

## BASES PARA EL CALCULO DE RECIPIENTES

Especialmente para "Dyna".

Con el desarrollo industrial es de cada vez más frecuente ocurrencia la construcción de recipientes de hormigón, acero o madera, y conviene a los estudiantes fijar bien las ideas sobre las bases del cálculo, que ordinariamente apenas reciben ligera atención en los programas del curso.

Los tanques bajos o subterráneos son de uso corriente en acueductos, curtimbres, bombas de gasolina y multitud de industrias que requieren depósitos de líquidos. Los tanques elevados o silos (1) para agua de distribución, minerales, granos y forrajes se difunden quizás con mejor aceptación por la facilidad de usarlos como tolvas y aprovechar la extracción por gravedad.

El cálculo debe atender al empuje sobre las paredes verticales o inclinadas, al peso sobre el fondo del recipiente, a las cargas que se transmiten a los miembros de la estructura, a la resistencia del suelo y a la estabilidad del conjunto.

La determinación del empuje se hace valiéndose de las mismas fuentes que permiten el cálculo de muros de sostenimiento: para los líquidos, cuya fricción interna es casi nula, la presión lateral en un punto cualquiera de las paredes es igual, como se sabe, al peso de la columna de líquido hasta el nivel libre; para los sólidos de grande frotamiento interior el empuje puede casi anularse. Entre esos extremos están la mayoría de las sustancias que se almacenan y por consiguiente los empujes sobre las paredes de los depósitos varían considerablemente con la fricción interna y el peso específico del material. Las teorías que pretenden formular las cargas del empuje se fun-

---

(1) Etimológicamente parece más adecuado llamar *silos* a los depósitos subterráneos.

dan unas en la analogía de la presión hidrostática, teniendo en cuenta la influencia del rozamiento interior que hace inclinar la dirección del empuje; otras descomponen la masa del material en una parte activa que sería la que se deslizara por la sección de ruptura al suprimir el muro de sostenimiento y otra parte que conservara su estabilidad al cortarse en talud la primera y que sólo necesita entrar en los cálculos para el cómputo de la carga sobre el fondo. Las fórmulas obtenidas por estos dos caminos no difieren considerablemente y concuerdan con las reglas empíricas que las mediciones sobre modelos han permitido obtener. La discrepancia se acentúa cuando la relación entre el diámetro del depósito y su altura disminuye de cierto límite que guarda correspondencia con el plano de ruptura: es natural que si dicho plano no encuentra superficie libre la cuña que produce el empuje tiene que vencer la fricción con las paredes, con las cuales queda a la manera de tapón, y esta nueva fuerza reduce muy notablemente los efectos de la presión lateral hasta el punto de que es necesario en esos casos acudir a nuevas fórmulas que atiendan a esa influencia. De aquí que siempre se distinga entre silos anchos y silos estrechos, no en dimensiones absolutas, desde luego, sino relativamente a la altura. Para los silos anchos es aplicable directamente la teoría del empuje de los muros de sostenimiento.

Una manera aproximada y sencilla de interpretar el empuje, siguiendo las líneas de la analogía hidrostática, consiste en asimilar el material depositado, con un líquido de menor densidad, como si la fricción interna obrase contra el peso específico. Esto no es así, naturalmente, entre otras razones, por estar inclinada hacia abajo la dirección del empuje un cierto ángulo, pero en cálculos sencillos y para fines de control de otros cálculos más exactos y con mejor criterio científico no es inconveniente decir, por ejemplo, que la arena se porta como un semifluido de peso específico 0,5 en lo que se refiere a las paredes laterales. Bien entendido, esta analogía exige también que la superficie libre del material sea horizontal, porque las sobrecargas influyen en el empuje directamente con el valor del ángulo del talud: Las fórmulas que dan la presión lateral tienen en cuenta naturalmente la situación de la superficie libre. Más aún, el rozamiento en las paredes altera también la analogía hidrostática, que sólo contaba con la fricción interna como factor de reducción del peso específico.

Atendidas estas restricciones, la comparación con el líquido equivalente siempre ofrece ayuda para el entendimiento de los fenómenos del empuje hasta para su cómputo aproximado.

## D y n a

Otra manera de aplicar la anterior interpretación de similitud con los líquidos se da en las tablas que algunos autores suministran sobre las relaciones experimentales entre la presión horizontal y la presión vertical en el mismo punto:

Por ejemplo, Ketchum ofrece los resultados experimentales de la Fábrica de Cementos Portland de Colorado:

Material	Relación de la presión horizontal a la vertical
Clinker .....	0,30
Cemento .....	0,32 - 0,40
Triturado .....	0,28
Carbón grueso .....	0,31
Carbón pulverizado .....	0,41

Para calcular la presión del clinker, según esta tabla, se aplica la fórmula:

$$p = 0,3wh$$

y la resultante hasta la profundidad  $h$ :

$$P = 0,3 \frac{wh^2}{2}$$

y si  $w = 100 \text{ lbs/pie}^3$ :

$$P = 15h^2$$

que comparada con la del agua

$$P = \frac{62,4}{2} h^2 = 31,2h^2$$

indica que aproximadamente puede considerarse el clinker como un semifluido de peso específico 0,5, para lo que se refiere al empuje lateral.

Una de las fórmulas de origen racional más aceptadas es la de Rankine: para paredes verticales lisas y carga en talud de inclinación  $i$  el empuje total de una profundidad  $h$  es:

$$P = \frac{1}{2}wh^2 \cos i \frac{\cos i - \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \phi}}{\cos i + \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \phi}}$$

donde:

$w$  = peso específico del material.

$\emptyset$  = ángulo de reposo.

La dirección de  $P$  es paralela a la del talud, de modo que hace un ángulo  $i$  con la horizontal; el punto de aplicación está a una tercera parte de la altura de la pared encima de la profundidad  $h$ .

Si se representa el factor trigonométrico por  $k$  la fórmula queda:

$$P = \frac{1}{2}wh^2.k$$

que sólo difiere de la hidrostática en el factor  $k$  que depende de la fricción interna del material y del ángulo de la superficie libre. Como se ve, para un líquido:

$$i = \emptyset = 0$$

luego:  $k = 1$

En el caso de la superficie libre a nivel:

$$i = 0$$

y la fórmula queda:

$$P = \frac{1}{2}wh^2 \frac{1 - \sin \emptyset}{1 + \sin \emptyset}$$

El factor  $k$  de la fórmula general queda así medido por el ángulo de reposo y representa al mismo tiempo la relación entre el empuje sobre la pared y la presión vertical.

La fórmula enunciada suministra por consiguiente, la manera de calcular los empujes sobre las paredes laterales en los depósitos anchos. Para los silos estrechos que son los ordinariamente usados para granos y forrajes se han realizado numerosos experimentos que recoge Milo S. Ketchum en un capítulo especial de su obra fundamental: "Walls, Bins and Grains Elevators". La fórmula teórica de Janssen, que concuerda con los ensayos y que tiene en cuenta el frotamiento de los granos con las paredes del silo es:

$$L = \frac{wR}{n'} \left( 1 - e^{-\frac{khn'}{R}} \right)$$

donde:

$L$  = presión lateral en lbs/pie<sup>2</sup>.

## D y n a

$w$  = peso del grano en lbs/pie<sup>3</sup>.

$R$  = radio hidráulico del silo.

$e$  = área de la sección dividida por el perímetro.

$n' = \tan \phi$  = coeficiente de fricción entre grano y silo.

$h$  = profundidad del silo.

$k$  = relación entre la presión horizontal y la vertical.

Los valores de  $n'$  y  $k$  se ha determinado experimentalmente para diversas condiciones pero en general se admite:

$$k = 0,6$$

$$n' = 0,4 \text{ para trigo y otros granos.}$$

En el caso de estos silos, las paredes soportan además casi todo el peso del material transmitido por el frotamiento, cuyo valor es por pie lineal del perímetro:

$$W = wR \left( h - \frac{R}{kn} \right)$$

Multiplicando  $W$  por el perímetro se obtiene la carga vertical que transmite el grano a las paredes laterales. El fondo sólo recibe la diferencia entre el peso total y dicha carga. De aquí que para alturas superiores a 3 veces el diámetro, la presión lateral varía poco por absorberla el rozamiento con las paredes.

Para terminar esta revisión superficial de las fuerzas que actúan sobre las paredes de los silos, conviene hacer notar la necesidad de tener en cuenta, en el cálculo de depósitos subterráneos, la presión que ejerce la tierra exterior cuando el depósito está vacío y en especial si hay peligro de que las aguas subterráneas actúen sobre los muros de los fosos.

Conocidas las fuerzas exteriores que actúan sobre los recipientes, se procede a analizar los esfuerzos internos que ocasionan en las paredes y fondo del depósito. En la práctica, las formas de las secciones más empleadas para recipientes son el círculo y el rectángulo. Los esfuerzos dependen fundamentalmente de esa forma.

Los recipientes cilíndricos se calculan en la forma acostumbrada para tubos:

$$2Jt = pd$$

donde:

$J$  = esfuerzo de trabajo a la tensión.

$t$  = espesor de la pared resistente a la tensión.

$p$  = presión unitaria interna sobre las paredes.

$d$  = diámetro interior.

Esta fórmula vale para  $t/d = 0,025$ , mas para relaciones mayores basta reemplazar diámetro interior  $d$  por el exterior  $D$ .

La determinación de  $t$  por esta fórmula define la sección del material que ha de resistir la tensión producida en las paredes por el empuje.

El peso del material transmitido por frotamiento a las paredes, de acuerdo con la fórmula anterior, constituye una carga de compresión que debe atenderse en el cálculo de los muros con refuerzo adicional vertical, si se trata de hormigón, o directamente en la sección si se trata de acero o madera.

Los recipientes de sección rectangular distribuyen los esfuerzos así: cada pared trabaja como una losa sostenida por las dos paredes vecinas, que en ese caso sufren una tensión igual a la reacción del empuje. Por consiguiente, el cálculo corresponde al de fajas horizontales de una placa vertical sometidas a flexión por carga uniformemente repartida y a tensión por las reacciones de las fajas vecinas. Cuando la sección es cuadrada, la rigidez del apoyo ofrecido por las paredes vecinas es completa y en tal caso el coeficiente del momento flector corresponde al de empotramiento perfecto. Cuando la sección es rectangular, cede la rigidez del apoyo en beneficio de la mayor, por lo cual es necesario adoptar para ésta la fórmula:

$$M = \frac{pl^2}{10}$$

Sale de los límites de nuestro propósito analizar en este breve estudio los esfuerzos en los miembros exteriores de la estructura, como vigas y columnas, que transmiten al piso las cargas de los silos, así como el cálculo de las fundaciones y de la estabilidad con relación al viento. Bástenos haber insistido en la teoría del empuje de los materiales almacenados. Las fórmulas indicadas se han preferi-

## D y n a

do por su estructura lógica y expresiva de lo que acontece en las presiones laterales. Para adquirir información más completa sobre las mejores fórmulas y métodos de cálculo, consúltense, por ejemplo:

M. S. Ketchum: Walls, Bins, and Grains Elevators.

Wm. Cain: Earth Pressure, Retaining Walls and Bins.

Resal: Poussé des terres.

Ingo. Joaquín Vallejo A.

298

Ministerio de Trabajo, Higiene y Previsión Social.—Departamento de  
Ingeniería Sanitaria.

### NORMAS PARA LA ELABORACION DE PROYECTOS DE ALCANTARILLADOS

De acuerdo con las disposiciones legales vigentes, no se puede emprender en el país ninguna obra de alcantarillado sin que los proyectos hayan sido aprobados por el Ministerio de Trabajo, Higiene y Previsión Social.

Para que el Ministerio proceda a revisar y aprobar los proyectos se necesita que estén sujetos a las siguientes normas generales:

a) Memoria, listas de materiales, especificaciones y presupuestos que contendrán los siguientes detalles:

1º Estudios técnicos completos justificativos de las soluciones adoptadas y de los materiales empleados;

2º Datos generales de población, número de casas existentes en el perímetro urbano, crecimiento futuro, aumento del área urbanizada en un período de 30 años (Para el área futura basta un esquema general de las alcantarillas principales).

3º Estudio comparativo entre los sistemas separado y combinado con los cálculos justificativos de las soluciones adoptadas y de los materiales empleados.

4º En caso de que se adopte por el sistema combinado o mixto,