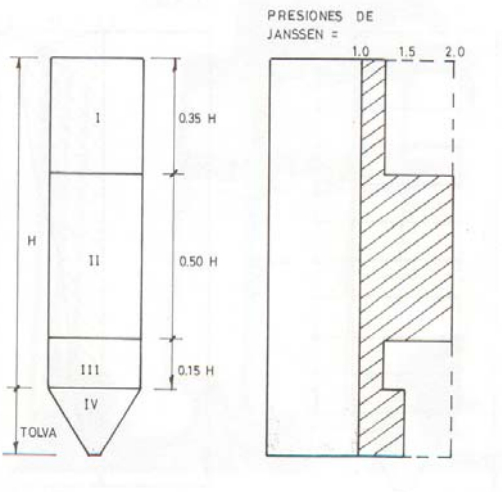


Figura.26.COEFICIENTES DE SOBREPRESIÓN SOUTH AFRICAN

3) Rusian CNIPS Standard: coeficiente de sobrepresión variable y de valores 2 y 1,5

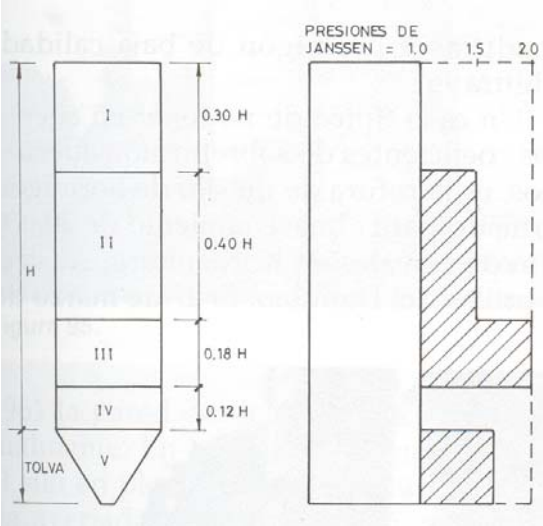


Figura.27.COEFICIENTES DE SOBREPRESIÓN RUSSIAN CNIPS STANDARD

4) Platonov: coeficiente de sobrepresión variable, desde 1,89 a 2,32.

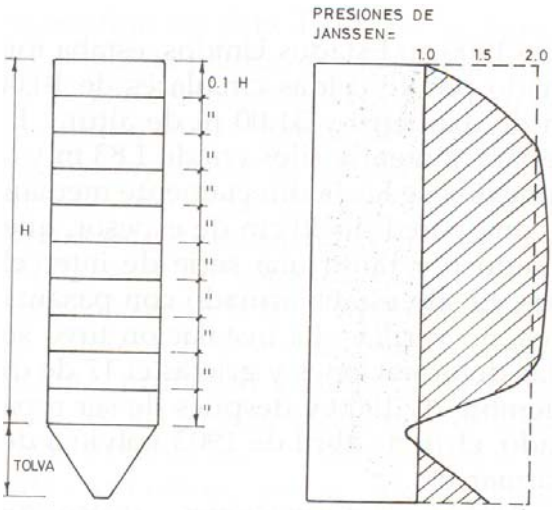


Figura.28.COEFICIENTES DE SOBREPRESIÓN DE PLATONOV

5) Norma Din 1055, hoja 6: coeficiente de sobrepresión máximo de 1,80 en la parte alta de la celda, en la parte baja de 1,28.

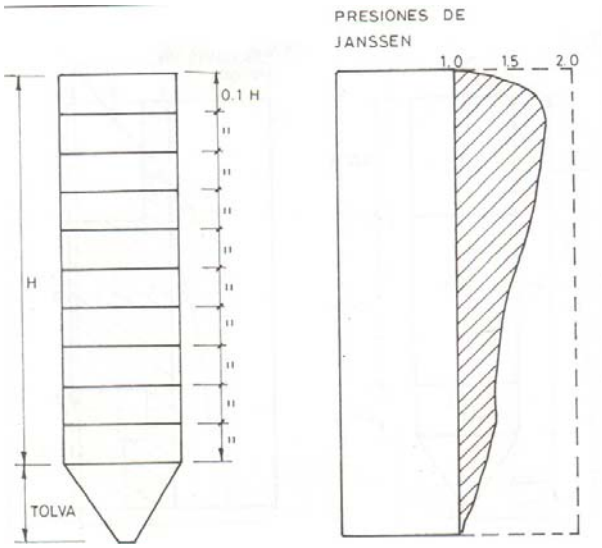


Figura.29.COEFICIENTES DE SOBREPRESIÓN NORMA DIN 1055

6) Nakonz: coeficiente de sobrepresión de 1,58 en el tercio superior de la celda, para decrecer hasta cero en la parte inferior de la misma.

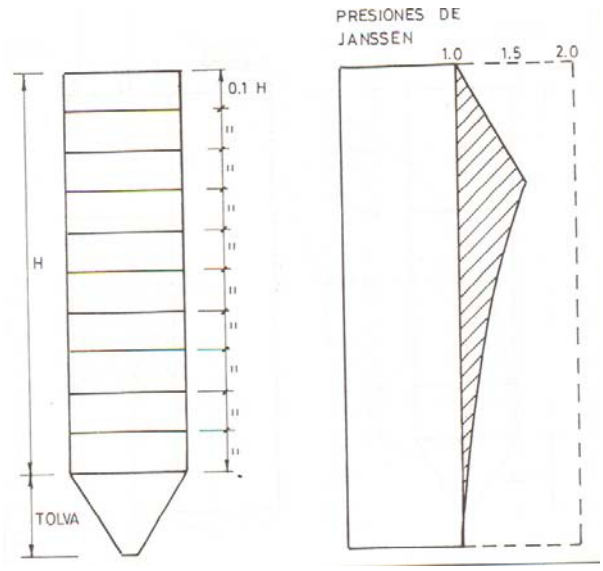


Figura.30.COEFICIENTES DE SOBREPRESIÓN DE NAKONZ

Presiones dinámicas previstas por Theimer

En la fig ... pueden verse los coeficientes de sobrepresión calculados por Theimer para el caso de celdas interiores.

Divide la altura del silo en tres partes: la parte superior igual a 0,3H y con el coeficiente de sobrepresión aumentado linealmente hasta 1,5. Segunda zona central de valor 0,6H y con un coeficiente de 1,5. La tercera zona inferior y de valor 0,1H y cuyo coeficiente disminuye linealmente hasta la unidad.

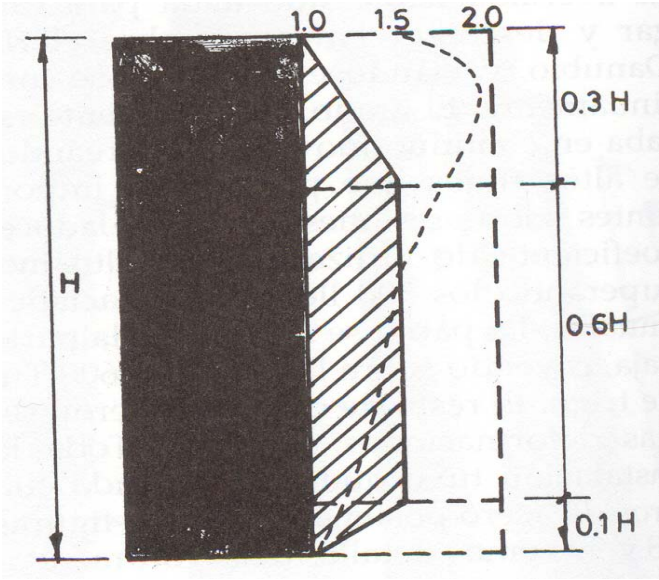


Figura.31.COEFICIENTES DE SOBREPRESIÓN DE THEIMER

Para el caso de celdas exteriores aparecen tres zonas muy diferenciadas de las anteriores.

Zona 1: la superior, y de altura 0,6H, el coeficiente de sobrepresión aumenta linealmente desde uno hasta dos.

Zona 2: La intermedia, y de altura 0,3H, con un coeficiente de sobrepresión de 2.

Zona 3: La inferior, y de altura 0,1H, el coeficiente de sobrepresión disminuye linealmente de 2 a 1,5.

Estos valores se han comprobado con las normas DIN 1055, hoja 6.

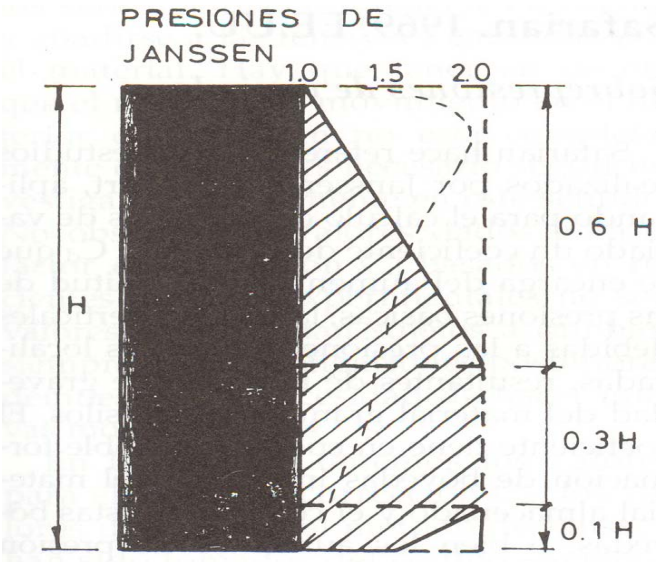


Figura.32.COEFICIENTES DE SOBREPRESIÓN DE THEIMER ZONA 3

Theimer, en sus estudios y experiencias, ha podido constatar que en los últimos años han aparecido más problemas en silos que en las instalaciones construidas a principio de siglo.

Esto es debido a que el coeficiente de seguridad del hormigón y de la armadura de las primeras décadas era de n=2,50.

Sin embargo, la introducción de altos límites elásticos en el acero y el uso del mínimo hormigón fabricado de la mejor calidad según nuevas especificaciones, reduce el margen de seguridad a n=1,75.

Vaciado excéntrico

Theimer efectúa un estudio comparativo de las diversas teorías en caso de vaciado centrado y vaciado excéntrico. En la fig 103, se han dibujado las diversas curvas de presiones. En primer lugar, la curva de Janssen para presiones estáticas. A continuación la curva de presiones de vaciado según la norma DIN 1055 hoja 6. También se ha dibujado la curva de presiones de Platonov y la curva de presiones para el caso de vaciado excéntrico. Todo ello para el caso de silos de hormigón armado cilíndricos. Se ha dibujado además dos curvas, que son, respectivamente las de presiones con coeficientes de seguridad de n= 1,75 y n= 2,50. Se comprende que en el caso de vaciado excéntrico, el coeficiente de seguridad de n= 1,75 no es suficiente, sobre todo en los dos tercios superiores del silo, donde pueden aparecer grietas. Se recomienda, para el caso de vaciado excéntrico, un coeficiente de seguridad de 2,50.

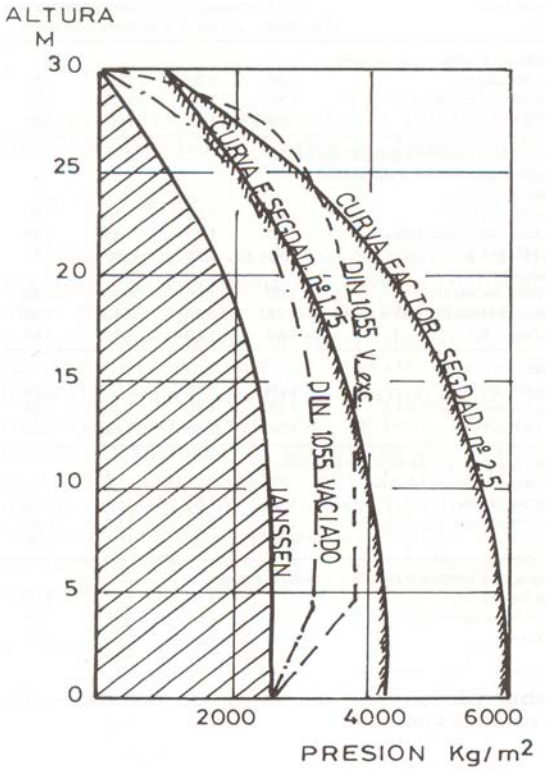


Figura.33.COEFICIENTES DE SOBREPRESIÓN DE DIVERSOS AUTORES

1.23. TEORÍA DE SARGIS S. SAFARIAN A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES. PRESIONES DE DISEÑO DE LOS MATERIALES GRANULARES EN SILOS

Safarian hace referencia a los estudios realizados por Reimbert y Janssen y para el cálculo de presiones de vaciado aplica un coeficiente de corrección C_d que se encarga del aumento en magnitud de las presiones básicas, laterales y verticales debidas a las presiones dinámicas localizadas, resultantes de la fuerza de gravedad del material granular en los silos.

El coeficiente tiene en cuenta la posible formación de arcos del material ensilado, el colapso de estos arcos, o bien los aumentos de presión debido a la aireación.

Este coeficiente no tiene en cuenta efectos de temperatura del material al ser almacenado en caliente, tal como cemento, clínker, etc; esta temperatura produce unas tensiones en las paredes de los silos que deberán ser calculadas y añadidas a las tensiones causadas por el material.

Hay que tener en cuenta que el material granular en movimiento en el interior del silo aún no está completamente definido y es necesario seguir investigando activamente en este sentido. No obstante, los valores dados para el factor de corrección C_d, basados en recientes estudios experimentales, no son valores fijos, pero están sujetos a cambios si los estudios que se seguirán demuestran la necesidad de hacer nuevas modificaciones.

En la tabla I tenemos los valores para el factor de corrección C_d; los valores de uso con el método de Janssen han sido tomados del código soviético de silos CH-65 con pequeñas modificaciones.

El valor de C_d en el Código Soviético está representado por dos factores diferentes: el factor de sobrepresión como numerador y el factor servicio del silo como denominador. Los valores para uso con el método de Reimbert han sido computados con los del método de Janssen.

La unidad de cálculo de las presiones se expresa como sigue:

Cálculo de la presión vertical unitaria $(q_y)_{des} = C_d\, q_y$

Cálculo de la presión lateral unitaria para silos con apertura de descarga concéntrica: $(P_y)_{des} = C_d P_y$

Cálculo de la presión normal sobre la superficie inclinada de la tolva:

$(q_y)_{des} = (P_y)_{des}$ sen ^{2}a + $(q_y)_{des}$ cos ^{2a}

Cálculo de la curva de presiones laterales prevista

Los numerosísimos ensayos efectuados han dado infinidad de curvas de presiones obtenidas durante la descarga del material almacenado e indican que pueden aparecer sobrepresiones dentro de los dos tercios inferiores de la altura de un silo, mientras que, comparativamente, hay un pequeño exceso de presiones en la parte superior del silo. Siguiendo este fenómeno de la distribución de presiones, para establecer una curva práctica de presiones laterales, la altura total del silo ha quedado dividida en tres zonas de presión:

Zona 1

Esta zona comprende la parte superior del silo definida por la dimensión:

$H_1 = D.\ tg\ \phi$

Se caracteriza por el insignificante efecto de arqueamiento del material almacenado. Es la zona en la cual algunos expertos consideran la fórmula de Rankine valedera para el cálculo de la presión lateral estática unitaria siempre que sea incrementada por un factor, considerando el tamaño y forma del silo. El factor de corrección dentro de esta zona, y para todos los silos de hormigón, fue considerada como C_d = 1,35 para el método de Janssen y C_d = 1,00 para el método de Reimbert.

Zona 2

Esta zona incluye los dos tercios inferiores del silo. Se caracteriza por la acción de arqueamiento del material almacenado y por tanto de grandes presiones laterales. El factor de corrección dentro de esta zona varía en función del tipo de estructura y de acuerdo con la tabla I.

Zona 3

La curva de presiones en esta zona se considera que es una línea recta. Comprende la presión máxima de la zona 1 y la mínima de la zona 2.

Cuando H_1 es igual a H/3, la línea es horizontal.

1.24. TEORÍA DE LUMBROSO A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES. DETERMINACIÓN NUMÉRICA DE LOS ESFUERZOS EJERCIDOS POR LA MASA ALMACENADA EN LOS SILOS

El presente estudio tiene por objeto la determinación numérica de los esfuerzos ejercidos por los medios pulverulentos sobre las paredes de los silos cilíndricos.

Se supondrá:

- En el caso de que el silo lleve tolva, en su parte inferior, su altura no será una fracción importante de la altura total del silo.
- La sección recta de la parte cilíndrica del silo tiene dos ejes de simetría.
- Las paredes del silo son rugosas.
- El material ensilado está en principio seco.
- El hecho de clasificar como pulverulento el medio almacenado significa que su curva intrínseca se puede asimilar a dos semirrectas pasando por el origen.

Designamos por:

φ = Ángulo de rozamiento interno del material (en grados).

ψ = Ángulo de rozamiento material-pared del silo (en grados).

ω = Peso específico en t/m^3.

Se supone que el silo no está dotado de dispositivos antidinámicos que puedan anular los efectos dinámicos producidos durante el vaciado. Examinaremos la influencia de las dimensiones de las celdas sobre la validez de las teorías exponenciales de Janssen. Estudiaremos las variaciones del peso específico y el ángulo de rozamiento interno dentro de un mismo silo.

Origen experimental de las teorías exponenciales y las dimensiones de los silos

La teoría de Janssen con presiones laterales del tipo exponencial se basa en el estudio del equilibrio de una rebanada elemental de masa ensilada.

Tanto en los ensayos a escala real, como en maquetas, se han considerado las siguientes características:

1. Radio hidráulico medio R, de la sección recta, inferior a dos metros, lo que equivale a decir que para el silo cilíndrico el diámetro ha de ser inferior a 8 m.

2. Relación h/R. Altura del silo, radio hidráulico medio superior a 15 (relación altura-lado superior a 3,5).

Los ensayos efectuados por Prante, Luft, Pleissner y Reimbert en silos reales cumplían las características de relación diámetro-altura. Jamieson, Pieper y Wenzel, en los ensayos efectuados en maquetas a escala reducida, tuvieron en cuenta estas relaciones.

El diámetro del silo influye de una forma decisiva a la hora de determinar las presiones laterales. Por tanto, se han previsto tres grandes grupos de silos cilíndricos en función del diámetro:

1) Silos con diámetro inferior a 8,00 m.

2) Silos con diámetro comprendido entre 8,00 y 20,00 m.

3) Silos con diámetro superior a los 20,00 m.

El profesor Wastlund prevé una curva lineal igual a p= 0,414 Z. Estas curvas coinciden aproximadamente con la DIN 1055 de llenado. Se ha dibujado también la curva de vaciado según las normas alemanas y la misma curva reducida por el efecto de la boca de salida. Este resultado podemos verlo en la fig...

Valores estimados de W,φ,ψ

Es muy interesante efectuar una perfecta estimación de estos tres valores: ángulo de rozamiento interno y ángulo de rozamiento con las paredes del silo.

Los valores de W varían en función de la altura y diámetro del silo. Tomar correctamente los coeficientes para el cálculo es decisivo en el éxito de una instalación.

Pieper y Wenzel efectuaron ensayos en silos reales y en maquetas para determinar los valores de ψ/φ durante el llenado y el vaciado y para varios tipos de arena y trigo. Se llegó a la conclusión de que se podía considerar para el caso de paredes de hormigón lisas:

$$\text{tg}\ \psi / \text{tg}\ \varphi = 0{,}866 = \text{constante.}$$

Variación de las presiones sobre las paredes

Ensayos realizados en la URSS y descritos por Leonhardt, Boll y Spiedes demuestran que existen considerables variaciones de la presión horizontal a lo largo de la sección recta de la pared.

Así la fig... muestra el gráfico de las presiones horizontales producidas por el cemento en una celda cilíndrica de hormigón armado en el silo de Amjansk, de 8,1 m de diámetro y 16,9 m de altura. En el momento de la medición, la altura del cemento en el interior de la celda era de 12 m y la sección considerada se encontraba a 4,90m de la cota cero.

En la fig.. vemos otra medición realizada en el silo de Octobre de 10 m de diámetro y 25 m de altura, sección considerada para la medición a 4,50 m del suelo y celda completamente llena. Los resultados de las presiones están expresadas en t/m^2.

1.25. TEORÍA DE GARG A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES. PRESIONES MÁXIMAS DE LOS MATERIALES GRANULARES EN SILOS.

Se efectuó un estudio de las teorías de los principales especialistas y se comparan los resultados obtenidos; todas las teorías han sido ampliamente estudiadas en este texto excepto las de Kovtum y platonov, cuyo texto es ampliamente tratado por Garg.

En la **fig 34.** puede verse la altura total del silo, dividida en tres zonas claramente diferenciadas.

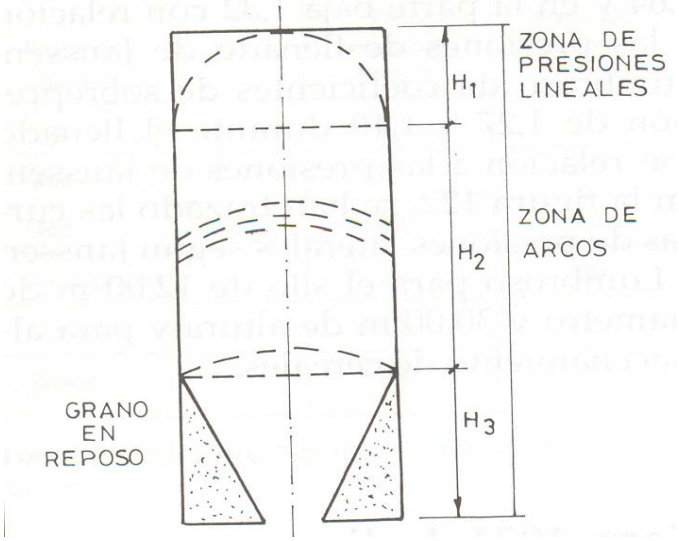


Figura.34. ESTADOS DEL MATERIAL ALMACENADO A DIFERENTES ALTURAS SEGÚN GARG.

Zona 1

De altura H_1 y donde no se forman arcos del material ensilado

Zona 2

De altura H_2, es susceptible de formación de arcos en el material y la presión máxima aparece en su parte más baja y justo por encima de la tolva.

Zona 3

De altura H_3, corresponde a la parte inferior de la celda, existe una zona en la que el material se encuentra en reposo y transmite las cargas dinámicas de forma uniforme sobre las paredes. Las presiones laterales son inferiores a las de la zona anterior.

Vaciado excéntrico

Bajo la iniciativa de Garg, Pieper y Wagner se realizan ensayos en maquetas cuadradas en el año 1968, utilizando como producto a almacenar arroz del Congo. Se efectuó un vaciado excéntrico a través de una boca de salida alargada y se comprobó que el comportamiento del arroz era diferente a otros materiales granulares tales como arena o trigo.

Para el caso de vaciado centrado, las sobrepresiones de vaciado fueron solamente el 20%. Para el vaciado excéntrico del 50% y del 100%, las sobrepresiones solamente aumentaron en un 7%.

Cuando se realizó un vaciado excéntrico a través de una boca de salida alargada figura 124, el incremento de presiones fue del 95% y 112% en las paredes próximas y opuestas a la boca de salida y comparada con la máxima presión lateral durante el vaciado centrado.

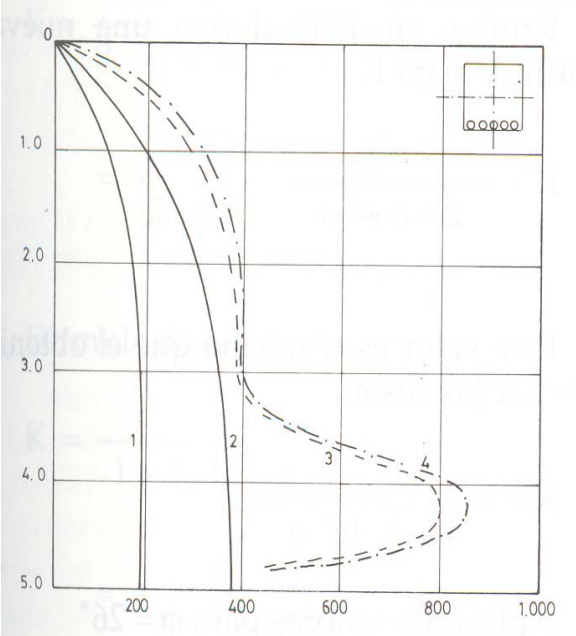


Figura.35. COEFICIENTES DE SOBREPRESIÓN SEGÚN GARG.

2. FORMAS DEL FLUJO DE VACIADO EN LOS PRODUCTOS GRANULARES. PRODUCTOS GRANULARES.

2.1. INTRODUCCIÓN.

En este capítulo vamos a estudiar los productos granulares cuyo tamaño varía entre 30 y 5 mm y cuya más importante característica es la de no ser cohesivos.

En este grupo podemos enmarcar perfectamente a productos agrícolas, tales como cereales, productos químicos de toda índole y forma, productos mineros, de la industria del acero, áridos procedentes de canteras,...

Dados los límites máximos y mínimos de variación en el tamaño de las partículas, comparadas con las dimensiones de la boca de salida necesaria para garantizar un caudal de llenado o vaciado acorde con los procesos de diseño, resulta normalmente que para caudales de 100 tm/hora la dimensión de la boca de salida suele ser de 300 mm.

El valor de “m”, igual a la relación entre la dimensión de la boca de salida a la dimensión máxima de las partículas, es en nuestro caso:

m= 300/30= 10

para caudales muy pequeños la dimensión de la boca de salida es de 150 mm. Luego m vale:

m= 150/30= 5

Resulta que m≥5 por lo que el flujo de vaciado siempre es estable no presentándose arcos o bóvedas que pueden interrumpir el caudal de vaciado.

El valor crítico de m< 4,21 los arcos o bóvedas son frecuentes y estables y el caudal de salida no solamente no es constante sino que puede interrumpirse por la formación de bóvedas estables.

Para valores de m>4,21 la formación de bóvedas o arcos estables no existe, el flujo de vaciado es libre, el causal se mantiene y no existen problemas de vaciado.

Podemos decir que para m<4,21 la formación de arcos no solamente sobre las paredes de la tolva, sino sobre las paredes verticales del silo, es constante, aunque la rotura de estos arcos o bóvedas es continua ya que no tienen consistencia suficiente para soportar el peso del material que gravita sobre ellos.

Como más adelante veremos esta formación y rotura constante de arcos de origen a unas oscilaciones de la masa ensilada, que se traducen en presiones laterales oscilantes sobre las paredes del silo.

2.2. EL FLUJO DE VACIADO DE LOS PRODUCTOS GRANULARES.

En la historia del diseño y construcción de silos, la mayor cantidad de problemas estructurales (deformaciones, grietas, hundimientos) corresponden a silos para almacenamiento de productos granulares. Esto nos indica el desconocimiento que existe, tanto del comportamiento, como de las presiones que aparecen en las paredes del silo. Aun hoy en día, personas que se creen especialistas, afirman que lo que sucede en el interior de un silo es imposible de conocer, ya que el producto granular ensilado no sigue ninguna ley preestablecida.

El objeto de este capítulo es estudiar la forma del flujo vaciado de los productos granulares, para a continuación poder determinar las presiones que este producto almacenado transmite a las paredes y así poder diseñar un silo con las máximas garantías de seguridad.

2.2.1. FORMA DEL FLUJO DE VACIADO SEGÚN KVAPIL.

El flujo de vaciado corresponde a un silo alto es decir un silo con relación altura-lado, o diámetro igual o mayor a 7. En la fig... se ha dibujado la forma del flujo durante el vaciado.

Existe una parte superior dotada de un movimiento primario que se produce a través del conducto de vaciado o canal de vaciado que se forma dentro del silo. Inicialmente se forma un elipsoide de revolución denominado primario que afecta prácticamente a toda la celda, para luego formarse el elipsoide de revolución secundario.

Cuando ya se ha estabilizado el proceso de vaciado, fig... el elipsoide de vaciado queda perfectamente definido por sus dos semiejes a, el mayor y b, el menor. Existe una zona de

alimentación del elipsoide que tiene un límite superior, por encima del cual el material se mueve uniformemente (flujo másico).

También existe una zona de material en reposo y que permanece en contacto con las paredes.

Las dimensiones del elipsoide de revolución dependen tres factores:

1) Dimensión boca de salida, caudal de vaciado y pendiente de la tolva.
2) Grado de rugosidad de las paredes.
3) Ángulo de rozamiento interno del producto granular.

Para paredes muy finas y tolvas pendientes, incluso puede desaparecer el elipsoide de vaciado, produciéndose un vaciado de flujo másico, tal como Jenike lo define en sus estudios.

De acuerdo con la fig... podemos predecir las presiones laterales que el producto granular ejerce sobre las paredes del silo:

1) Zona inferior de la celda y que corresponde a la altura del elipsoide de revolución, en la que parte del material granular permanece en reposo, las presiones laterales son ligeramente superiores a las de llenado definidas por Janssen. No se presentarán presiones puntuales ya que el material en reposo en contacto con las paredes absorberá cualquier posible sobrepresión y transmitirá de una forma uniforme sobre las paredes.

Esta zona en algunos casos desaparece totalmente (celdas de flujo másico).

2) Zona superior que comprende el resto de la celda, donde el flujo es másico, las sobrepresiones son elevadas y pueden llegar a alcanzar valores superiores a 2.

2.2.2. FORMA DEL FLUJO DURANTE EL VACIADO SEGÚN CHWETZOFF.

En la fig... se ha dibujado la forma del flujo durante el vaciado.

La solución de Chwetzoff es similar a la de Kvapil aunque amplía el elipsoide de revolución a unas dimensiones mucho mayores.

El proceso de vaciado se puede resumir en tres zonas:

1) Zona superior de producto granular moviéndose a velocidad constante.
2) Zona en la que el material granular se mueve a velocidad variable hacia la boca de salida.
3) Producto granular en reposo.

Fijándonos en la fig... podemos predecir las presiones que el producto granular ejerce sobre las paredes y que podemos dividir en tres zonas anteriormente definidas:

1) Zona de producto granular en movimiento a velocidad constante, durante el vaciado aparecen sobrepresiones no superiores a 1,75.

2) Zona con movimiento a velocidad variable hacia la boca de salida, durante el vaciado en la porción de pared en contacto con esta zona es donde aparecen las mayores sobrepresiones del orden de 2,12.

3) Producto granular en reposo, durante el vaciado las sobrepresiones no son mayores de 1,30.

Chetzoff define claramente la estrecha zona donde las sobrepresiones alcanzan valores superiores a 2,12 y que tantas averías y deformaciones han producido en grandes instalaciones y prácticamente en todo el mundo.

2.2.3. FORMA DEL FLUJO DURANTE EL VACIADO SEGÚN LENCZNER.

En la fig... se ha dibujado la forma de flujo durante el vaciado.

Esta solución difiere de las anteriores ya que según Lenczner se inicia un conducto de vaciado dentro del producto granular al abrirse la boca de salida. Este conducto de pequeño diámetro comparado con el diámetro de la celda alcanza el nivel superior en el centro y se forma un cráter de vaciado. A medida que el vaciado va avanzando el conducto se va ensanchando hasta alcanzar la pared.

En cuanto a las presiones sobre las paredes, inicialmente no aparecen sobrepresiones por discurrir el material a través del conducto central. A medida que el vaciado avanza y el conducto de vaciado alcanza las paredes se presenta sobrepresiones que pueden llegar hasta 1,75.

2.2.4. FORMA DE FLUJO DURANTE EL VACIADO SEGÚN DEUTSCH Y CLYDE.

En la fig... se ha dibujado la forma de flujo durante el vaciado.

Según Deutsch y Clyde el flujo de vaciado se puede resumir en las cuatro zonas siguientes:

1) las partículas granulares se mueven a velocidad constante.
2) Las partículas granulares con velocidad variable y desplazamientos transversales se le denominan zona de alimentación.
3) Las partículas se mueven a velocidad constante dentro de un conducto.
4) Las partículas permanecen en reposo.
5) A partir de este gráfico se pueden predecir las presiones laterales en cada zona.

Zona 1. Coeficiente de sobrepresión máximo igual a 1,50.

Zona 2. Donde se produce la alimentación de partículas en el conducto central de extracción. Las presiones laterales alcanzan un incremento de 1,75.

Zona 3. Material en reposo, prácticamente no se produce incremento de presiones durante el vaciado.

2.2.5. FORMA DEL FLUJO DURANTE EL VACIADO SEGÚN McCABE.

En la fig... se ha dibujado la forma de flujo durante el vaciado.

Según los ensayos realizados por Mccabe a al abrirse la boca de salida de un silo cilíndrico, rápidamente aparece un nivel donde se forma un cráter central y situado un poco por debajo de la mitad del silo.

A medida que el proceso de vaciado avanza quedan definidas cuatro zonas claramente diferenciadas:

1. zona de material en reposo.
2. Zona de caída libre.
3. Zona de equilibrado dinámico.
4. Zona de flujo másico.

En cuanto a las presiones transmitidas a las paredes, durante el vaciado, podemos distinguir:

1. En la zona de reposo el incremento máximo de presiones laterales será de 1,30.
2. En la zona de equilibrio dinámico las presiones alcanzan su valor máximo, el coeficiente de sobrepresión puede llegar a ser de 2,12.
3. En la zona de flujo másico la presión lateral alcanza un incremento que oscila entre 1,50 y 1,75.

2.2.6. FORMA DEL FLUJO DURANTE EL VACIADO SEGÚN PIEPER.

En la fig... se ha dibujado la forma de flujo durante el vaciado según Pieper y en los que se apreciaron fuertes fluctuaciones en las presiones laterales debidas a la formación de arcos

intermitentes a una cierta distancia de la boca de salida. Cuando un arco se rompe hay una bajada brusca de presión que vuelve a aumentar al formarse otro arco o bóveda. Bajo el arco sólo un incremento de presiones puede producirse.

Estas bóvedas pueden producir serios daños en los grandes silos de almacenamiento de productos granulares.

2.2.7. FORMA DEL FLUJO DURANTE EL VACIADO SEGÚN JENIKE.

Hemos visto la variedad de forms de flujo y como consecuencia de la discrepancia que existe entre los diversos especialistas a la hora de determinar presiones laterales. Cada especialista propone unos coeficientes de sobrepresión en unas zonas determinadas de la pared del silo.

Jenike, especialista norteamericano, da una explicación muy convincente a esta variación de presiones laterales.

Todas las celdas durante el vaciado presentan un canal cónico de vaciado (cono invertido) con vértice en la boca de salida y cuyo ángulo 2θ depende del ángulo de rozamiento interno del producto granular. A partir de los siguientes valores de 2θ y φ.

Siendo:

2θ = Ángulo del cono de vaciado.

φ= Ángulo de rozamiento interno del producto granular.

A partir de estos valores hemos trazado la curva que nos define la relación que existe entre 2θ y φ.

Vamos a estudiar dos ejemplos donde podremos ver las presiones sobre las paredes y la forma del flujo de vaciado.

Supongamos un producto granular con un ángulo de rozamiento interno φ= 30º.

En el gráfico de la fig... 2θ = 30º.

Estudiemos un silo de 50 m de altura y 8 m de diámetro y fondo plano, fig...

El canal de vaciado toca a la pared en una altura igual a:

h= D/2 tg 75º = 8/2 tg 75º = 14,93 m.

Existen pues dos zonas:

1) Zona comprendida entre cotas ± 0,00 y + 14,93. El material en contacto con las paredes permanece en reposo. Las presiones laterales son las de llenado definidas por Janssen.

Durante el vaciado el coeficiente de sobrepresión no sobrepasa el 1,30.

2) Zona comprendida entre cotas +14,93 y + 50,00. El material en contacto con las paredes se mueve de una forma uniforme. La cota +14,93 punto donde el cono de vaciado corta a la pared, es el de máximo coeficiente de sobrepresión.

Se han alcanzado coeficientes de sobrepresión a 4, aunque en franjas muy estrechas.

A medida que nos desplazamos hacia arriba el coeficiente de sobrepresión disminuye, pudiendo llegar en la parte alta a valores comprendidos entre 1,30 y 1,50.

Supongamos que en el mismo silo de fondo plano de 8m de diámetro y 50m de altura almacenamos un producto con un ángulo de rozamiento interno de 45º. En el gráfico de la fig..., 2θ= 10º. En la fig... el canal de vaciado toca a la pared.

A una altura igual a:

h=D/2tg 85º = 45,72m.

Existen dos zonas:

1) zona de comprendida entre cota ±0,00 y +45,72 el material en contacto con las paredes permanece en reposo.

Las presiones laterales son las de llenado definidas por Janssen. Durante el vaciado, el coeficiente de sobrepresión no sobrepasa el valor de 1,30.

2) zona comprendida entre cota +45,72 y +50,00 la onda de sobrepresión al tocar a la pared ha recorrido un largo trayecto y he perdido parte de su potencia.

El coeficiente de sobrepresión en esta zona no es superior a 2.

Con estos dos ejemplos vemos cuán diferente es el flujo de vaciado y las presiones laterales que aparecen en las paredes de un silo y la decisiva influencia que tiene el ángulo de rozamiento interno φ, sobre la forma del embudo de vaciado, y sobre el punto donde tocará a las paredes, presentándose en este punto, variable a su vez con φ, las sobrepresiones máximas.

2.2.8. FORMA DE FLUJO DURANTE EL VACIADO SEGÚN LAFORGE Y BORUFF.

Se efectúa un interesante estudio de las velocidades de las partículas almacenadas, de acuerdo con su posición relativa en la celda.

En la fig... puede verse las distintas velocidades de las partículas en las proximidades de la boca de salida para el caso de fondo plano.

Las velocidades de las partículas en el centro de la corriente de flujo son muy altas, así como su aceleración a medida que nos acercamos a la boca de salida. En las zonas próximas al límite del material en reposo, las velocidades han disminuido de forma ostensible.

En la fig... hemos estudiado las velocidades de las partículas durante el vaciado, pero con una tolva de 20º de pendiente.

Disminuye la zona de material en reposo y aumenta la velocidad de las partículas periféricas que interfieren el chorro de vaciado, produciendo un flujo turbulento. Este efecto produce la formación de arcos intermitentes que sucesivamente se van rompiendo. Esto reduce considerablemente el área efectiva de vaciado.

Es muy significativo constatar que las velocidades son comparativamente inferiores a las obtenidas en las maquetas con fondo plano.

De los ensayos efectuados con varios materiales se comprobó que para todos ellos la velocidad de vaciado en maquetas con tolvas de 20º de pendiente era menor que en maquetas con fondo plano.

En la fig... vemos una maqueta con tolva de 60º de pendiente, todo el material almacenado está en movimiento. La corriente de flujo converge en la boca de salida sin producir ningún tipo de turbulencia. Las velocidades que en el centro de la corriente de vaciado son parecidas a las de la tolva de 20º. Por el contrario, en las proximidades de la pared son mucho más elevadas. En la boca de salida se contrae el chorro de vaciado que encuentra su área mínima ligeramente por debajo de la boca de salida. Indiscutiblemente la tolva de 60º de pendiente produce un flujo mucho más uniforme y mayor caudal de salida que la maqueta de fondo plano o con tolva de 20º.

El caudal de vaciado disminuye al aumentar la pendiente de la tolva, suponiendo que partimos de fondo plano, para alcanzar su valor mínimo para una pendiente de la tolva variable entre 20º y 40º, y dependiendo de forma decisiva del producto granular almacenado.

También se experimentó con maquetas cuyas tolvas de vaciado tenían una salida excéntrica, las tolvas con dos caras a 90º de pendiente y las otras dos caras con pendiente entre 50º y 60º. Se comprobó que el aumento en el caudal de descarga era de un 25 a 35% del obtenido mediante tolvas convencionales.

2.2.9. FORMA DEL FLUJO DURANTE EL VACIADO SEGÚN PATERSON.

Peterson considera que la forma del flujo de vaciado en el interior de un silo depende fundamentalmente de los siguientes factores;

- Propiedades físicas del producto a almacenar.
- Pendiente de la tolva.
- Rugosidad o finura de las paredes del silo.
- Rugosidad o finura de las paredes de la tolva.

Se ha considerado el flujo durante el vaciado de los siguientes casos y realizados en maquetas de caras transparentes.

A) Silo con tolva de 27º de pendiente y paredes lisas tanto en silo como en tolva.

Según la fig... se presenta un flujo durante el vaciado que se asemeja a lo expuesto por Kvapil y Chetzoff.

De todas forms la teoría de Jenike se cumple perfectamente, ya que puede verse el cono de vaciado invertido con vértice la boca de salida y ángulo 2θ función del ángulo de rozamiento interno del producto granular.

En los próximos ensayos veremos la influencia que tiene la pendiente de la tolva y la rugosidad o finura de paredes, sobre la relación ángulo de rozamiento interno, ángulo de cono invertido de vaciado.

b) Silo con tolva de 50º de pendiente y paredes lisas tanto en el silo como en la tolva.

En la fig... podemos ver que excepto en la tolva el producto granular prácticamente se mueve de una forma uniforme en toda la celda, produciéndose el denominado flujo másico.

En este caso las presiones sobre las paredes son elevadas durante el vaciado, alcanzándose coeficientes de sobrepresión del orden de 2,10.

Este tipo de flujo no ha sido definido por ningún especialista.

Si el mismo silo tiene las paredes rugosas, el rozamiento del producto granular y la pared produce un frenado en las proximidades de la pared.

El flujo de vaciado podemos verlo en la fig..., se asemeja al cono invertido y las sobrepresiones sobre las paredes disminuyen considerablemente, alcanzando valores comprendidos entre 1,5 y 1,75.

C) Silo con tolva de 73º de pendiente y paredes lisas tanto en silo como en tolva.

En la fig... vemos la influencia que la tolva con paredes lisas tiene sobre el flujo de vaciado, produciéndose un flujo másico, sin desmezclarse y apareciendo en las paredes del silo elevados valores de sobrepresión superiores a 2,10.

Si el mismo silo tiene las paredes rugosas, el flujo sobre las paredes se reduce, no así en el centro.

Las sobrepresiones disminuyen a 1,50 y aparecen desmezcles de la masa almacenada. (fig...).

Como resumen vemos la influencia que la pendiente de la tolva tiene sobre el flujo durante el vaciado.

Si la pendiente de la tolva es superior al talud natural de vaciado y las paredes son lisas, se produce un flujo másico.

2.2.10. FORMA DEL FLUJO DURANTE EL VACIADO SEGÚN TINGATE.

En la fig... vemos las tres fases que se presentan durante de vaciado en un silo alto.

Inicialmente se forma un flujo de vaciado tipo conducto, con casi todo el material almacenado en reposo. A medida que prosigue el vaciado el material en reposo es mínimo y por el contrario la zona de vaciado o conducto de vaciado aumenta, así como la zona de alimentación al conducto; por encima el material se mueve uniformemente.

Al final del vaciado la zona de material en reposo se ha extendido nuevamente a una porción bastante elevada. Continua el flujo de conducto con altas velocidades y la zona de alimentación se pudo comprobar que la relación:

Diámetro o lado boca de salida/diámetro o lado máximo de partículas= m

Para valores de m≥4,30 no se presentaban bóvedas, ni arcos sobre la boca de salida.

3. VACIADO EXCÉNTRICO. TEORÍAS DE LOS ESPECIALISTAS MUNDIALES MÁS IMPORTANTES.

3.1. JAMIESON. 1904. CANADÁ.

Realiza ensayos en silos reales y en maquetas dotadas de boca de salida excéntrica. Las curvas de presiones laterales durante el llenado y vaciado, se sitúan en las paredes próxima y opuesta a la boca de salida.

En la cara próxima a la boca de salida se produce una depresión del 0.75 con presiones pulsantes, mientras que en la cara opuesta a la boca de salida aparece una sobrepresión de valor 1.25 veces las presiones de llenado.

Podemos decir que Jamieson es el primer especialista que detecta sobrepresiones en las paredes opuestas y depresiones en las paredes próximas a la boca de salida.

3.2 REIMBERT. 1943. FRANCIA.

Existe la hipótesis que un silo disimétrico se comporta como un silo simétrico de dimensiones dobles. El vaciado da origen a un fuerte incremento de presiones sobre la cara opuesta a la boca de salida, datos verificados por los ensayos obtenidos en isotropía y para silos alargados. Los lados adyacentes a la boca de salda deben ser tenidos en cuenta.

Estos tres lados se prevee un coeficiente de sobrepresión de dos, mientras que el lado próximo a la boca de salida se calcula de acuerdo con las presiones de llenado.

3.3. NORMA DIN 1055. 1964. ALEMANIA.

La posición excéntrica de la salida crea durante el vaciado cargas desigualmente distribuidas por el perímetro y en toda la altura. De los estudios realizados se desprende que a los valores de Ph se han de adicionar los valores de la sección Ph'.

Siendo:

Ph= presión de vaciado de un silo.

Ph'= Phi-Ph= Presión que debe ser adicionada aritméticamente al silo real, al cual se mantiene por fricción entre las paredes del silo y el producto almacenado.

Phi= Presión de vaciado de un silo ideal obtenida haciendo bascular la parte mayor de la sección alrededor del eje que pasa por la salida.

Cuando la boca de salida se encuentra dentro del área de radio, diámetro/3 no se tiene en cuenta la excentricidad.

3.4. JENIKE. 1967. USA.

Un silo cilíndrico para almacenamiento de productos granulares cumple perfectamente su misión siempre que el llenado y el vaciado sea centrado, ya que así la distribución de presiones es uniforme. El requerimiento de que el vaciado sea centrado no siempre se cumple, y muy a menudo al producirse el vaciado excéntrico aparecen deformaciones permanentes en las paredes de las celdas cilíndricas.

Para comprender perfectamente este efecto, veamos la **fig...** cuando la boca de salida es centrada, el canal de vaciado del sólido es simétrico y la presión uniformemente distribuida.

Sin embargo, en el caso de vaciado excéntrico, tal como puede verse en la **fig...** , el canal de vaciado se apoya en la pared lisa de la celda produciendo la disimetría.

La presión que el sólido en reposo ejerce contra la pared del silo es mayor que la presión del sólido fluyendo en el canal, esto puede verse ampliando la zona del flujo.

Si se sobrepasan los valores de este radio crítico, aparecen deformaciones hacia dentro con una longitud del arco de 42 grados debidas a la disminución de las presiones en la zona del flujo.

3.5. SAFARIAN. 1969. USA.

Según este autor, la presión aumenta en el lado más alejado de la boca de salida y disminuye en el lado próximo a la boca de salida.

El efecto de descarga excéntrica es considerado por adición del cálculo de la presión lateral Py (calculada para silos con boca de salida centrada) y del incremento de cambio de presión.

Siendo:

Py= Presión vaciado excéntrico

Pe H= presión máxima a la altura H

Pe y= Y.Pe H/H

Pe H = Pi H – PH

Pe Y des = Cd. (Pe y)

(Pe)H= Incremento de presión lateral unitaria a la profundidad H debida a la descarga excéntrica.

Pe Y = Incremento de presión lateral unitaria a la profundidad Y debida a la descarga excéntrica.

Pi H = Presión estática lateral unitaria a la profundidad H obtenida para el caso de vaciado centrado y silo de dimensión imaginaria tomando como eje la boca de salida, **fig ...** .

Presión lateral a la profundidad Y:

(PY)des = Cd.Py.Y.(Pe)H/H

Esta fórmula deberá ser usada con el signo menos para verificar las paredes de los silos, solamente en el caso de posibles abolladuras.

3.6. THEIMER. 1969. ALEMANIA.

Efectúa un estudio comparativo según diversos autores llegándose a la conclusión de que el coeficiente de sobrepresión para el caso de vaciado excéntrico de 1.75 no es suficiente sobre todo en los dos tercios superiores del silo, donde se apreciaron grietas en varias instalaciones.

Se recomienda para el caso de vaciado excéntrico, un coeficiente de seguridad de 2.50.

3.7. PIEPER. 1969. ALEMANIA.

Realiza ensayos en maqueta para determinar presiones laterales para el caso de vaciado excéntrico. La gran cantidad de silos que han sufrido deformaciones e incluso roturas han sido la causa de tales investigaciones.

Los resultados de los ensayos se han realizado en maquetas a escala reducida utilizando arena y polvo de cuarzo. Se han dibujado curvas de presiones de llenado y vaciado suponiendo que

la excentricidad es del 50% y 100% y en la pared próxima a la boca de salida. Se comprueba la aparición de una depresión con relación a las presiones estáticas de llenado de Janssen, que llega a ser del 50%, apareciendo más arriba una sobrepresión del 40% aproximadamente.

Se ha estudiado el vaciado excéntrico con boca de salida alargada. Se han medido presiones en la pared próxima a la boca de salida, apreciándose sobrepresiones del 63% en la pared alta de la pared y depresiones del 25% en la parte baja. Hay que hacer notar que se han obtenido dos curvas totalmente distintas según el llenado sea rápido o lento.

Los valores obtenidos superan ampliamente el previsto según las NORMAS DIN 1055.

3.8. GARG. 1972. INDIA.

Realiza ensayos en maqueta comprobando que si la boca de salida es excéntrica y alargada, las presiones en el lado opuesto aumentan en un 112% mientras que en el lado próximo el aumento es de un 95%.

Estos ensayos se realizaron con arroz de tal manera que Garg recomienda para el almacenamiento de estos productos que se tomen en consideración lo siguiente:

1. Densidad del arroz igual a 800 Kg/m^3 y para silos muy altos igual a 900 Kg/m^3.

2. Durante el llenado y el vaciado se han de considerar los siguientes valores para tan (A2) y K referidos al cálculo de presiones:

   Llenado: tg (A2) = 0.47 K = 0.50

   Vaciado: tg (A2) = 0.36 K = 0.50

3. La presión lateral para el caso de boca de salida alargada y vaciado excéntrico podemos considerar un coeficiente de 2.20 sobre la presión definida por Janssen.

3.9. NORMAS FRANCESAS. 1975.

Para silos de vaciado geométricamente anormal (bocas de descarga excéntricas o salidas múltiples) se considera un estado suplementario más desfavorable que el vaciado centrado.

Se denomina vaciado geométricamente anormal, cuando la coordenada relativa E>0.4.

De acuerdo con la **fig...** la sección transversal de un silo a la altura del plano de base tenemos:

(C) Contorno de dicha sección

(O) Centro de la misma

(V) Proyección sobre el plano de base del conjunto de contornos correspondientes a los orificios de vaciado del silo considerado.

Se denomina coordenada relativa E a la relación de homotecia de centro (O) que hace corresponder al contorno (C) el menor contorno homotético (C´) que contiene al conjunto de contornos (V).

En cuanto a las presiones tenemos:

Para 0.6<E<1.00

La presión normal sobre la pared vale:

P3= P2+0.1.P1

P2=Presión de vaciado centrado

P1=Presión de llenado

Para 0.4<E<0.6

P3=P2+0.1.(5x1exp-2).P1

Si el silo es circular de radio R y el vaciado excéntrico existirá una zona de la pared con cargas P2 y otra zona con cargas P3. El momento de ovalización vale:

Mov= U.(P3-P2).R^2.

El momento de ovalización se tomará en función del grado de importancia que aconsejen las disposiciones para evitar la fisuración de la instalación:

Para E>0.6; Mov=U.0.1.P1. R^2.

Para 0.4<E<0.6; Mov=U.0.1.(5x1exp-2).P1. R^2.

El valor de U depende del grado de fisuración que se prevea:

U= 0.12 para silos de primera categoría

U= 0.08 para silos de segunda categoría

U= 0.04 para silos de tercera categoría

3.10. NORMA DIN 1055. (CORRECCIÓN 1980).

Las correcciones realizadas desde 1964 han sido ampliamente comentadas en el caso de vaciado centrado. Para el vaciado excéntrico se considera un incremento de presiones sobre las paredes del 40% de las previstas para el caso de vaciado centrado.

4. TEORÍAS Y ENSAYOS REALIZADOS POR RAVENET

4.1. FLUJO DE VACIADO EN MAQUETAS DE CARAS TRANSPARENTES

4.1.1. VACIADO CENTRADO. RELACIÓN ALTURA-LADO IGUAL A 6.

En la **fig. ...** se ven seis secuencias del flujo de vaciado de un producto granular. Se ha previsto efectuar el llenado con dos tipos de cereal de color diferente para así poder apreciar el movimiento relativo de producto almacenado dentro de la maqueta. El material de color claro es mijo y el material de color oscuro lo utilizaremos para contrastar.

Una vez llena la maqueta las presiones son del tipo exponencial definido por la teoría de Janssen. Al abrir la boca de salida, se forma un embudo de vaciado, que toca a la pared a una distancia 0.70 L, siendo L el lado de la celda.

Existen dos zonas claramente definidas:

a) La zona donde toda la masa está en movimiento y que corresponde al 90% de la masa almacenada. Aparecen sobrepresiones elevadas en las paredes.

b) Zona con material en reposo, donde las sobrepresiones son reducidas. La onda de sobrepresión toca a la pared justo encima de esta zona.

A medida que el vaciado continua, la zona en reposo se reduce y por tanto la zona de sobrepresiones reducidas se corresponde a las paredes próximas al fondo del silo.

4.1.2. VACIADO CENTRADO. RELACIÓN ALTURA-LADO IGUAL A 2.

En la **fig....** vemos las secuencias de vaciado de un producto granular para un silo bajo. Al abrir la boca de salida, se forma el embudo o cono invertido de vaciado que llega a la superficie libre del cereal antes de tocar a las paredes. Las franjas de color oscuro y blanco definen claramente el gradiente de velocidad del cereal en el interior del cono de vaciado. Como puede apreciarse el grano en contacto con la pared no se mueve, esto quiere decir que no aparecen cargas concentradas sobre las paredes del silo, sino por el contrario distribuidas uniformemente.

Puede apreciarse un total desmezcle de la masa almacenada y de tal manera que el último producto en entrar al silo es prácticamente el primero en salir.

4.1.3. CELDA DOTADA DE COLUMNAS DE VACIADO ESTÁTICO.

La columna de vaciado estático produce un vaciado disciplinado del cereal y siempre por la parte alta del silo, tal como puede verse en la **fig. ....** El vaciado se efectúa por capas sucesivas y por la parte alta. Como toda la masa permanece estática no apareciendo sobrepresiones en las paredes. Este dispositivo se utiliza para conseguir una reducción en los espesores de pared y por tanto de los costes de la instalación, aunque tiene el inconveniente de que en caso de mal funcionamiento del tubo de vaciado estático, el silo sufriría serios problemas de deformación en las paredes.

4.1.4. CELDAS DOTADAS DE SALIDAS MÚLTIPLES.

En la **fig....** podemos ver la maqueta dotada con cinco salidas y en la que puede verse un vaciado uniforme de toda la masa lo que produce un elevado rozamiento grano-pared que origina las mayores presiones sobre las paredes.

Este dispositivo se utiliza en el caso de productos granulares que precisan de un vaciado uniforme, para conseguir una calidad uniforme del producto en el proceso de fabricación.

4.2. ENSAYOS REALIZADOS CON GALGAS EXTENSOMÉTRICAS.

4.2.1. MAQUETA UTILIZADA.

Para la ejecución de los ensayos se ha proyectado una maqueta de dimensiones 30x30x198 cm . Tres caras de la maqueta se han construido con chapa de acero galvanizada, y la cuarta cara se ha construido con placas de persiglás de dimensiones 30x10x0.40cm. El número de placas es de 22 y se han colocado de tal manera que el producto almacenado actuara sobre las placas inferiores, mas no producirá efectos de deformación sobre las placas superiores. Esto quiere decir que la presión se medirá en el punto donde efectivamente actúe.

4.2.2. GALGAS EXTENSOMÉTRICAS.

En cada placa de persiglás de 30x10x0.40 cm se ha colocado una galga extensométrica para medir microdeformaciones o deformaciones unitarias en las paredes de persiglás. De esta forma podemos medir directamente presiones, con la simple aplicación de un coeficiente.

Los ensayos se han realizado para medir presiones laterales y esclarecer las teorías de los principales especialistas mundiales y entre los que tenemos una dispersión del 240% en lo que se refiere a presiones laterales.

4.2.3. ENSAYOS REALIZADOS EN MAQUETAS CON TOLVA A 45º DE PENDIENTE. VACIADO CENTRADO. RELACIÓN ALTURA-LADO IGUAL A 6.

Se han efectuado mediciones en cinco galgas para determinar las presiones de llenado y vaciado. Para todos los ensayos, la sección de la boca de llenado es de 5.26 cm^2 y la sección de la boca de salida de 4.00 cm^2.

GALGA 1.

Presiones de llenado: 110 Kg/m^2. Presiones de vaciado: 166 Kg/m^2. Coeficiente de sobrepresión: 1.50. Puede verse como al abrirse la boca de salida en la primera placa aparece una sobrepresión instantánea.

GALGA 5.

Presiones de llenado: 140 Kg/m^2. Presiones de vaciado: 196 Kg/m^2. Coeficiente de sobrepresión: 1.41. en la **fig...** puede verse como al abrirse la boca de salida, hasta que se alcanza el valor máximo de sobrepresión ha pasado un determinado tiempo.

GALGA 10.

Presiones de llenado: 131 Kg/m^2. Presiones de vaciado: 148 Kg/m^2. Coeficiente de sobrepresión: 1.13. De esta placa hacia arriba la presión lateral disminuye.

4.2.4. ENSAYOS REALIZADOS EN MAQUETA CON TOLVA A 45º DE PENDIENTE. VACIADO CENTRADO. RELACIÓN ALTURA-LADO IGUAL A 1.5.

GALGA 1.

Presiones de llenado: 48 Kg/m^2. Presiones de vaciado: 66 Kg/m^2. Coeficiente de sobrepresión: 1.28. en la **fig...** puede verse como al abrirse la boca de salida inmediatamente se presentan las sobrepresiones sobre las paredes.

GALGA 3.

Presiones de llenado: 48 Kg/m^2. Presiones de vaciado: 62 Kg/m^2. Coeficiente de sobrepresión: 1.27. en la **fig...** puede verse como al abrirse la boca de salida la respuesta de sobrepresiones es más lenta.

4.2.5. CELDA DOTADA DE COLUMNAS DE VACIADO ESTÁTICO.

Se estudia la colocación de una columna de vaciado estático que cumplirá perfectamente con las premisas de vaciado disciplinado. Efectuando ensayos con galgas extensométricas se obtuvo un coeficiente de sobrepresión máximo de 1.35.

4.2.6. CELDA DOTADA DE SALIDAS MÚLTIPLES.

Se realizó en la misma maqueta, estudiando un fondo plano y colocando trece salidas simétricas, que conectadas cada una a un tubo que a su vez se conectan a un colector único, que regula el caudal de todos ellos. De esta forma se consigue un flujo másico perfecto.

La determinación de la presión arrojó un coeficiente de sobrepresión de 1.95. Este valor es más alto que el obtenido para vaciados centrados.

4.3. CONFRONTACIÓN DE LOS VALORES EXPERIMENTALES CON LAS FOTOGRAFIAS DE FLUJO DE VACIADO.

4.3.1. VACIADO CENTRADO. RELACIÓN ALTURA LADO IGUAL A 6.

De acuerdo con las fotografías de flujo de vaciado, se puede apreciar, que el embudo central de vaciado, en forma de copa, toca a la pared en un punto al cual corresponde la sobrepresión máxima de vaciado.

El gráfico comparativo de presiones de llenado, vaciado y forma del flujo durante el vaciado. El máximo coeficiente de sobrepresión ha sido de 1.65.

4.3.2. VACIADO CENTRADO. RELACIÓN ALTURA-LADO IGUAL A 1.50.

El cono de vaciado no corta a la pared de la celda, sino a la superficie libre del cereal. Por tanto la onda de sobrepresión no toca a la pared. Las sobrepresiones son del orden de 1.30. **mirar fig...**

4.3.3. MAQUETA DOTADA DE COLUMNAS DE VACIADO ESTÁTICO.

La columna de vaciado estático produce un flujo de vaciado disciplinado, pero en los ensayos efectuados pudo comprobarse que la masa almacenada efectuaba durante el vaciado y a intervalos variables ligeros movimientos de asiento que han conducido a la aparición de un coeficiente de sobrepresión de 1.35 tal como puede verse en la **fig ...** .

4.3.4. MAQUETA DOTADA DE SALIDAS MÚLTIPLES.

Al abrir la boca de salida, toda la masa se pone en movimiento dando origen a un flujo másico que conduce a las máximas presiones laterales con un coeficiente de sobrepresión de 1.95 tal y como puede verse en la **fig ...** .

4.4. CONCLUSIONES.

1. Antes de efectuar el cálculo del silo es fundamental conocer la geometría de la celda y sobre todo, la relación altura-lado o diámetro de la celda.

2. Determinación de las propiedades físicas del producto a almacenar, como son:

- Densidad.
- Ángulo de rozamiento interno.
- Ángulo de rozamiento con las paredes.

Conociendo estos datos se determina el ángulo de cono de vaciado y el punto donde este corta a la pared. De esta forma conoceremos la zona donde aparecerán las sobrepresiones de vaciado. Lógicamente para varios productos diferentes, tendremos diversos puntos sobre la pared. **La envolvente de estos puntos nos determina la curva de presiones máximas-maximorum**.

3. La sobrepresión máxima no aparece particularmente en la parte alta de la celda, como afirman Reimbert, Nakonz, Normas DIN 1055 ni particularmente en la parte baja de la celda, como afirman Platonov, Geniev, Kovtum y Kim, sino que depende de la relación altura-lado y del tipo de características del producto a almacenar.

4. Determinación del tipo de salida en la celda, en función de las necesidades de la instalación. Las salidas pueden ser centradas, excéntricas y múltiples.

5. Para el caso de productos pulverulentos cohesivos, todos los estudios realizados anteriormente no son válidos. En este caso es muy fácil que se produzca un vaciado tipo

conducto, con formación de bóvedas cuyo desprendimiento produce sobrepresiones incontroladas que pueden llegar a alcanzar un coeficiente de sobrepresión de 5.00.

6. Para un cereal determinado, las propiedades físicas no son constantes, y por lo tanto no lo es la zona donde se registrará la máxima sobrepresión ni la intensidad de la misma. Esta variación de las propiedades físicas es función del propio tipo de cereal, así como de los índices de humedad y suciedad del producto almacenado.

4.5. RESUMEN DE LAS TEORÍAS EMITIDAS.

En la **fig...** se ha efectuado un estudio de las presiones laterales aplicando todas las teorías emitidas en una maqueta cuadrada de 30 cm de lado y 2.00 m de altura. **El coeficiente máximo de sobrepresión corresponde a Platonov y resulta ser de 2.32 veces las presiones estáticas de llenado de Janssen**.

Ravenet ha superpuesto las curvas de presiones obtenidas experimentalmente en la maqueta anteriormente citada en **el gráfico de la fig 45**. **La experiencia nos demuestra que las presiones laterales durante el vaciado pueden ser superiores a las obtenidas por Ravenet, mas no superan los valores máximos de Platonov, que corresponden a los valores máximos-maximorum**.

Atención A la hora de efectuar el cálculo de un silo, se pueden tomar perfectamente las curvas de sobrepresiones de Ravenet y aplicar un coeficiente de seguridad los suficientemente amplio para que en un momento determinado, si se alcanzan los valores de Platonov, no lleguemos al límite elástico del acero o de las armaduras.

Para la determinación de presiones sobre el fondo, se toma la curva de sobrepresiones laterales de vaciado y se divide por el coeficiente K que se supone para productos granulares igual a 0.60.

Para el cálculo de las fuerzas de rozamiento que actúan sobre las paredes se resta del peso de masa almacenada en cada altura la presión sobre el fondo mínima.

Conociendo:

- Presión horizontal máxima en cada punto de las paredes.
- Presión vertical en el fondo del silo.
- Fuerza de rozamiento máxima en cada punto de la pared.

Con estos datos se puede comenzar con éxito el cálculo de una instalación para almacenamiento de productos granulares con una **boca de salida centrada**.

5. EXPLOSIONES EN SILOS

5. EXPLOSIONES EN SILOS.

Introducción

Se estudian los factores que intervienen en una explosión de polvos combustibles, determinándose las condiciones necesarias mínimas para que ésta se produzca, así como las medidas a tomar para intentar evitarla o bien paliar los daños causados por la explosión, mediante una serie de aparatos y dispositivos, que nos permiten reducir al mínimo las consecuencias de una explosión.

Los ensayos realizados por expertos en Laboratorio y a escala reducida, unidos recientemente a los ensayos realizados en silos reales de tamaño medio, dotados de dispositivos antiexplosión y el estudio de las devastadoras consecuencias de las explosiones acaecidas en grandes silos e instalaciones de almacenamiento, manipulación o elaboración de productos combustibles, nos han permitido extraer las conclusiones a tener en cuenta, a la hora de diseñar una instalación de este tipo. Por último se pasa revista a la gama de aparatos y dispositivos que existen en el mercado y que nos permiten eliminar o al menos reducir al mínimo el riesgo y las consecuencias de una explosión.

Según se desprende de la tabla adjunta los silos para almacenamiento de productos agrícolas son los más peligrosos, en cuanto a explosiones se refiere. Le siguen en peligrosidad los productos plásticos y los productos metálicos.

TIPO DE MATERIALES	**Nº DE EXPLOSIONES**
Silos para cereales	14
Silos para carbón	9
Silos para harinas	6
Silos para plásticos	5
Silos para madera	5
Silos para soja	4
Silos para maíz	3
Silos para piensos compuestos	3
Silos para harina de madera	3
Silos para algodón	2
Silos para almidón	2
Silos para productos metálicos	1

En muchas ocasiones se pregunta el porqué se produce una explosión en una instalación destinada al almacenamiento de cereales, maíz, harinas, azúcar, almidón, cacao, coco, proteína de soja, carbón de Pittsburg, aluminio, magnesio, manganeso, titanio, uranio, torio, nylon, resinas epoxi, polietileno, etc. La respuesta es inmediata; la explosión de la mezcla de polvo en suspensión con el aire. Según las investigaciones realizadas en laboratorios y el estudio de las grandes explosiones ocurridas en el mundo, indican que el polvo que se encuentra en suspensión en el aire y que forma con éste una nube, es altamente explosivo.

Estudio cuantitativo de los factores que influyen en una explosión

Para que una explosión pueda producirse, han de presentarse una serie de factores, que actúan directamente sobre la forma de producirse, a saber:

- Granulometría de los productos: es un factor fundamental y puede decirse que por debajo de las 200 micras, todo polvo de material combustible es explosivo.

- Energía de inflamación: la energía procedente de una fuente eléctrica necesaria para inflamar la nube de polvo combustible en el aire, o en cualquier otra atmósfera comburente y que es de 10 milijulios para los polvos más inflamables y de 1 julio para los menos inflamables.

- Concentración, mínima explosiva: corresponde al límite inferior de explosividad de la mezcla polvo-aire. Las cifras son del orden de 50 gramos por metro cúbico.

- Presión de explosión: las cifras normales que se han medido son de 2 a 8 kg/cm^2.

- Gradiente de las máximas presiones en el caso de una explosión: puede variar entre 35 y 316 kg/cm^2/segundo.

- Temperatura de inflamación de la nube: puede estar comprendido entre 400 y 1.000 grados centígrados.

- Cohesión del polvo: caracterizado por la actitud del polvo para elevarse bajo la acción de una corriente de aire, pero a diferencia del gas, el polvo en suspensión tiene tendencia a sedimentarse, no siendo por ello inofensivo. Por causas fortuitas y en particular bajo el efecto de una reducida explosión local, puede volver a estar en suspensión y recobrar su peligrosidad explosiva.

- Trabajo en atmósfera inerte: se puede estimar que la mayoría de explosiones no pueden producirse en una atmósfera con menos del 10% de oxígeno. La aportación de un gas inerte anula completamente la posibilidad de explosión.

- Riesgo de propagación de una explosión en una canalización: es útil estudiar la posibilidad de propagación de una explosión en una canalización de diámetro dado, con una concentración y granulometría del polvo en suspensión conocidas. Por otro lado resulta muy interesante medir la velocidad de la explosión, para ver si puede remontar una corriente de aire de velocidad dada, y calcular la presión de la explosión, para determinar la resistencia que debe tener la canalización, para dimensionarla o colocar los diafragmas de seguridad necesarios.

El resumen de las últimas 250 explosiones registradas en Estados Unidos, nos permiten estudiar las causas de las mismas. Se pudo comprobar que del 41% de las explosiones, se desconocen las causas debido a que la destrucción borró cualquier rastro de prueba.

El 17 % de las explosiones se debió a trabajos de reparación o bien de mantenimiento o ampliación que introducen fuentes de energía con temperaturas elevadas: soldaduras, sopletes, etc. El 4% de las explosiones, se debió a elementos mecánicos, rozamientos, elementos metálicos que se introducen con el producto almacenado y producen chispas por rozamiento.

Referente a la localización de las explosiones, el 42% de las mismas resultó desconocida. El 23% en los elementos mecánicos de elevación y transporte. El 7% se produjo en los molinos de martillos y cilindros. El 5%, de las explosiones se produjeron en la maquinaria de la fábrica. El 3% de las explosiones se produjeron en almacenes y naves de ensaque y expedición de materias elaboradas.

Factores que afectan el inicio de una explosión

Concentración mínima explosiva C.M.E.

Para que la llama se propague a través de una nube de polvo la concentración polvo-aire debe estar comprendida entre límites inferiores y superiores de explosividad del polvo. El límite inferior de explosividad es la mínima concentración de polvo en el aire necesaria, para que la llama se propague a través de la nube mezcla. A medida que la concentración del polvo supera el límite inferior de explosividad, aumenta la velocidad de propagación y los efectos derivados de la explosión hasta alcanzarse el límite superior de explosividad. A concentraciones superiores al límite superior no se propaga la llama. Existe una relación entre el diámetro de las partículas y la concentración mínima explosiva. Por debajo de 100 micras el valor de C.M.E. es constante, para crecer rápidamente por encima de este valor.

La C.M.E. disminuye al aumentar el contenido de volátiles de polvo.

Temperatura mínima de ignición T.M.E.

Existen dos tipos de temperatura mínima de explosión:

- Temperatura mínima de ignición en el lecho.
- Temperatura mínima de ignición en la nube.

La temperatura mínima de ignición en el lecho, se define como la mínima temperatura en grados centígrados de una superficie sobre la que puede inflamarse y depende fundamentalmente del espesor del lecho y del contenido en volátiles de polvo, tal como queda reflejado para el polvo de carbón.

La temperatura mínima de ignición en la nube, se define como la temperatura mínima en grados centígrados de una superficie caliente, a la que el polvo en nube en contacto con ella puede inflamarse.

Energía mínima de ignición E.M.I.

Para que una nube de polvo deflagre, es necesaria la confluencia de dos condiciones fundamentales:

- Concentración explosiva de la nube.
- Foco de ignición que aporte la energía de ignición.

Los focos que habitualmente pueden provocar la ignición se clasifican por su dependencia respecto al tiempo e intensidad en:

- Focos de gran intensidad y larga duración: llamas.
- Focos de gran intensidad y corta duración: chispas.
- Focos de media intensidad y larga duración: superficies

El aumento de temperatura favorece la emisión de los volátiles contenidos en el producto que, por precisar energías de inflamación muy reducidas, disminuyen la energía necesaria para activar el conjunto.

Concentración mínima de oxígeno

Despreciando el reducido porcentaje que representa el polvo, el resto es aire, que contiene un porcentaje aproximado del 20% de oxígeno. Dicho porcentaje es suficiente para iniciar y mantener cualquier combustión, y si se desea de una forma preventiva eliminar tal posibilidad, es necesario disminuir el porcentaje de oxígeno, mediante la adición de un gas inerte (nitrógeno o anhídrido carbónico) hasta que dicho porcentaje sea inferior a la concentración mínima de oxígeno necesaria. La determinación de la concentración mínima de oxígeno se efectúa introduciendo la mezcla a temperatura ambiente, en un recipiente estándar y manteniéndolo a una temperatura de 850 grados centígrados.

El porcentaje obtenido depende básicamente de la temperatura a la que se hace la experiencia para el polvo de ácido tereftálico. Cuando la temperatura es inferior a la de inflamación del polvo, se ha utilizado en el experimento una descarga eléctrica como foco de ignición.

Presión máxima de explosión P.M.E. y gradiente máxima de presión G.M.P.

La propagación de la llama genera ondas de presión, que son las causantes, por sus efectos destructivos, de consecuencias más graves. Dos parámetros determinan el poder destructivo de una explosión de polvo:

- Presión máxima alcanzable.

- Gradiente de presión (velocidad de crecimiento de la presión): Kst.

Riesgos de explosión

Algunas sustancias aparentemente inofensivas, dispersadas en el aire en forma de nube, arden frecuentemente con violencia explosiva. La manipulación de tales sustancias en la industria, conlleva la existencia de un riesgo que, al actualizarse, ocasiona consecuencias catastróficas. Tal es el caso de explosiones en fábricas de harinas, azúcar, silos para cereales, piensos, industria química, metalúrgica, etc. Las explosiones en polvos combustibles, son del tipo deflagración, caracterizándose por la aparición de un frente de llama que propaga la inflamación a través de la nube de polvo, y la generación de una onda de presión cuyo valor oscila entre 0,1 y 10 kg/cm2 y que representa una fuerza destructiva al aplicarse sobre grandes superficies.

Se define como índice de explosividad:

Índice de explosividad = Sensibilidad de la ignición x gravedad explosiva.

El índice de explosividad puede relacionarse empíricamente con el riesgo de explosión como sigue:

Índice de Explosividad	**Riesgo de Explosión**
< 0,10	Débil
0,10 a 1,00	Moderado
1,00 a 10,00	Fuerte
> 10,00	Muy fuerte

Análisis matemático de una explosión de polvo.

La explosión producida por una nube de polvo de productos combustibles, origina unos daños que son función de:

- Presión máxima desarrollada en el recinto por la explosión de polvo.
- Velocidad de crecimiento de la presión en el curso de la explosión.
- Resistencia del recinto donde se produce la explosión, o dicho de otra forma, del coeficiente de ventilación.

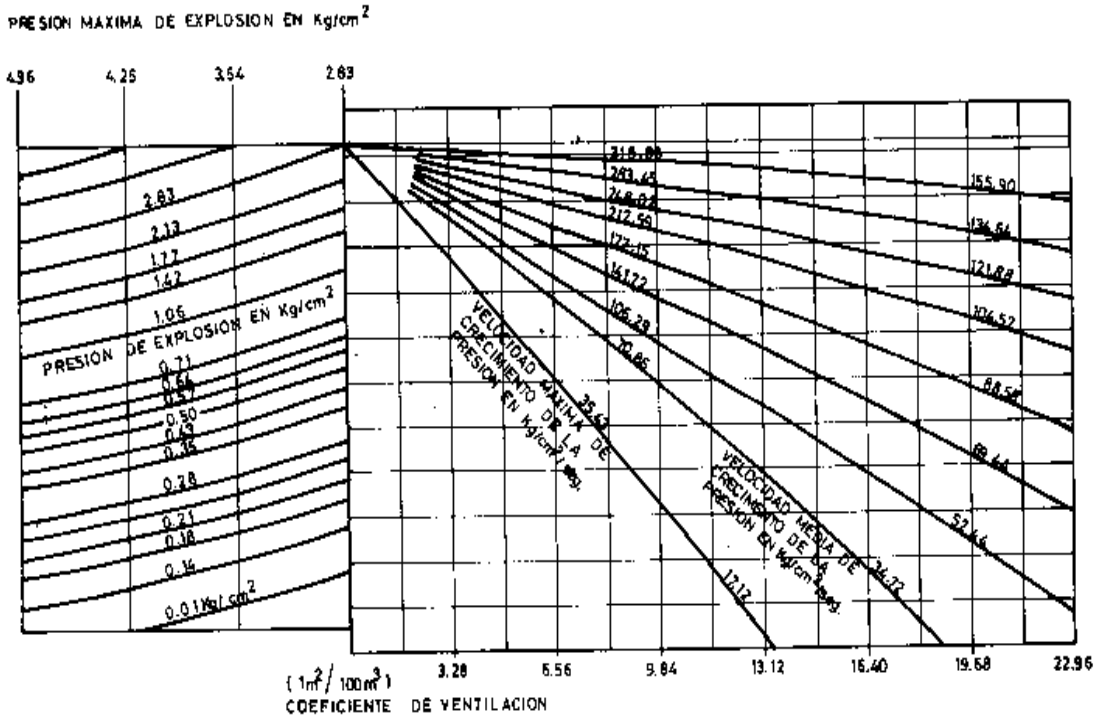
Se han realizado ensayos de explosiones mediante la utilización de un aparato con un volumen de 1,30 litros denominado Bomba Hartman que determina la cantidad mínima de concentración de polvo combustible necesario, para que se produzca la explosión. Se ha podido comprobar que existe un límite superior de la velocidad de crecimiento de la presión en el curso de la explosión y debida a la cantidad de oxígeno presente en el recinto. Para un volumen dado de un recinto cerrado, hay una superficie óptima de partículas; cualquier tentativa para aumentar la velocidad de crecimiento de la presión, aumentando la superficie de las partículas o haciendo disminuir la distancia que las separa, estaría limitada por la cantidad de oxígeno existente.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que los ensayos que se han realizado en laboratorio, por especialistas con recipientes reducidos y donde se puede conseguir una homogeneización del recinto donde se va a ensayar la explosión, difiere mucho de la realidad, con grandes volúmenes y donde la distribución de polvo no es uniforme.

Los resultados obtenidos en laboratorio, podemos considerarlos como aproximados. El resumen de los resultados obtenidos indica, que la presión máxima de explosión, está comprendida entre 2,80 y 5,00 kg/cm2. La velocidad máxima de crecimiento de la presión

durante la explosión, se considera varia entre 35 y 316 kg/cm2 cada segundo. Los valores obtenidos en explosiones ocurridas en silos reales, dan como resultado, una presión máxima de 8,10 kg/cm2 y una velocidad de crecimiento de la presión de 1.400 kg/cm2 cada segundo, muy superior a los valores obtenidos en laboratorio. El resultado de los ensayos realizados en laboratorio, se traslada al gráfico mostrado a continuación, que nos permite determinar la presión de explosión o el coeficiente de ventilación.

El coeficiente de ventilación es el número de metros cuadrados de aberturas por 100 m3 de volumen de recinto. Según la figura, supongamos un recinto con un coeficiente de ventilación de 13 m2 por 100 m3. Supongamos una velocidad máxima de crecimiento de la presión de 177 kg/cm2/seg. y presión máxima de 3,80 kg/cm2. Para obtener la presión máxima de explosión en este recinto tomamos el coeficiente de ventilación de 13 y subimos la vertical hasta alcanzar la curva 177 kg/cm2 l seg. seguimos horizontalmente hacia la izquierda hasta alcanzar A = 3,80. El valor de la presión de explosión indicada en este punto es de 1,06 kg/cm2.



Consecuencias de una explosión.

Los gases producidos por la combustión y las diversas transformaciones químicas que la acompañan son muy abundantes, y se desprenden tan rápidamente que determinan en la atmósfera la aparición de una onda de compresión, denominada onda de choque, que se propaga a una velocidad de varios cientos de kilómetros por segundo.

Según los especialistas, la presión máxima que puede esperarse con polvo de maíz, como consecuencia de una explosión en un recinto totalmente cerrado y resistente es del orden de 9 kg/cm2. Prácticamente ningún edificio puede resistir tal presión interna. La presión máxima se alcanza en menos de 0,025 segundos.

En general un silo metálico se deforma, pero no se destruye.

Se han efectuado dos explosiones en silos y edificios reales, provocados mediante suspensión de partículas metálicas, utilizándose un coeficiente de ventilación de 19 m2 por 100 m3 y no se apreció ningún desperfecto en la estructura. Solamente se apreciaron los desperfectos causados por el incendio, que apareció posteriormente a la explosión y que fue inmediatamente apagado por una instalación automática de rociadores. Los ensayos efectuados en laboratorio han dado presiones en las explosiones con valores máximos de 5 kg/cm2 mientras que los valores máximos detectados en silos reales han alcanzado los 9 kg/cm2.

Causas que pueden originar una explosión.

El polvo de maíz necesita una temperatura del orden de 400 a 450 grados centígrados para inflamarse. La energía mínima necesaria es de 40 a 50 milijulios, que es muy débil con relación a la que desprenden los arcos de cortadura (sopletes). La rotura de una lámpara eléctrica es suficiente, así como la menor llama, una partícula de tabaco en ignición alcanza de 600 a 800 grados centígrados, en aire inmóvil y 1.000 grados centígrados, en la menor corriente de aire. O la chispa de un metal producida por un choque. Por el contrario las igniciones debidas a una descarga electrostática parecen menos fáciles, salvo, evidentemente, las causadas por un rayo, que es capaz de producir enormes cantidades de energía calorífica. Por otra parte, los aseguradores de incendios saben que las nubes de polvo que se forman encima de los edificios, favorecen notablemente la caída del rayo.

La temperatura de inflamación del polvo depositado en el suelo es de 200 a 250 grados centígrados. Esta inflamación produce un incendio que puede o no dar origen a una explosión. En este caso un aporte de energía exterior, no es siempre necesario pues el polvo puede ser el centro de una combustión espontánea causada por una transformación orgánica. Las causas exteriores más comunes, que permiten alcanzar los 200 a 250 grados centígrados son: material eléctrico Sobrecargado o defectuoso, cuyo revestimiento sobre el que está depositado el polvo, se calienta anormalmente; no olvidemos que el depósito de polvo juega el papel de un

calorífugo, el aumento de temperatura puede ser producido por conducciones de vapor o de fluido caliente en sus partes no aisladas. Las partes de máquinas o de transmisiones mecánicas donde se producen rozamientos anormales: cojinetes defectuosos, correas desplazadas, etc. Pero las causas más frecuentes, aunque casi siempre son imposibles de poner en evidencia son, según los especialistas, las cerillas y los cigarros mal apagados, así como los trabajos de mantenimiento en los que se utilizan sopletes o soldadura.

El desprendimiento de polvos, seguido de su depósito sobre todas las superficies, se produce, naturalmente en los lugares donde el producto almacenado está sometido a una agitación. Se trata principalmente de instalaciones de recepción, manutención y tratamiento: descarga de vehículos de transporte, galerías de transportadores automáticos, principalmente en los lugares donde el producto almacenado, es transferido de una banda transportadora a otra por simple caída, torre de manutención, con paso por gravedad a través de diversos aparatos, parte superior de celdas o silos multicelulares en fase de llenado, incluso cuando el producto almacenado se considera que está limpio, ya que el tegumento de los granos se compone de numerosas capas muy finas y quebradizas que se desprenden fácilmente.

Normas de seguridad para reducir al mínimo el riesgo de explosiones

En instalaciones susceptibles de incendio o explosión las medidas a tomar son:

- Precauciones a tomar en la concepción y cálculo de la instalación.
- Dispositivos antiexplosión.
- Necesidad de limpieza.
- Mantenimiento de elementos mecánicos.
- Formación de personal.

- Permiso de fuego.

Precauciones a tomar en la concepción y cálculo de la instalación

A) Cualquier almacenamiento de gas hidrocarburo, butano, etc. se efectuará a 50 m de distancia del silo o instalación.

B) Carga y descarga, exterior al silo.

En caso contrario. se colocarán paredes antifuego y estancas al polvo.

C) La sala de control se construirá exterior a los silos o instalaciones a ser posible. Debe ser resistente y tener puertas antifuego.

D) Los vestuarios del personal, se encontrarán fuera de las instalaciones del silo y edificio de maquinaria.

E) Todas las plantas de la instalación deberán resistir 1 .000 kg/m2.

F) Oficinas, laboratorios, párking, a la mayor distancia posible de los silos o instalaciones.

G) La instalación eléctrica debe ser antideflagrante en toda su extensión. Los cables deben estar protegidos con envolventes metálicos para evitar el ataque de roedores.

H) En galerías, el suelo debe ser liso y de fácil acceso, intentando mantenerlo limpio de polvo.

I) La eventualidad de la caída de un rayo, que se encuentra favorecida por la actividad del establecimiento, no debe ser olvidada y debe efectuarse una instalación de pararrayos con protección.

Precauciones del personal.

La necesidad de limpieza en la instalación.

La limpieza periódica de toda la instalación es indispensable, ya que cualquier corriente de aire, o una explosión reducida puede originar una gran explosión con carácter devastador.

En el diseño deben evitarse las superficies planas en los elementos estructurales, mecánicos y eléctricos; en caso contrario, la limpieza debe ser controlada y verificada en estas zonas. El interior de los silos, también debe limpiarse periódicamente, ya que el polvo en las paredes, techo y tolvas es suficiente para producir una importante explosión.

Mantenimiento elementos mecánicos

- Toda la maquinaria tendrá toma de tierra.

- Se evitarán a ser posible, todas las cargas electrostáticas.

- Es necesaria la colocación de electroimanes a la entrada del material almacenado.

- Si la celda se dota de sistemas de aspiración, la velocidad del aire en la parte alta, será

inferior a 0,1 m/seg. para evitar que se levante polvo.

- El único sistema de calefacción será mediante agua caliente y radiadores.

- Todos los elementos mecánicos deben diseñarse, para que no se produzca polvo.-

- Como aparatos preventivos debemos instalar:

- Explosímetros.

- Detectores de temperatura.

- Sondas termométricas.

- Niveles de máxima y mínima.

- Amperímetros en motores.

- Extintores automáticos de incendio.

Formación de personal

El personal que se encuentra trabajando en una instalación, en la que se producen polvos combustibles, que mezclados con aire producen una nube de polvo altamente explosiva y por consiguiente muy peligrosa, debe asistir a cursillos de formación, que pueden darse en la empresa por personal cualificado, ya que sus actos pueden ocasionar graves y serios perjuicios tanto humanos como económicos.

Permiso de fuego

Antes de iniciar cualquier trabajo de mantenimiento, reforma o ampliación, se debe avisar al responsable de mantenimiento, que presentándose en el lugar donde se va a realizar la operación, extenderá un permiso de fuego, que es una hoja en la que se especifica:

- Fecha y hora del inicio del trabajo.

- Fecha y hora del final del trabajo.

- Operación a realizar.

- Operario responsable del trabajo.

- Comprobar que existen extintores cerca y que estén en buenas condiciones.

- Comprobar que la fábrica o zona en revisión o reparación, está parada.

- En caso de soldadura, evitar la formación de nubes de polvo y tener a mano agua y extintores

Dispositivos antiexplosión

En los últimos años, se ha desarrollado una importante investigación, que ha culminado con una serie de dispositivos que nos permiten evitar que la explosión se propague y aumente la presión. Los dispositivos más utilizados son:

- Discos de ruptura.

- Paneles antiexplosión.

- Gas inerte.

- Ventanas de apertura y cierre.

Antes de pasar a describir los apartados anteriormente indicados, vamos a hablar de la norma VDI 3673, disminución de la presión en las explosiones de polvos y en lo que se basa el cálculo y funcionamiento de los aparatos indicados.

Los comités nacionales, miembros de la sección 11 de la Sección Europea de la Manutención, en reunión plenaria en Malcome en junio de 1982 deciden adoptar las recomendaciones de la norma VDI 3673. La sección II de la FEM recomienda a sus miembros y clientes la recomendación de este documento, que indica las soluciones prácticas, habiendo realizado las pruebas para la selección y el cálculo de dispositivos de reducción. Los especialistas de la VDI (prevención de la polución atmosférica), estudian los apartados para la depuración de gases y recuperación de polvos, cálculo de costos y tecnología de polvos combustibles.

Los efectos de las materias contaminantes en el hombre, animales, plantas, objetos y las recomendaciones de los valores de emisión máximos. Procedimientos de medida de las impurezas en forma de gas y polvo. Criterios de selección y forma de interpretar los

resultados obtenidos. Se describen las medidas para reducir los efectos de una explosión de polvos combustibles y se dan indicaciones sobre los dispositivos, forma y cálculo de dispositivos de descarga.

El método indicado es general y se aplica en aparatos de almacenamiento de polvo, así como dispositivos de lucha contra la polución. Polvos son materias finas que pueden formar con el aire mezclas explosivas, ejemplo de productos agrícolas, metálicos y plásticos. En la lucha contra las explosiones debemos esforzarnos para evitar las fuentes de ignición, que son la causa principal de la producción de una explosión. Vamos a definir los principales parámetros que afectan a un dispositivo antiexplosivo:

Pstat = Presión media a partir de la cual un dispositivo antiexplosivo entra en acción. La forma del dispositivo puede ser: Cúbico con una relación longitud-diámetro, menor que 5/1. Alargado con relación longitud diámetro mayor que 5/1.

Pred = Presión reducida, que es la presión máxima a preveer en caso de explosión, en un silo o edificio equipado con dispositivos de descarga de presión.

F(m2) = Superficie de descarga absoluta, y que puede estar constituida por numerosas superficies eventuales.

F(m2/ m3) = Superficie de descarga específica, e igual a la relación entre la Superficie de descarga absoluta F en metros cuadrados y el volumen del recipiente V en metros cúbicos.

Tipos de dispositivos antiexplosivos.

Discos de ruptura.

Según la norma B5 2.915-1.984 (British Standard), los discos de ruptura se han diseñado, para proteger los silos, conductos y otros dispositivos cerrados, de la presión excesiva producida por ejemplo, por una explosión de polvo combustible. La calidad de un disco de ruptura, se mide por el tipo, dimensiones y límites máximos y mínimos de presión especificados.

Los discos de ruptura en su fabricación, se les da un número de la serie de fabricación, número que se coloca en lugar visible. Los discos de ruptura se construyen con material metálico, con un espesor menor de 0,2 mm.

Para comprobar que los discos de ruptura están comprendidos entre las presiones máximas y mínimas calculadas, se realizan ensayos mediante toma estadística de muestras.

- Para una serie de fabricación de 10 unidades se ensayan 2.

- Entre 10 y 15 unidades se ensayan 3.

- Entre 16 y 30 unidades se ensayan 4.

- Entre31 y 100 unidades se ensayan 6.

- Entre 100 y 250 unidades se ensayan el 6% y no menos de 6 unidades.

- Entre 250 y 1.000 unidades se ensayan e13% y no menos de 10 unidades.

Cada disco de ruptura lleva un certificado de calidad en el que se indica:

- Fecha de fabricación.

- Descripción del silo, depósito, conducto o edificación a colocar.

- Material de fabricación y dimensiones.

- Presión de explosión. Por ejemplo: 0,1 Bar con un error del 25% en mas o menos, es decir, 0,075 y 0,125 Bar a 20 grados centígrados.

- El certificado correspondiente, con los ensayos definidos por la norma BS

  2.915-1.984.

Los discos de ruptura se sirven entre diámetros de 3 mm y 900 mm y presiones que oscilan entre 0,35 Bar y 1.400 Bar, según dimensiones. La temperatura de trabajo puede alcanzar hasta 600 grados centígrados.

Los discos de ruptura se construyen con metales tales como níquel, aluminio, acero inoxidable. Los discos de grafito, están especialmente indicados para aquellas aplicaciones que requieran presiones bajas de ruptura, suministrándose con un margen de presión de hasta 0,07 Bar. Además el grafito es resistente al ataque de la mayoría de productos químicos.

Paneles antiexplosivos

Los paneles antiexplosivos están sujetos a las mismas normas que los discos de ruptura, en cuanto a ensayos y certificaciones. Son dispositivos que se colocan en silos, conducciones, edificaciones, etc. que son susceptibles de sufrir una explosión de polvo combustible. Al iniciarse la explosión se rompe el panel a baja presión y la instalación queda protegida.

Normalmente se construyen paneles con secciones de ventilación, que oscilan entre 0,07 m2 y 1,27 m2. A modo de ejemplo podemos comprobar como la colocación de un panel antiexplosión de 0,1 Bar en un silo que está calculado para soportar una carga de 0,3 Bar impide la destrucción del silo, en caso de explosión, ya que al iniciarse esta, y cuando la presión alcanza los 0,1 Bar se rompe el panel antiexplosivo, alcanzándose una presión máxima de 0,25 Bar. Si el panel antiexplosivo elegido fuera de 0,2 Bar, al producirse la explosión en el silo, se alcanzarían los 0,4 Bar con lo que la instalación vería reducida su seguridad a límites muy bajos.

Si el panel antiexplosivo elegido fuera de 0,5 Bar, al producirse la explosión, el silo alcanzaría los 0,8 Bar, valor que produciría serios desperfectos en el silo e incluso su rotura. Si el panel antiexplosivo elegido fuera mayor de 0,5 Bar, la presión de la explosión subiría tan

rápidamente que el efecto de ventilación del panel, sería mínima, quedando el silo totalmente destruido y el área de trabajo devastada.

En la figura 11, se puede obtener en función del volumen del recipiente, la presión reducida y del valor Kst característica de la nube de polvo, el valor de la superficie de ventilación en m2. Esta superficie puede repartirse entre uno o varios paneles antiexplosivos.

Gas inerte

La utilización de gas inerte, que se inyecta en el momento que se detecta el inicio de una explosión, se suele utilizar en elementos mecánicos cuyo volumen sea reducido, y una reducida cantidad de gas inerte frena la explosión.

En grandes recintos e instalaciones, este dispositivo resulta inviable, debido a la gran instalación que se precisaría, y al riesgo que entraña, para el personal que trabaja en la factoría.

Ventanas de apertura y cierre

Se colocan fundamentalmente en instalaciones y edificios de fabricación. Su inercia es muy superior al panel antiexplosivo, por lo que se han de diseñar para

presiones máximas muy reducidas. Su situación ha de realizarse de acuerdo con la geometría del edificio, situación de las fuentes de ignición y posible zona donde se puede iniciar la explosión.

Nuestros paneles, como hemos explicado anteriormente, son del tipo ELFAB HUGHES, con dimensiones externas de 1220x1220 mm y de dimensiones internas 1130x1130, con presión de apertura de 1,10 bar (0,22 bar cada panel de explosión), a 20 º C, provistos de sistemas de descarga, corriente estática y detectores de apertura. El área de ventilación es de 6,35 m^2 (1,27 m^2 cada uno), con una presión reducida de 1,20 kg/cm^2, equivalente a 2000 kg/m^2. La membrana para sellar el panel es de fluoropolímero y el marco de acero al carbono pintado al horno.

El material de la sección de salida, así como la de entrada es de acero inoxidable austenítico.

CÁLCULO DE TENSIONES MÁXIMAS SEGÚN LOS RESULTADOS PROGRAMA ESTRUCTURA

ACCIONES A CONSIDERAR

1- CASO CARGA CARGAS PRINCIPALES							
VIGA	**PERFIL**		**NUDO**	**FZA X**	**MTO Y**	**MTO Z**	
1	L 80/80/8	NUDO1/FZA X/MTO Y/MTO Z	5	641,00	12,60	6,37	2,03
	Área	1230	5				0,00
	Wy/Wz	12,6	9	641,00	6,37	1,95	1,18
			9				0,00
2	L 80/80/8		8	641,00	12,60	6,37	2,03
			8				0,00
			9	641,00	6,37	1,95	1,18
			9				0,00
3	L 80/80/8		9	479,00	0,14	0,68	0,45
			9				0,00
			1	479,00	0,14	1,47	0,52
			1				0,00
4	L 80/80/8		9	479,00	0,14	0,68	0,45
			9				0,00
			2	479,00	0,14	1,47	0,52
			2				0,00
5	L 80/80/8		6	641,00	12,60	6,37	2,03
			6				0,00
			10	641,00	6,37	1,95	1,18
			10				0,00
6	L 80/80/8		10	479,00	0,14	0,68	0,45
			10				0,00
			3	479,00	0,14	1,47	0,52
			3				0,00
7	L 80/80/8		7	641,00	12,60	6,37	2,03
			7				0,00
			10	641,00	6,37	1,95	1,18
			10				0,00
8	L 80/80/8		10	479,00	0,14	0,68	0,45
			10				0,00
			4	479,00	0,14	1,47	0,52
			4				0,00
9	IPE 270		11	589,00	0,05	86,50	0,33
	Área	4590	11				0,00
	Wy	62,2	12	589,00	0,05	86,50	0,33
	Wz	429	12				0,00
10	IPE 270		12	231,00	2,13	90,10	0,29
			12				0,00
			10	231,00	2,02	217,00	0,59
			10				0,00
11	IPE 270		10	231,00	2,13	90,10	0,29
			10				0,00
			14	231,00	2,02	217,00	0,59
			14				0,00
12	IPE 270		13	589,00	0,05	86,50	0,33
			13				0,00
			14	589,00	0,05	86,50	0,33
			14				0,00

13	IPE 270		11	231,00	2,13	90,10	0,29
			11				0,00
			9	231,00	2,02	217,00	0,59
			9				0,00
14	IPE 270		9	231,00	2,13	90,10	0,29
			9				0,00
			13	231,00	2,02	217,00	0,59
			13				0,00
15	L 70/70/7		5	262,00	4,28	4,35	1,30
	Área	940	5				0,00
	Wy/Wz	8,41	12	262,00	1,80	2,85	0,83
			12				0,00
16	L 70/70/7		13	262,00	4,28	4,35	1,30
			13				0,00
			7	262,00	1,80	2,85	0,83
			7				0,00
17	HEB-240		5	5550,00	693,00	1190,00	3,91
	Área	10600	5				0,00
	Wy	327	11	5550,00	290,00	372,00	1,81
	Wz	938	11				0,00
18	HEB-240		11	5900,00	36,20	137,00	0,81
			11				0,00
			1	5900,00	73,40	282,00	1,08
			1				0,00
19	HEB-240		6	5550,00	693,00	1190,00	3,91
			6				0,00
			12	5550,00	290,00	372,00	1,81
			12				0,00
20	HEB-240		7	5550,00	693,00	1190,00	3,91
			7				0,00
			14	5550,00	290,00	372,00	1,81
			14				0,00
21	HEB-240		8	5550,00	693,00	1190,00	3,91
			8				0,00
			13	5550,00	290,00	372,00	1,81
			13				0,00
22	HEB-240		12	5900,00	36,20	137,00	0,81
			12				0,00
			4	5900,00	73,40	282,00	1,08
			4				0,00
23	HEB-240		13	5900,00	36,20	137,00	0,81
			13				0,00
			2	5900,00	73,40	282,00	1,08
			2				0,00
24	HEB-240		14	5900,00	-36,2	137,00	0,81
			14				0,00
			3	5900,00	-73,4	282,00	1,08
			3				0,00
25	L70/70/7		8	262,00	-4,28	4,35	5,10
	Área	940	8				0,00
	Wy/Wz	8,41	14	262,00	-1,8	2,85	9,35

			14				0,00
VIGA	**PERFIL**		**NUDO**	**FZA X**	**MTO Y**	**MTO Z**	
26	L70/70/7		11	262,00	4,28	4,35	1,30
	Área	940	11				0,00
	Wy/Wz	8,41	6	262,00	1,80	2,85	0,83
			6				0,00
27	IPE 330		5	42,90	0,14	774,00	1,09
	Área	6260	5				0,00
	Wy	98,5	21	42,90	0,30	1810,00	2,55
	Wz	713	21				0,00
28	IPE 330		21	42,60	0,19	2750,00	3,87
			21				0,00
			16	42,60	0,19	1910,00	2,69
			16				0,00
29	IPE 330		16	42,60	0,19	2750,00	3,87
			16				0,00
			22	42,60	0,19	1910,00	2,69
			22				0,00
30	IPE 330		22	42,90	0,14	774,00	1,09
			22				0,00
			6	42,90	0,30	1810,00	2,55
			6				0,00
31	IPE 330		6	160,00	0,35	1250,00	1,78
			6				0,00
			23	160,00	0,05	1410,00	2,00
			23				0,00
32	IPE 330		23	160,00	0,02	2260,00	3,20
			23				0,00
			17	160,00	0,02	1420,00	2,02
			17				0,00
33	IPE 330		17	160,00	0,02	2260,00	3,20
			17				0,00
			24	160,00	0,02	1420,00	2,02
			24				0,00
34	IPE 330		24	160,00	0,35	1250,00	1,78
			24				0,00
			7	160,00	0,48	1410,00	2,01
			7				0,00
35	IPE 330		5	160,00	0,35	1250,00	1,78
			5				0,00
			19	160,00	0,05	1410,00	2,00
			19				0,00
36	IPE 330		19	160,00	0,02	2260,00	3,20
			19				0,00
			15	160,00	0,02	1420,00	2,02
			15				0,00
37	IPE 330		15	160,00	0,02	2260,00	3,20
			15				0,00
			20	160,00	0,02	1420,00	2,02
			20				0,00

38	IPE 330		20	160,00	0,35	1250,00	1,78
			20				0,00
			8	160,00	0,05	1410,00	2,00
			8				0,00
39	IPE 330		8	42,90	0,14	774,00	1,09
			8				0,00
			25	42,90	0,30	1810,00	2,55
			25				0,00
40	IPE 330		25	42,60	0,19	2750,00	3,87
			25				0,00
			18	42,60	0,19	1910,00	2,69
			18				0,00
41	IPE 330		18	42,60	0,19	2750,00	3,87
			18				0,00
			26	42,60	0,19	1910,00	2,69
			26				0,00
42	IPE 330		26	42,90	0,14	774,00	1,09
			26				0,00
			7	42,90	0,30	1810,00	2,55
			7				0,00
43	IPE 270		19	0,44	0,11	104,00	0,24
	Área	4590	19				0,00
	Wy	62,2	21	0,44	0,02	53,80	0,13
	Wz	429	21				0,00
44	IPE 270		22	0,44	0,02	53,80	0,13
			22				0,00
			23	0,44	0,11	104,00	0,24
			23				0,00
45	IPE 270		24	0,44	0,11	104,00	0,24
			24				0,00
			26	0,44	0,02	53,80	0,13
			26				0,00
46	IPE 270		20	0,44	0,11	104,00	0,24
			20				0,00
			25	0,44	0,02	53,80	0,13
			25				0,00

2- CASO CARGA SILO							
VIGA	**PERFIL**		**NUDO**	**FZA X**	**MTO Y**	**MTO Z**	
1	L 80/80/8	NUDO1/FZA X/MTO Y/MTO Z	5	17000,00	334,00	169,00	53,74
	Área	1230	5				0,00
	Wy/Wz	12,6	9	17000,00	169,00	51,80	31,34
			9				0,00
2	L 80/80/8		8	17000,00	334,00	169,00	53,74
			8				0,00
			9	17000,00	169,00	51,80	31,34
			9				0,00
3	L 80/80/8		9	12700,00	3,73	18,20	12,07
			9				0,00
			1	12700,00	3,73	39,20	13,73
			1				0,00
4	L 80/80/8		9	12700,00	3,73	18,20	12,07
			9				0,00
			2	12700,00	3,73	39,20	13,73
			2				0,00
5	L 80/80/8		6	17000,00	334,00	169,00	53,74
			6				0,00
			10	17000,00	169,00	51,80	31,34
			10				0,00
6	L 80/80/8		10	12700,00	3,73	18,20	12,07
			10				0,00
			3	12700,00	3,73	39,20	13,73
			3				0,00
7	L 80/80/8		7	17000,00	334,00	169,00	53,74
			7				0,00
			10	17000,00	169,00	51,80	31,34
			10				0,00
8	L 80/80/8		10	12700,00	3,73	18,20	12,07
			10				0,00
			4	12700,00	3,73	39,20	13,73
			4				0,00
9	IPE 270		11	15700,00	1,35	2300,00	8,80
	Área	4590	11				0,00
	Wy	62,2	12	15700,00	1,35	2300,00	8,80
	Wz	429	12				0,00
10	IPE 270		12	6140,00	56,50	2400,00	7,84
			12				0,00
			10	6140,00	53,80	5790,00	15,70
			10				0,00
11	IPE 270		10	6140,00	56,50	2400,00	7,84
			10				0,00
			14	6140,00	53,80	5790,00	15,70
			14				0,00
12	IPE 270		13	15700,00	1,35	2300,00	8,80
			13				0,00
			14	15700,00	1,35	2300,00	8,80
			14				0,00

13	IPE 270		11	6140,00	56,50	2400,00	7,84
			11				0,00
			9	6140,00	53,80	5790,00	15,70
			9				0,00
14	IPE 270		9	6140,00	56,50	2400,00	7,84
			9				0,00
			13	6140,00	53,8	5790,00	16,67
			13				0,00
15	L 70/70/7		5	6940,00	114,00	116,00	26,86
	Área	940	5				0,00
	Wy/Wz	8,41	12	6940,00	47,80	75,80	29,95
			12				0,00
16	L 70/70/7		13	6940,00	114,00	116,00	26,86
			13				0,00
			7	6940,00	47,80	75,80	2204,27
			7				0,00
17	HEB-240		5	147000,00	18400,00	31600,00	71,17
	Área	10600	5				0,00
	Wy	327	11	147000,00	7720,00	9890,00	27,35
	Wz	938	11				0,00
18	HEB-240		11	157000,00	962,00	3650,00	24,67
			11				0,00
			1	157000,00	1950,00	7510,00	79,09
			1				0,00
19	HEB-240		6	147000,00	18400,00	31600,00	71,17
			6				0,00
			12	147000,00	7720,00	9890,00	80,68
			12				0,00
20	HEB-240		7	147000,00	18400,00	31600,00	71,17
			7				0,00
			14	147000,00	7720,00	9890,00	80,68
			14				0,00
21	HEB-240		8	147000,00	18400,00	31600,00	71,17
			8				0,00
			13	147000,00	7720,00	9890,00	27,35
			13				0,00
22	HEB-240		12	157000,00	962,00	3650,00	24,67
			12				0,00
			4	157000,00	1950,00	7510,00	25,76
			4				0,00
23	HEB-240		13	157000,00	962,00	3650,00	24,67
			13				0,00
			2	157000,00	1950,00	7510,00	25,76
			2				0,00
24	HEB-240		14	157000,00	962,00	3650,00	24,67
			14				0,00
			3	157000,00	1950,00	7510,00	23,17
			3				0,00
25	L70/70/7		8	6940,00	114,00	116,00	26,86
	Área	940	8				0,00
	Wy/Wz	8,41	14	6940,00	47,80	75,80	16,40
			14				0,00

26	L70/70/7		11	6940,00	114,00	116,00	34,73
	Área	940	11				0,00
	Wy/Wz	8,41	6	6940,00	47,80	75,80	22,08
			6				0,00
27	IPE 330		5	1130,00	3,72	20600,00	29,11
	Área	6260	5				0,00
	Wy	98,5	19	1130,00	8,08	48300,00	68,00
	Wz	713	19				0,00
28	IPE 330		19	1120,00	5,09	73100,00	102,76
			19				0,00
			15	1120,00	5,09	51000,00	71,76
			15				0,00
29	IPE 330		15	1120,00	5,09	73100,00	102,76
			15				0,00
			20	1120,00	5,09	51000,00	71,76
			20				0,00
30	IPE 330		20	1130,00	3,72	20600,00	29,11
			20				0,00
			8	1130,00	8,08	48300,00	68,00
			8				0,00
31	IPE 330		8	4260,00	9,44	33100,00	47,20
			8				0,00
			25	4260,00	1,24	37700,00	53,57
			25				0,00
32	IPE 330		25	4270,00	0,63	60000,00	84,84
			25				0,00
			18	4270,00	0,63	37900,00	53,84
			18				0,00
33	IPE 330		18	4270,00	0,63	60000,00	84,84
			18				0,00
			26	4270,00	0,63	37900,00	53,84
			26				0,00
34	IPE 330		26	4260,00	9,44	33100,00	47,20
			26				0,00
			7	4260,00	1,24	37700,00	53,57
			7				0,00
35	IPE 330		5	4260,00	9,44	33100,00	47,20
			5				0,00
			21	4260,00	1,24	37700,00	53,57
			21				0,00
36	IPE 330		21	4270,00	0,63	60000,00	84,84
			21				0,00
			16	4270,00	0,63	37900,00	53,84
			16				0,00
37	IPE 330		16	4270,00	0,63	60000,00	84,84
			16				0,00
			22	4270,00	0,63	379000,0	532,25
			22				0,00

38	IPE 330		22	4260,00	9,44	33100,00	47,20
			22				0,00
			6	4260,00	1,24	37700,00	53,57
			6				0,00
39	IPE 330		6	1130,00	3,72	20600,00	29,11
			6				0,00
			23	1130,00	8,08	48300,00	68,00
			23				0,00
40	IPE 330		23	1120,00	5,09	73100,00	102,76
			23				0,00
			17	1120,00	5,09	51000,00	71,76
			17				0,00
41	IPE 330		17	1120,00	5,09	73100,00	102,76
			17				0,00
			24	1120,00	5,09	51000,00	71,76
			24				0,00
42	IPE 330		24	1130,00	3,72	20600,00	29,11
			24				0,00
			7	1130,00	8,08	48300,00	68,00
			7				0,00
43	IPE 270		19	11,80	2,99	27800,00	48,07
	Área	4590	19				0,00
	Wy	62,2	21	11,80	0,61	1440,00	112,60
	Wz	429	21				0,00
44	IPE 270		22	11,80	0,61	1440,00	64,81
			22				0,00
			23	11,80	2,99	2780,00	3,41
			23				0,00
45	IPE 270		20	11,80	2,99	2780,00	3,41
			20				0,00
			25	11,80	0,61	1440,00	6,49
			25				0,00
46	IPE 270		26	11,80	2,99	2780	6,53
			26				0,00
			24	11,80	0,61	-1440	3,37
			24				0,00

3- CASO CARGA PRINCIPAL VIENTO							
VIGA	**PERFIL**		**NUDO**	**FZA X**	**MTO Y**	**MTO Z**	
1	L 80/80/8	NUDO1/FZA X/MTO Y/MTO Z	5	8190,00	327,00	188,00	47,53
	Área	1230	5				0,00
	Wy/Wz	12,6	9	8190,00	159,00	236,00	38,01
			9				0,00
2	L 80/80/8		8	8910,00	334,00	188,00	48,67
			8				0,00
			9	8910,00	174,00	236,00	39,78
			9				0,00
3	L 80/80/8		9	3040,00	2,98	637,00	53,26
			9				0,00
			1	3040,00	7,58	486,00	41,64
			1				0,00
4	L 80/80/8		9	3810,00	4,99	637,00	54,05
			9				0,00
			2	3810,00	9,59	486,00	42,43
			2				0,00
5	L 80/80/8		6	25100,00	334,00	151,00	58,90
			6				0,00
			10	25100,00	165,00	132,00	43,98
			10				0,00
6	L 80/80/8		10	22400,00	10,40	600,00	66,66
			10				0,00
			3	22400,00	15,00	408,00	51,78
			3				0,00
7	L 80/80/8		7	25800,00	341,00	151,00	60,02
			7				0,00
			10	25800,00	180,00	132,00	45,74
			10				0,00
8	L 80/80/8		10	21600,00	2,47	600,00	65,38
			10				0,00
			4	21600,00	2,12	408,00	50,11
			4				0,00
9	IPE 270		11	13400,00	53,20	50200,00	120,79
	Área	4590	11				0,00
	Wy	62,2	12	13400,00	49,60	54800,00	131,46
	Wz	429	12				0,00
10	IPE 270		12	5850,00	212,00	1410,00	7,97
			12				0,00
			10	5850,00	178,00	5250,00	16,37
			10				0,00
11	IPE 270		10	6430,00	212,00	1410,00	8,10
			10				0,00
			14	6430,00	182,00	5210,00	16,47
			14				0,00
12	IPE 270		13	17900,00	52,30	50200,00	121,76
			13				0,00
			14	17900,00	50,50	54800,00	132,45
			14				0,00

13	IPE 270		11	5860,00	325,00	3380,00	14,38
			11				0,00
			9	5860,00	290,00	6360,00	20,76
			9				0,00
14	IPE 270		9	6440,00	325,00	3380,00	14,51
			9				0,00
			13	6440,00	286,00	6330,00	20,76
			13				0,00
15	L 70/70/7		5	81300,00	111,00	154,00	118,00
	Área	940	5				0,00
	Wy/Wz	8,41	12	81300,00	41,50	199,00	115,09
			12				0,00
16	L 70/70/7		13	67500,00	117,00	77,10	94,89
			13				0,00
			7	67500,00	54,00	47,50	83,88
			7				0,00
17	HEB-240		5	25900,00	18300,00	35500,00	96,25
	Área	10600	5				0,00
	Wy	327	11	25900,00	7470,00	43600,00	71,77
	Wz	938	11				0,00
18	HEB-240		11	51300,00	613,00	121000,00	135,71
			11				0,00
			1	51300,00	1210,00	93600,00	108,33
			1				0,00
19	HEB-240		6	124000,00	18200,00	27700,00	96,89
			6				0,00
			12	124000,00	7030,00	23800,00	58,57
			12				0,00
20	HEB-240		7	269000,00	18500,00	27700,00	111,48
			7				0,00
			14	269000,00	7970,00	23800,00	75,12
			14				0,00
21	HEB-240		8	170000,00	18700,00	35500,00	111,07
			8				0,00
			13	170000,00	8410,00	43600,00	88,24
			13				0,00
22	HEB-240		12	215000,00	865,00	113000,00	143,40
			12				0,00
			4	215000,00	1710,00	78600,00	109,31
			4				0,00
23	HEB-240		13	98500,00	1060,00	120000,00	140,47
			13				0,00
			2	98500,00	2190,00	93600,00	115,78
			2				0,00
24	HEB-240		14	365000,00	1310,00	113000,00	158,91
			14				0,00
			3	365000,00	2690,00	78600,00	126,46
			3				0,00
25	L70/70/7		8	88300,00	113,00	157,00	126,04
	Área	940	8				0,00
	Wy/Wz	8,41	14	88300,00	47,30	202,00	123,58
			14				0,00

VIGA	PERFIL		NUDO	FZA X	MTO Y	MTO Z	
26	L70/70/7		11	74500,00	115,00	74,20	101,75
	Área	940	11				0,00
	Wy/Wz	8,41	6	74500,00	48,20	50,40	90,98
			6				0,00
27	IPE 330		5	2260,00	12,20	20400,00	29,10
	Área	6260	5				0,00
	Wy	98,5	19	2260,00	5,32	48300,00	68,16
	Wz	713	19				0,00
28	IPE 330		19	2270,00	8,77	72900,00	102,70
			19				0,00
			15	2270,00	8,68	50900,00	71,84
			15				0,00
29	IPE 330		15	2270,00	8,77	72900,00	102,70
			15				0,00
			20	2270,00	8,86	50800,00	71,70
			20				0,00
30	IPE 330		20	2270,00	21,70	20700,00	29,62
			20				0,00
			8	2270,00	0,33	48200,00	67,97
			8				0,00
31	IPE 330		8	1990,00	32,80	36700,00	52,12
			8				0,00
			25	1990,00	4,53	36500,00	51,56
			25				0,00
32	IPE 330		25	1980,00	1,40	60000,00	84,48
			25				0,00
			18	1980,00	19,70	36300,00	51,43
			18				0,00
33	IPE 330		18	1980,00	1,40	60000,00	84,48
			18				0,00
			26	1980,00	16,90	39600,00	56,03
			26				0,00
34	IPE 330		26	1950,00	21,50	29500,00	41,90
			26				0,00
			7	1950,00	2,04	38900,00	54,89
			7				0,00
35	IPE 330		5	6560,00	40,40	36800,00	53,07
			5				0,00
			21	6560,00	4,51	36400,00	52,15
			21				0,00
36	IPE 330		21	6560,00	0,14	60000,00	85,20
			21				0,00
			16	6560,00	18,20	36300,00	52,14
			16				0,00
37	IPE 330		16	6560,00	0,14	60000,00	85,20
			16				0,00
			22	6560,00	18,50	39600,00	56,78
			22				0,00

38	IPE 330		22	6520,00	13,90	29500,00	42,56
			22				0,00
			6	6520,00	2,06	38800,00	55,48
			6				0,00
39	IPE 330		6	4520,00	29,20	20500,00	29,77
			6				0,00
			23	4520,00	16,50	48400,00	68,77
			23				0,00
40	IPE 330		23	4510,00	1,41	73200,00	103,40
			23				0,00
			17	4510,00	1,33	51200,00	72,54
			17				0,00
41	IPE 330		17	4510,00	1,41	73200,00	103,40
			17				0,00
			24	4510,00	1,50	51000,00	72,26
			24				0,00
42	IPE 330		24	4520,00	19,70	20800,00	30,09
			24				0,00
			7	4520,00	10,80	48300,00	68,57
			7				0,00
43	IPE 270		19	1,76	3,36	2540,00	48,54
	Área	4590	19				0,00
	Wy	62,2	21	1,76	13,70	1020,00	112,81
	Wz	429	21				0,00
44	IPE 270		22	35,10	16,40	1870,00	6,19
			22				0,00
			23	35,10	15,20	3060,00	2,63
			23				0,00
45	IPE 270		20	11,50	9,19	2500,00	4,51
			20				0,00
			25	11,50	15,20	1000,00	7,38
			25				0,00
46	IPE 270		26	21,80	9,34	3020	5,98
			26				0,00
			24	21,80	14,90	-1850	2,58
			24				0,00

4- CASO CARGA 5 CARGA SISMO							
VIGA	**PERFIL**		**NUDO**	**FZA X**	**MTO Y**	**MTO Z**	
1	L 80/80/8		5	137,00	0,40	2,05	0,31
	Área	1230	5				0,00
	Wy/Wz	12,6	9	137,00	0,88	20,80	1,83
			9				0,00
2	L 80/80/8		8	218,00	0,34	2,06	0,37
			8				0,00
			9	218,00	0,91	20,80	1,90
			9				0,00
3	L 80/80/8		9	46,00	0,43	70,00	5,63
			9				0,00
			1	46,00	0,95	50,60	4,13
			1				0,00
4	L 80/80/8		9	133,00	0,48	70,00	5,70
			9				0,00
			2	133,00	1,00	50,30	4,18
			2				0,00
5	L 80/80/8		6	2050,00	0,37	2,07	1,86
			6				0,00
			10	2050,00	0,20	20,90	3,34
			10				0,00
6	L 80/80/8		10	2230,00	1,10	70,10	7,46
			10				0,00
			3	2230,00	1,62	50,70	5,97
			3				0,00
7	L 80/80/8		7	2130,00	1,11	2,06	1,98
			7				0,00
			10	2130,00	1,60	20,90	3,52
			10				0,00
8	L 80/80/8		10	2150,00	0,19	70,00	7,32
			10				0,00
			4	2150,00	0,33	50,60	5,79
			4				0,00
9	IPE 270		11	105,00	5,88	5940,00	13,96
	Área	4590	11				0,00
	Wy	62,2	12	105,00	5,77	5940,00	13,96
	Wz	429	12				0,00
10	IPE 270		12	33,20	30,40	118,00	0,77
			12				0,00
			10	33,20	26,30	63,90	0,58
			10				0,00
11	IPE 270		10	32,50	30,40	118,00	0,77
			10				0,00
			14	32,50	26,70	67,70	0,59
			14				0,00
12	IPE 270		13	619,00	5,78	5940,00	14,07
			13				0,00
			14	619,00	5,87	5940,00	14,08
			14				0,00

13	IPE 270		11	31,40	30,40	106,00	0,74
			11				0,00
			9	31,40	26,70	62,50	0,58
			9				0,00
14	IPE 270		9	34,30	30,40	106,00	0,74
			9				0,00
			13	34,30	26,30	58,60	0,57
			13				0,00
15	L 70/70/7		5	8980,00	0,37	4,60	10,14
	Área	940	5				0,00
	Wy/Wz	8,41	12	8980,00	0,71	14,20	11,33
			12				0,00
16	L 70/70/7		13	7870,00	0,38	4,12	8,91
			13				0,00
			7	7870,00	0,70	13,70	10,09
			7				0,00
17	HEB-240		5	2260,00	13,10	439,00	0,72
	Área	10600	5				0,00
	Wy	327	11	2260,00	29,10	3820,00	4,37
	Wz	938	11				0,00
18	HEB-240		11	1160,00	38,50	13200,00	14,30
			11				0,00
			1	1160,00	81,90	9750,00	10,75
			1				0,00
19	HEB-240		6	8900,00	29,50	440,00	1,40
			6				0,00
			12	8900,00	78,60	3820,00	5,15
			12				0,00
20	HEB-240		7	25300,00	13,60	441,00	2,90
			7				0,00
			14	25300,00	27,90	3820,00	6,54
			14				0,00
21	HEB-240		8	14100,00	29,90	438,00	1,89
			8				0,00
			13	14100,00	77,40	3810,00	5,63
			13				0,00
22	HEB-240		12	18500,00	10,00	13200,00	15,85
			12				0,00
			4	18500,00	25,00	9750,00	12,22
			4				0,00
23	HEB-240		13	5320,00	12,00	13200,00	14,61
			13				0,00
			2	5320,00	29,00	9740,00	10,97
			2				0,00
24	HEB-240		14	35500,00	40,50	13200,00	17,55
			14				0,00
			3	35500,00	85,90	9750,00	14,01
			3				0,00
25	L70/70/7		8	9770,00	0,10	4,93	10,99
	Área	940	8				0,00
	Wy/Wz	8,41	14	9770,00	0,06	14,50	12,12
			14				0,00

VIGA	PERFIL		NUDO	FZA X	MTO Y	MTO Z	
26	L70/70/7		11	8660,00	0,11	4,46	9,76
	Área	940	11				0,00
	Wy/Wz	8,41	6	8660,00	0,05	14,10	10,90
			6				0,00
27	IPE 330		5	64,20	3,50	23,50	0,08
	Área	6260	5				0,00
	Wy	98,5	19	64,20	1,14	3,40	0,03
	Wz	713	19				0,00
28	IPE 330		19	66,20	0,17	16,40	0,04
			19				0,00
			15	66,20	0,18	7,26	0,02
			15				0,00
29	IPE 330		15	66,20	0,17	16,40	0,04
			15				0,00
			20	66,20	0,16	25,50	0,05
			20				0,00
30	IPE 330		20	63,40	4,58	17,10	0,08
			20				0,00
			8	63,40	1,78	16,50	0,05
			8				0,00
31	IPE 330		8	619,00	0,93	408,00	0,68
			8				0,00
			25	619,00	1,31	135,00	0,30
			25				0,00
32	IPE 330		25	624,00	0,66	0,71	0,11
			25				0,00
			18	624,00	2,73	184,00	0,39
			18				0,00
33	IPE 330		18	624,00	0,66	0,71	0,11
			18				0,00
			26	624,00	1,42	185,00	0,37
			26				0,00
34	IPE 330		26	624,00	5,22	411,00	0,73
			26				0,00
			7	624,00	0,57	137,00	0,30
			7				0,00
35	IPE 330		5	101,00	1,79	410,00	0,61
			5				0,00
			21	101,00	1,31	135,00	0,22
			21				0,00
36	IPE 330		21	105,00	0,48	0,78	0,02
			21				0,00
			16	105,00	2,56	184,00	0,30
			16				0,00
37	IPE 330		16	105,00	0,48	0,78	0,02
			16				0,00
			22	105,00	1,59	185,00	0,29
			22				0,00

38	IPE 330		22	106,00	4,36	409,00	0,63
			22				0,00
			6	106,00	0,57	136,00	0,21
			6				0,00
39	IPE 330		6	832,00	1,19	16,00	0,17
			6				0,00
			23	832,00	0,12	15,50	0,16
			23				0,00
40	IPE 330		23	834,00	1,00	15,20	0,16
			23				0,00
			17	834,00	1,01	24,30	0,18
			17				0,00
41	IPE 330		17	834,00	1,00	15,20	0,16
			17				0,00
			24	834,00	0,99	6,11	0,15
			24				0,00
42	IPE 330		24	832,00	0,11	24,60	0,17
			24				0,00
			7	832,00	0,52	2,47	0,14
			7				0,00
43	IPE 270		19	4,19	0,96	26,90	0,07
	Área	4590	19				0,00
	Wy	62,2	21	4,19	1,24	46,80	0,03
	Wz	429	21				0,00
44	IPE 270		22	0,42	2,16	49,50	0,10
			22				0,00
			23	0,42	1,13	32,00	0,13
			23				0,00
45	IPE 270		20	5,69	1,62	32,10	0,14
			20				0,00
			25	5,69	1,42	49,30	0,10
			25				0,00
46	IPE 270		26	1,92	0,47	26,8	0,08
			26				0,00
			24	1,92	1,99	-46,9	0,15
			24				0,00

COMBINACIONES Y ESTADOS DE CARGA

1- COMB PROPIO PRINCIPAL							
VIGA	**PERFIL**		**NUDO**	**FZA X**	**MTO Y**	**MTO Z**	
1	L 80/80/8		5	17700,00	346,00	280,00	64,07
	Área	1230	5				0,00
	Wy/Wz	12,6	9	17700,00	176,00	86,90	35,26
			9				0,00
2	L 80/80/8		8	17700,00	346,00	280,00	64,07
			8				0,00
			9	17700,00	176,00	86,90	35,26
			9				0,00
3	L 80/80/8		9	13200,00	3,87	26,40	13,13
			9				0,00
			1	13200,00	3,87	59,60	15,77
			1				0,00
4	L 80/80/8		9	13200,00	3,87	26,40	13,13
			9				0,00
			2	13200,00	3,87	59,60	15,77
			2				0,00
5	L 80/80/8		6	17700,00	346,00	280,00	64,07
			6				0,00
			10	17700,00	176,00	86,90	35,26
			10				0,00
6	L 80/80/8		10	13200,00	3,87	26,40	13,13
			10				0,00
			3	13200,00	3,87	59,60	15,77
			3				0,00
7	L 80/80/8		7	17700,00	346,00	280,00	64,07
			7				0,00
			10	17700,00	176,00	86,90	35,26
			10				0,00
8	L 80/80/8		10	13200,00	3,87	26,40	13,13
			10				0,00
			4	13200,00	3,87	59,60	15,77
			4				0,00
9	IPE 270		11	16200,00	1,40	1720,00	7,56
	Área	4590	11				0,00
	Wy	62,2	12	16200,00	1,40	1720,00	7,56
	Wz	429	12				0,00
10	IPE 270		12	6370,00	58,70	1330,00	5,43
			12				0,00
			10	6370,00	55,90	3040,00	9,37
			10				0,00
11	IPE 270		10	6370,00	58,70	1330,00	5,43
			10				0,00
			14	6370,00	55,90	3040,00	9,37
			14				0,00
12	IPE 270		13	16200,00	1,40	1720,00	7,56
			13				0,00
			14	16200,00	1,40	1720,00	7,56
			14				0,00

13	IPE 270		11	6370,00	58,70	1330,00	5,43
			11				0,00
			9	6370,00	55,90	3040,00	9,37
			9				0,00
14	IPE 270		9	6370,00	58,70	1330,00	5,43
			9				0,00
			13	6370,00	55,90	3040,00	9,37
			13				0,00
15	L 70/70/7		5	7210,00	118,00	190,00	44,29
	Área	940	5				0,00
	Wy/Wz	8,41	12	7210,00	49,60	123,00	28,19
			12				0,00
16	L 70/70/7		13	7210,00	118,00	190,00	44,29
			13				0,00
			7	7210,00	49,60	123,00	28,19
			7				0,00
17	HEB-240		5	153000,00	19100,00	18000,00	92,03
	Área	10600	5				0,00
	Wy	327	11	153000,00	8010,00	5870,00	45,19
	Wz	938	11				0,00
18	HEB-240		11	163000,00	998,00	1970,00	20,53
			11				0,00
			1	-163000,00	2030,00	4030,00	24,94
			1				0,00
19	HEB-240		6	153000,00	19100,00	18000,00	92,03
			6				0,00
			12	153000,00	8010,00	5870,00	45,19
			12				0,00
20	HEB-240		7	153000,00	19100,00	18000,00	92,03
			7				0,00
			14	153000,00	8010,00	5870,00	45,19
			14				0,00
21	HEB-240		8	153000,00	19100,00	18000,00	92,03
			8				0,00
			13	153000,00	8010,00	5870,00	46,13
			13				0,00
22	HEB-240		12	163000,00	998,00	1970,00	20,53
			12				0,00
			4	163000,00	2030,00	4030,00	25,88
			4				0,00
23	HEB-240		13	163000,00	998,00	1970,00	20,53
			13				0,00
			2	163000,00	2030,00	4030,00	25,88
			2				0,00
24	HEB-240		14	163000,00	998,00	1970,00	20,53
			14				0,00
			3	163000,00	2030,00	4030,00	11,18
			3				0,00
25	L70/70/7		8	7210,00	118,00	190,00	44,29
	Área	940	8				0,00
	Wy/Wz	8,41	14	7210,00	49,60	123,00	28,19
			14				0,00

VIGA	PERFIL		NUDO	FZA X	MTO Y	MTO Z	
26	L70/70/7		11	7210,00	118,00	190,00	44,29
	Área	940	11				0,00
	Wy/Wz	8,41	6	7210,00	49,60	123,00	28,19
			6				0,00
27	IPE 330		5	1170,00	3,86	12800,00	18,18
	Área	6260	5				0,00
	Wy	98,5	19	1170,00	8,38	59000,00	83,02
	Wz	713	19				0,00
28	IPE 330		19	1160,00	5,28	86300,00	121,28
			19				0,00
			15	1160,00	5,28	63400,00	89,16
			15				0,00
29	IPE 330		15	1160,00	5,28	86300,00	121,28
			15				0,00
			20	1160,00	5,28	63400,00	89,16
			20				0,00
30	IPE 330		20	1170,00	3,86	12800,00	18,18
			20				0,00
			8	1170,00	8,38	59000,00	83,02
			8				0,00
31	IPE 330		8	4420,00	9,80	21800,00	31,38
			8				0,00
			25	4420,00	1,28	51400,00	72,81
			25				0,00
32	IPE 330		25	4430,00	0,66	76900,00	108,57
			25				0,00
			18	4430,00	0,66	54000,00	76,45
			18				0,00
33	IPE 330		18	4430,00	0,66	76900,00	108,57
			18				0,00
			26	4430,00	0,66	54000,00	76,45
			26				0,00
34	IPE 330		26	4420,00	9,80	21800,00	31,38
			26				0,00
			7	4420,00	1,28	51400,00	72,81
			7				0,00
35	IPE 330		5	4420,00	9,80	21800,00	31,38
			5				0,00
			21	4420,00	1,28	51400,00	72,81
			21				0,00
36	IPE 330		21	4430,00	0,66	76900,00	108,57
			21				0,00
			16	4430,00	0,66	54000,00	76,45
			16				0,00
37	IPE 330		16	4430,00	0,66	76900,00	108,57
			16				0,00
			22	4430,00	0,66	54000,00	76,45
			22				0,00

38	IPE 330		22	4420,00	9,80	21800,00	31,38
			22				0,00
			6	4420,00	1,28	51400,00	72,81
			6				0,00
39	IPE 330		6	1170,00	3,86	12800,00	18,18
			6				0,00
			23	1170,00	8,38	59000,00	83,02
			23				0,00
40	IPE 330		23	1160,00	5,28	86300,00	121,28
			23				0,00
			17	1160,00	5,28	63400,00	89,16
			17				0,00
41	IPE 330		17	1160,00	5,28	86300,00	121,28
			17				0,00
			24	1160,00	5,28	63400,00	89,16
			24				0,00
42	IPE 330		24	1170,00	3,86	12800,00	18,18
			24				0,00
			7	1170,00	8,38	59000,00	83,02
			7				0,00
43	IPE 270		19	12,20	3,10	5450,00	29,89
	Área	4590	19				0,00
	Wy	62,2	21	12,20	0,63	4480,00	137,54
	Wz	429	21				0,00
44	IPE 270		22	12,20	0,63	4480,00	12,72
			22				0,00
			23	12,20	3,10	5450,00	10,50
			23				0,00
45	IPE 270		20	12,20	3,10	5450,00	10,50
			20				0,00
			25	12,20	0,63	4480,00	12,72
			25				0,00
46	IPE 270		26	12,20	3,10	5450	12,76
			26				0,00
			24	12,20	0,63	4480	10,46
			24				0,00

2- CASO CARGA 3 CARGA SILO (= CASO 4 CARGA VIENTO)							
VIGA	**PERFIL**		**NUDO**	**FZA X**	**MTO Y**	**MTO Z**	
1	L 80/80/8		5	11100,00	429,00	446,00	78,47
	Área	1230	5				0,00
	Wy/Wz	12,6	9	11100,00	206,00	643,00	76,41
			9				0,00
2	L 80/80/8		8	11500,00	442,00	446,00	79,83
			8				0,00
			9	11500,00	233,00	643,00	78,87
			9				0,00
3	L 80/80/8		9	8120,00	4,62	1720,00	143,48
			9				0,00
			1	8120,00	12,10	1370,00	116,29
			1				0,00
4	L 80/80/8		9	8600,00	9,53	1720,00	144,26
			9				0,00
			2	8600,00	17,00	1370,00	117,07
			2				0,00
5	L 80/80/8		6	37800,00	440,00	114,00	74,70
			6				0,00
			10	37800,00	216,00	469,00	85,10
			10				0,00
6	L 80/80/8		10	36700,00	17,80	1670,00	163,79
			10				0,00
			3	36700,00	25,20	1250,00	131,04
			3				0,00
7	L 80/80/8		7	38300,00	452,00	114,00	76,06
			7				0,00
			10	38300,00	242,00	470,00	87,65
			10				0,00
8	L 80/80/8		10	36200,00	3,63	1670,00	162,26
			10				0,00
			4	36200,00	3,82	1250,00	128,94
			4				0,00
9	IPE 220		11	9920,00	187,00	53500,00	220,29
	Área	3340	11				0,00
	Wy	37,3	12	9920,00	180,00	56900,00	233,59
	Wz	252	12				0,00
10	IPE 220		12	2580,00	707,00	518,00	21,78
			12				0,00
			10	2580,00	588,00	2640,00	27,01
			10				0,00
11	IPE 220		10	2930,00	707,00	516,00	21,88
			10				0,00
			14	2930,00	592,00	2610,00	27,11
			14				0,00
12	IPE 220		13	17100,00	186,00	53500,00	222,41
			13				0,00
			14	17100,00	182,00	56900,00	235,79
			14				0,00

13	IPE 220		11	2740,00	892,00	2150,00	33,27
			11				0,00
			9	2740,00	765,00	3460,00	35,06
			9				0,00
14	IPE 220		9	3100,00	892,00	2140,00	33,33
			9				0,00
			13	3100,00	762,00	3440,00	35,01
			13				0,00
15	L 70/70/7		5	86300,00	142,00	316,00	146,27
	Área	940	5				0,00
	Wy/Wz	8,41	12	86300,00	47,40	438,00	149,53
			12				0,00
16	L 70/70/7		13	64400,00	162,00	64,90	95,49
			13				0,00
			7	64400,00	86,10	192,00	101,58
			7				0,00
17	HEB-180		5	29700,00	8450,00	29700,00	130,23
	Área	6530	5				0,00
	Wy	151	11	29700,00	3600,00	40300,00	122,99
	Wz	426	11				0,00
18	HEB-180		11	51500,00	129,00	114000,00	276,35
			11				0,00
			1	51500	254,00	93300,00	238,46
			1				0,00
19	HEB-180		6	116000,00	8340,00	6310,00	87,81
			6				0,00
			12	116000,00	3290,00	28500,00	128,20
			12				0,00
20	HEB-180		7	258000,00	8600,00	6290,00	111,23
			7				0,00
			14	258000,00	3850,00	28500,00	118,58
			14				0,00
21	HEB-180		8	171000,00	8710,00	29700,00	153,59
			8				0,00
			13	171000,00	4150,00	40200,00	154,01
			13				0,00
22	HEB-180		12	210000,00	299,00	110000,00	292,36
			12				0,00
			4	210000,00	595,00	85200,00	219,01
			4				0,00
23	HEB-180		13	98400,00	411,00	114000,00	285,40
			13				0,00
			2	98400,00	839,00	93200,00	279,47
			2				0,00
24	HEB-180		14	360000,00	582,00	110000,00	317,20
			14				0,00
			3	360000,00	1180,00	85200,00	222,72
			3				0,00
25	L70/70/7		8	97300,00	146,00	320,00	158,92
	Área	940	8				0,00
	Wy/Wz	8,41	14	97300,00	57,20	443,00	139,69
			14				0,00

VIGA	PERFIL		NUDO	FZA X	MTO Y	MTO Z	
26	L70/70/7		11	75400,00	158,00	60,20	106,16
	Área	940	11				0,00
	Wy/Wz	8,41	6	75400,00	76,40	196,00	112,60
			6				0,00
27	IPE 330		5	1720,00	64,10	12400,00	18,32
	Área	6260	5				0,00
	Wy	98,5	19	1720,00	13,70	58900,00	83,02
	Wz	713	19				0,00
28	IPE 330		19	1750,00	3,17	86000,00	120,93
			19				0,00
			15	1750,00	3,23	63100,00	88,81
			15				0,00
29	IPE 330		15	1750,00	3,17	86000,00	120,93
			15				0,00
			20	1750,00	3,10	63000,00	88,67
			20				0,00
30	IPE 330		20	1710,00	78,60	12700,00	18,88
			20				0,00
			8	1710,00	22,80	58800,00	82,97
			8				0,00
31	IPE 330		8	5560,00	32,90	32800,00	47,22
			8				0,00
			25	5560,00	24,30	47700,00	68,04
			25				0,00
32	IPE 330		25	5650,00	9,78	76900,00	108,86
			25				0,00
			18	5650,00	50,70	49100,00	70,28
			18				0,00
33	IPE 330		18	5650,00	9,78	76900,00	108,86
			18				0,00
			26	5650,00	31,20	59000,00	83,97
			26				0,00
34	IPE 330		26	5670,00	79,20	10800,00	16,86
			26				0,00
			7	5670,00	3,92	55000,00	78,08
			7				0,00
35	IPE 330		5	1630,00	45,40	32800,00	46,72
			5				0,00
			21	1630,00	24,10	47700,00	67,41
			21				0,00
36	IPE 330		21	1560,00	7,40	76900,00	108,18
			21				0,00
			16	1560,00	48,40	49100,00	69,60
			16				0,00
37	IPE 330		16	1560,00	7,40	76900,00	108,18
			16				0,00
			22	1560,00	33,50	59000,00	83,34
			22				0,00

38	IPE 330		22	1520,00	66,70	10800,00	16,07
			22				0,00
			6	1520,00	3,76	55000,00	77,42
			6				0,00
39	IPE 330		6	12300,00	36,30	12900,00	20,43
			6				0,00
			23	12300,00	11,30	59200,00	85,11
			23				0,00
40	IPE 330		23	12300,00	11,80	86600,00	123,54
			23				0,00
			17	12300,00	11,70	63700,00	91,42
			17				0,00
41	IPE 330		17	12300,00	11,80	86600,00	123,54
			17				0,00
			24	12300,00	11,80	63600,00	91,29
			24				0,00
42	IPE 330		24	12300,00	21,70	13100,00	20,56
			24				0,00
			7	12300,00	2,25	59100,00	84,88
			7				0,00
43	IPE 270		19	67,30	17,00	4700,00	30,82
	Área	4590	19				0,00
	Wy	62,2	21	67,30	24,20	3170,00	138,17
	Wz	429	21				0,00
44	IPE 270		22	20,60	37,30	5810,00	11,56
			22				0,00
			23	20,60	23,00	6230,00	7,76
			23				0,00
45	IPE 270		20	88,80	25,90	4660,00	13,98
			20				0,00
			25	88,80	26,40	3150,00	14,97
			25				0,00
46	IPE 270		26	0,82	14,10	6190	11,09
			26				0,00
			24	0,82	35,10	5800	7,91
			24				0,00

3- COMB DEF PROPIO VIENTO							
VIGA	**PERFIL**		**NUDO**	**FZA X**	**MTO Y**	**MTO Z**	
1	L 80/80/8		5	8180,00	5,90	24,50	9,06
	Área	1230	5				0,00
	Wy/Wz	12,6	9	8180,00	4,59	186,00	21,78
			9				0,00
2	L 80/80/8		8	7460,00	12,40	24,60	9,00
			8				0,00
			9	7460,00	11,30	186,00	21,72
			9				0,00
3	L 80/80/8		9	9190,00	6,57	619,00	57,12
			9				0,00
			1	9190,00	11,20	449,00	44,00
			1				0,00
4	L 80/80/8		9	8420,00	1,40	619,00	56,08
			9				0,00
			2	8420,00	6,00	449,00	42,96
			2				0,00
5	L 80/80/8		6	8740,00	12,70	11,80	9,05
			6				0,00
			10	8740,00	1,48	182,00	21,67
			10				0,00
6	L 80/80/8		10	10100,00	6,86	618,00	57,80
			10				0,00
			3	10100,00	11,50	446,00	44,52
			3				0,00
7	L 80/80/8		7	9460,00	19,20	11,80	10,15
			7				0,00
			10	9460,00	17,30	182,00	23,51
			10				0,00
8	L 80/80/8		10	9380,00	1,12	618,00	56,76
			10				0,00
			4	9380,00	5,72	446,00	43,48
			4				0,00
9	IPE 270		11	1680,00	51,90	5240,00	13,41
	Área	4590	11				0,00
	Wy	62,2	12	1680,00	50,90	5260,00	13,45
	Wz	429	12				0,00
10	IPE 270		12	66,80	266,00	897,00	6,38
			12				0,00
			10	66,80	230,00	323,00	4,47
			10				0,00
11	IPE 270		10	513,00	266,00	898,00	6,48
			10				0,00
			14	513,00	234,00	357,00	4,71
			14				0,00
12	IPE 270		13	2860,00	51,00	5240,00	13,66
			13				0,00
			14	2860,00	51,80	5260,00	13,72
			14				0,00

13	IPE 270		11	51,00	271,00	1080,00	6,89
			11				0,00
			9	51,00	238,00	792,00	5,68
			9				0,00
14	IPE 270		9	529,00	270,00	1080,00	6,97
			9				0,00
			13	529,00	234,00	758,00	5,64
			13				0,00
15	L 70/70/7		5	7470,00	0,97	42,80	13,15
	Área	940	5				0,00
	Wy/Wz	8,41	12	7470,00	4,46	126,00	23,46
			12				0,00
16	L 70/70/7		13	7410,00	7,59	34,10	12,84
			13				0,00
			7	7410,00	8,05	120,00	23,11
			7				0,00
17	HEB-240		5	116000,00	575,00	5080,00	18,12
	Área	10600	5				0,00
	Wy	327	11	116000,00	38,20	34100,00	47,41
	Wz	938	11				0,00
18	HEB-240		11	202000,00	312,00	117000,00	144,74
			11				0,00
			1	202000	668,00	86400,00	95,80
			1				0,00
19	HEB-240		6	17400,00	430,00	2690,00	5,82
			6				0,00
			12	17400,00	399,00	33300,00	48,70
			12				0,00
20	HEB-240		7	127000,00	811,00	2700,00	17,34
			7				0,00
			14	127000,00	542,00	33300,00	39,85
			14				0,00
21	HEB-240		8	28500,00	955,00	5060,00	11,00
			8				0,00
			13	28500,00	979,00	34100,00	45,40
			13				0,00
22	HEB-240		12	64200,00	61,30	117000,00	130,98
			12				0,00
			4	64200,00	165,00	85800,00	96,92
			4				0,00
23	HEB-240		13	52400,00	134,00	117000,00	130,09
			13				0,00
			2	52400,00	312,00	86400,00	113,25
			2				0,00
24	HEB-240		14	214000,00	385,00	117000,00	146,10
			14				0,00
			3	214000,00	814,00	85800,00	101,67
			3				0,00
25	L70/70/7		8	81700,00	3,36	45,80	92,76
	Área	940	8				0,00
	Wy/Wz	8,41	14	81700,00	1,32	129,00	101,77
			14				0,00

VIGA	PERFIL		NUDO	FZA X	MTO Y	MTO Z	
26	L70/70/7		11	81100,00	5,20	37,10	91,31
	Área	940	11				0,00
	Wy/Wz	8,41	6	81100,00	2,27	123,00	101,17
			6				0,00
27	IPE 330		5	3350,00	15,80	562,00	1,48
	Área	6260	5				0,00
	Wy	98,5	19	3350,00	2,46	1790,00	3,07
	Wz	713	19				0,00
28	IPE 330		19	3350,00	3,87	2610,00	4,24
			19				0,00
			15	3350,00	3,78	1850,00	3,17
			15				0,00
29	IPE 330		15	3350,00	3,87	2610,00	4,24
			15				0,00
			20	3350,00	3,96	1690,00	2,95
			20				0,00
30	IPE 330		20	3350,00	25,30	920,00	2,08
			20				0,00
			8	3350,00	8,11	1670,00	2,96
			8				0,00
31	IPE 330		8	2100,00	23,70	4850,00	7,38
			8				0,00
			25	2100,00	3,34	214,00	0,67
			25				0,00
32	IPE 330		25	2130,00	0,80	2260,00	3,52
			25				0,00
			18	2130,00	19,10	205,00	0,82
			18				0,00
33	IPE 330		18	2130,00	0,80	2260,00	3,52
			18				0,00
			26	2130,00	17,50	3050,00	4,80
			26				0,00
34	IPE 330		26	2150,00	30,60	2380,00	3,99
			26				0,00
			7	2150,00	3,23	2610,00	4,04
			7				0,00
35	IPE 330		5	2470,00	31,30	4870,00	7,54
			5				0,00
			21	2470,00	3,32	212,00	0,73
			21				0,00
36	IPE 330		21	2450,00	0,75	2260,00	3,57
			21				0,00
			16	2450,00	17,60	204,00	0,86
			16				0,00
37	IPE 330		16	2450,00	0,75	2260,00	3,57
			16				0,00
			22	2450,00	19,10	3050,00	4,86
			22				0,00

38	IPE 330		22	2420,00	23,00	2360,00	3,93
			22				0,00
			6	2420,00	3,25	2610,00	4,08
			6				0,00
39	IPE 330		6	3440,00	25,60	628,00	1,69
			6				0,00
			23	3440,00	8,71	1950,00	3,37
			23				0,00
40	IPE 330		23	3430,00	3,49	2890,00	4,64
			23				0,00
			17	3430,00	3,57	2130,00	3,57
			17				0,00
41	IPE 330		17	3430,00	3,49	2890,00	4,64
			17				0,00
			24	3430,00	3,40	1970,00	3,35
			24				0,00
42	IPE 330		24	3430,00	16,10	987,00	2,10
			24				0,00
			7	3430,00	3,06	1840,00	3,16
			7				0,00
43	IPE 270		19	9,59	6,24	133,00	2,40
	Área	4590	19				0,00
	Wy	62,2	21	9,59	14,30	360,00	4,52
	Wz	429	21				0,00
44	IPE 270		22	23,70	15,80	490,00	0,57
			22				0,00
			23	23,70	12,30	387,00	1,04
			23				0,00
45	IPE 270		20	22,90	12,10	179,00	1,34
			20				0,00
			25	22,90	15,80	383,00	1,16
			25				0,00
46	IPE 270		26	10,50	6,46	341	0,52
			26				0,00
			24	10,50	14,30	-468	1,12
			24				0,00

4- CASO COMB DEF PPAL SISMO							
VIGA	**PERFIL**		**NUDO**	**FZA X**	**MTO Y**	**MTO Z**	
1	L 80/80/8		5	17100,00	334,00	171,00	53,98
	Área	1230	5				0,00
	Wy/Wz	12,6	9	17100,00	169,00	72,70	33,08
			9				0,00
2	L 80/80/8		8	17200,00	334,00	171,00	54,06
			8				0,00
			9	17200,00	170,00	72,70	33,25
			9				0,00
3	L 80/80/8		9	12800,00	3,31	88,20	17,67
			9				0,00
			1	12800,00	2,79	89,80	17,75
			1				0,00
4	L 80/80/8		9	12800,00	4,21	88,20	17,74
			9				0,00
			2	12800,00	4,73	89,80	17,91
			2				0,00
5	L 80/80/8		6	19100,00	334,00	167,00	55,29
			6				0,00
			10	19100,00	169,00	31,00	31,40
			10				0,00
6	L 80/80/8		10	14900,00	4,83	51,80	16,61
			10				0,00
			3	14900,00	5,35	11,50	13,45
			3				0,00
7	L 80/80/8		7	19100,00	335,00	167,00	55,37
			7				0,00
			10	19100,00	171,00	30,90	31,55
			10				0,00
8	L 80/80/8		10	14900,00	3,93	51,80	16,54
			10				0,00
			4	14900,00	3,40	11,50	13,30
			4				0,00
9	IPE 270		11	15800,00	7,23	3640,00	12,04
	Área	4590	11				0,00
	Wy	62,2	12	15800,00	4,42	8240,00	22,72
	Wz	429	12				0,00
10	IPE 270		12	6110,00	26,20	2280,00	7,07
			12				0,00
			10	6110,00	27,50	5720,00	15,11
			10				0,00
11	IPE 270		10	6180,00	26,10	2280,00	7,08
			10				0,00
			14	6180,00	27,10	5720,00	15,12
			14				0,00
12	IPE 270		13	16300,00	7,12	3640,00	12,15
			13				0,00
			14	16300,00	4,53	8250,00	22,85
			14				0,00

13	IPE 270		11	6110,00	86,90	2500,00	8,56
			11				0,00
			9	6110,00	80,50	5850,00	16,26
			9				0,00
14	IPE 270		9	6180,00	86,90	2500,00	8,57
			9				0,00
			13	6180,00	80,10	5850,00	16,27
			13				0,00
15	L 70/70/7		5	15900,00	113,00	120,00	44,62
	Área	940	5				0,00
	Wy/Wz	8,41	12	15900,00	47,00	90,00	33,21
			12				0,00
16	L 70/70/7		13	923,00	114,00	112,00	27,85
			13				0,00
			7	923,00	48,50	62,10	14,13
			7				0,00
17	HEB-240		5	145000,00	18400,00	32100,00	104,17
	Área	10600	5				0,00
	Wy	327	11	145000,00	7690,00	13700,00	51,80
	Wz	938	11				0,00
18	HEB-240		11	145000,00	923,00	16900,00	34,52
			11				0,00
			1	-145000	1870,00	17300,00	38,88
			1				0,00
19	HEB-240		6	156000,00	18400,00	31200,00	104,25
			6				0,00
			12	156000,00	7640,00	6070,00	46,16
			12				0,00
20	HEB-240		7	173000,00	18400,00	31200,00	105,85
			7				0,00
			14	173000,00	7740,00	6070,00	45,42
			14				0,00
21	HEB-240		8	162000,00	18500,00	32100,00	106,08
			8				0,00
			13	162000,00	7790,00	13700,00	54,94
			13				0,00
22	HEB-240		12	175000,00	952,00	9580,00	29,63
			12				0,00
			4	175000,00	1930,00	2230,00	23,56
			4				0,00
23	HEB-240		13	162000,00	974,00	16900,00	36,28
			13				0,00
			2	162000,00	1980,00	17300,00	42,61
			2				0,00
24	HEB-240		14	192000,00	1000,00	9580,00	31,38
			14				0,00
			3	192000,00	2040,00	2240,00	10,20
			3				0,00
25	L70/70/7		8	16700,00	114,00	121,00	45,71
	Área	940	8				0,00
	Wy/Wz	8,41	14	16700,00	47,70	90,40	18,25
			14				0,00

VIGA	PERFIL		NUDO	FZA X	MTO Y	MTO Z	
26	L70/70/7		11	1720,00	114,00	111,00	28,58
	Área	940	11				0,00
	Wy/Wz	8,41	6	1720,00	47,80	61,80	14,86
			6				0,00
27	IPE 330		5	1190,00	0,22	20600,00	29,08
	Área	6260	5				0,00
	Wy	98,5	19	1190,00	6,94	48300,00	68,00
	Wz	713	19				0,00
28	IPE 330		19	1190,00	4,92	73000,00	102,62
			19				0,00
			15	1190,00	4,91	51000,00	71,77
			15				0,00
29	IPE 330		15	1190,00	4,92	73000,00	102,62
			15				0,00
			20	1190,00	4,93	51000,00	71,77
			20				0,00
30	IPE 330		20	1190,00	0,86	20600,00	29,09
			20				0,00
			8	1190,00	6,30	48300,00	68,00
			8				0,00
31	IPE 330		8	3640,00	10,40	33500,00	47,67
			8				0,00
			25	3640,00	2,55	37500,00	53,20
			25				0,00
32	IPE 330		25	3640,00	1,29	60000,00	84,75
			25				0,00
			18	3640,00	3,36	37800,00	53,63
			18				0,00
33	IPE 330		18	3640,00	1,29	60000,00	84,75
			18				0,00
			26	3640,00	0,79	38100,00	54,03
			26				0,00
34	IPE 330		26	3630,00	4,23	32700,00	46,49
			26				0,00
			7	3630,00	1,81	37800,00	53,61
			7				0,00
35	IPE 330		5	4150,00	11,20	33600,00	47,90
			5				0,00
			21	4150,00	2,55	37500,00	53,28
			21				0,00
36	IPE 330		21	4160,00	1,11	60000,00	84,83
			21				0,00
			16	4160,00	3,19	37800,00	53,71
			16				0,00
37	IPE 330		16	4160,00	1,11	60000,00	84,83
			16				0,00
			22	4160,00	0,96	38100,00	54,11

			22				0,00
38	IPE 330		22	4150,00	5,08	32700,00	46,58
			22				0,00
			6	4150,00	1,80	37800,00	53,70
			6				0,00
39	IPE 330		6	1960,00	4,91	20600,00	29,25
			6				0,00
			23	1960,00	8,20	48300,00	68,14
			23				0,00
40	IPE 330		23	1950,00	4,09	73100,00	102,88
			23				0,00
			17	1950,00	4,08	51000,00	71,88
			17				0,00
41	IPE 330		17	1950,00	4,09	73100,00	102,88
			17				0,00
			24	1950,00	4,10	51000,00	71,88
			24				0,00
42	IPE 330		24	1960,00	3,83	20600,00	29,24
			24				0,00
			7	1960,00	7,56	48300,00	68,13
			7				0,00
43	IPE 270		19	7,60	2,02	2750,00	48,05
	Área	4590	19				0,00
	Wy	62,2	21	7,60	0,64	1390,00	112,60
	Wz	429	21				0,00
44	IPE 270		22	11,40	2,77	1490,00	6,46
			22				0,00
			23	11,40	4,12	2810,00	3,31
			23				0,00
45	IPE 270		20	6,10	1,36	2750,00	3,50
			20				0,00
			25	6,10	0,81	1390,00	6,56
			25				0,00
46	IPE 270		26	9,87	3,46	2810	6,47
			26				0,00
			24	9,87	2,59	-1480	3,28
			24				0,00

5- CASO COMB DEF PPAL SISMO							
VIGA	**PERFIL**		**NUDO**	**FZA X**	**MTO Y**	**MTO Z**	
1	L 80/80/8		5	16400,00	332,00	176,00	53,65
	Área	1230	5				0,00
	Wy/Wz	12,6	9	16400,00	166,00	118,00	35,87
			9				0,00
2	L 80/80/8		8	16400,00	334,00	176,00	53,81
			8				0,00
			9	16400,00	172,00	119,00	36,43
			9				0,00
3	L 80/80/8		9	11500,00	1,88	242,00	28,71
			9				0,00
			1	11500,00	0,20	201,00	25,32
			1				0,00
4	L 80/80/8		9	11700,00	4,96	242,00	29,11
			9				0,00
			2	11700,00	6,64	201,00	25,99
			2				0,00
5	L 80/80/8		6	22300,00	335,00	163,00	57,65
			6				0,00
			10	22300,00	168,00	14,80	32,64
			10				0,00
6	L 80/80/8		10	18500,00	6,75	206,00	31,93
			10				0,00
			3	18500,00	8,41	122,00	25,39
			3				0,00
7	L 80/80/8		7	22400,00	337,00	163,00	57,89
			7				0,00
			10	22400,00	174,00	15,00	33,21
			10				0,00
8	L 80/80/8		10	18200,00	4,03	206,00	31,47
			10				0,00
			4	18200,00	2,38	123,00	24,75
			4				0,00
9	IPE 270		11	15600,00	22,10	16700,00	42,68
	Área	4590	11				0,00
	Wy	62,2	12	15600,00	19,10	21300,00	53,36
	Wz	429	12				0,00
10	IPE 270		12	6040,00	40,90	2030,00	6,71
			12				0,00
			10	6040,00	35,20	5580,00	14,89
			10				0,00
11	IPE 270		10	6250,00	40,30	2030,00	6,74
			10				0,00
			14	6250,00	26,70	5580,00	14,80
			14				0,00
12	IPE 270		13	17200,00	17,90	16700,00	42,96
			13				0,00
			14	17200,00	15,50	21300,00	53,65
			14				0,00

13	IPE 270		11	6040,00	154,00	2740,00	10,18
			11				0,00
			9	6040,00	144,00	6000,00	17,62
			9				0,00
14	IPE 270		9	6250,00	153,00	2740,00	10,21
			9				0,00
			13	6250,00	133,00	5970,00	17,42
			13				0,00
15	L 70/70/7		5	35000,00	113,00	130,00	66,13
	Área	940	5				0,00
	Wy/Wz	8,41	12	35000,00	45,40	121,00	57,02
			12				0,00
16	L 70/70/7		13	18800,00	115,00	102,00	45,80
			13				0,00
			7	18800,00	49,90	31,70	29,70
			7				0,00
17	HEB-240		5	126000,00	18400,00	33000,00	103,34
	Área	10600	5				0,00
	Wy	327	11	126000,00	7630,00	22100,00	58,78
	Wz	938	11				0,00
18	HEB-240		11	105000,00	833,00	46000,00	61,49
			11				0,00
			1	105000,00	1680,00	38700,00	61,68
			1				0,00
19	HEB-240		6	162000,00	18300,00	30200,00	103,44
			6				0,00
			12	162000,00	7460,00	2330,00	45,58
			12				0,00
20	HEB-240		7	215000,00	18500,00	30200,00	109,05
			7				0,00
			14	215000,00	7810,00	2310,00	43,23
			14				0,00
21	HEB-240		8	179000,00	18500,00	33000,00	108,64
			8				0,00
			13	179000,00	7960,00	22100,00	66,96
			13				0,00
22	HEB-240		12	202000,00	933,00	38700,00	63,17
			12				0,00
			4	202000,00	1870,00	23700,00	46,08
			4				0,00
23	HEB-240		13	160000,00	1000,00	45900,00	67,09
			13				0,00
			2	160000,00	2050,00	38600,00	71,57
			2				0,00
24	HEB-240		14	256000,00	1090,00	38600,00	68,64
			14				0,00
			3	256000,00	2220,00	23600,00	35,49
			3				0,00
25	L70/70/7		8	37500,00	114,00	131,00	69,03
	Área	940	8				0,00
	Wy/Wz	8,41	14	37500,00	47,70	122,00	43,05

VIGA	PERFIL		NUDO	FZA X	MTO Y	MTO Z	
26	L70/70/7		11	21500,00	114,00	101,00	48,44
	Área	940	11				0,00
	Wy/Wz	8,41	6	21500,00	48,00	30,50	32,21
			6				0,00
27	IPE 330		5	756,00	10,90	20500,00	28,98
	Área	6260	5				0,00
	Wy	98,5	19	756,00	10,20	48300,00	67,97
	Wz	713	19				0,00
28	IPE 330		19	795,00	5,28	73000,00	102,56
			19				0,00
			15	795,00	14,20	51000,00	71,80
			15				0,00
29	IPE 330		15	795,00	5,28	73000,00	102,56
			15				0,00
			20	795,00	24,80	50900,00	71,77
			20				0,00
30	IPE 330		20	837,00	3,26	20600,00	29,06
			20				0,00
			8	837,00	19,10	48200,00	67,93
			8				0,00
31	IPE 330		8	2770,00	24,00	34400,00	48,93
			8				0,00
			25	2770,00	11,20	37200,00	52,73
			25				0,00
32	IPE 330		25	2800,00	1,99	60000,00	84,62
			25				0,00
			18	2800,00	9,19	37400,00	53,00
			18				0,00
33	IPE 330		18	2800,00	1,99	60000,00	84,62
			18				0,00
			26	2800,00	13,20	38500,00	54,58
			26				0,00
34	IPE 330		26	2830,00	14,40	31800,00	45,20
			26				0,00
			7	2830,00	17,40	38100,00	54,06
			7				0,00
35	IPE 330		5	4410,00	7,86	34500,00	49,17
			5				0,00
			21	4410,00	19,80	37200,00	53,08
			21				0,00
36	IPE 330		21	4370,00	1,47	60000,00	84,86
			21				0,00
			16	4370,00	25,90	37400,00	53,42
			16				0,00
37	IPE 330		16	4370,00	1,47	60000,00	84,86
			16				0,00
			22	4370,00	23,00	38500,00	54,93
			22				0,00

38	IPE 330		22	4310,00	6,95	31800,00	45,36
			22				0,00
			6	4310,00	13,60	38100,00	54,26
			6				0,00
39	IPE 330		6	3300,00	15,00	20500,00	29,43
			6				0,00
			23	3300,00	25,10	48300,00	68,52
			23				0,00
40	IPE 330		23	3250,00	2,61	73100,00	103,07
			23				0,00
			17	3250,00	22,00	51100,00	72,41
			17				0,00
41	IPE 330		17	3250,00	2,61	73100,00	103,07
			17				0,00
			24	3250,00	16,80	51000,00	72,22
			24				0,00
42	IPE 330		24	3210,00	0,88	20700,00	29,55
			24				0,00
			7	3210,00	8,05	48300,00	68,34
			7				0,00
43	IPE 270		19	56,00	4,04	2690,00	48,33
	Área	4590	19				0,00
	Wy	62,2	21	56,00	6,11	1290,00	112,70
	Wz	429	21				0,00
44	IPE 270		22	72,20	9,37	1600,00	6,44
			22				0,00
			23	72,20	3,05	2880,00	3,07
			23				0,00
45	IPE 270		20	55,60	5,65	2680,00	3,83
			20				0,00
			25	55,60	2,04	1280,00	6,76
			25				0,00
46	IPE 270		26	48,40	8,76	2870	6,40
			26				0,00
			24	48,40	4,26	-1590	3,06
			24				0,00