CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Antecedentes. Los silos se han usado ampliamente para el almacenamiento de una gran variedad de materiales granulares. En la actualidad se ha incrementado la necesidad de contar con silos de mayores capacidades para el almacenamiento de materiales, debido, principalmente, al mejoramiento de los métodos de producción y mecanización industrial, en los cuales se utilizan diversas formas de llenado, extracción y manejo de los materiales.

Aunque los silos en el pasado se han utilizado básicamente para el almacenamiento sedentario de materiales, también se requieren para la distribución y manufactura de materiales, utilizándose con amplitud en los procesos de mezclado, homogeneización y proporcionamiento. Al mismo tiempo, los silos están demandando una extracción de materiales más rápida, en las que se requieren varias aberturas para su descarga, así como diámetros y alturas más grandes para aumentar la capacidad.

Recientemente, se han mejorado las técnicas para la medición de las presiones, con estudios de materiales en reposo y en varias condiciones de llenado y extracción. Estos experimentos revelan magnitud y distribución de presiones importantes que no son predecibles mediante los métodos de cálculo de presión estática.

El diseño de silos se ha acercado más a la realidad, gracias a la contribución de diferentes investigadores, como Janssen y Airy (Safarian, 1985), Reimbert (Reimbert, 1976). Estudios posteriores, de Reimbert, Janike, (Jenike, 1977), han refinado los métodos de diseño y del comportamiento de los materiales almacenados. A pesar de estos estudios y contribuciones, siguen aún presentándose fallas en silos, en todas partes del mundo, con pérdidas económicas y de vidas. Algunas de estas fallas pueden clasificarse de acuerdo con sus causas: (a) error en el análisis y diseño; (b) error en la construcción; y (c) error en la operación.

Los errores en el análisis y diseño normalmente involucran evaluación inadecuada de presiones, la consideración impropia de la contribución de todo el conjunto de los elementos que conforman la estructura, el menosprecio de los efectos de pandeo, detalles inapropiados o detalles constructivos insuficientes. Los errores en construcción incluyen la mala colocación del refuerzo y su separación, la omisión de refuerzo, la deficiente mano de obra o el uso de materiales de mala calidad. Los errores en la operación incluyen el almacenamiento de materiales distintos a los materiales considerados para los cuales el silo fue diseñado y los cambios en la forma de descargar los materiales o la velocidad de descarga.

Estudios experimentales. Algunos estudios experimentales muestran que la descarga de materiales granulares y polvorosos, a través de una abertura excéntrica, causa cambios en la presión lateral, muy diferentes a los causados al momento de la extracción del material por una abertura concéntrica (Safarian, 1985). Algunas pruebas mostraron que el aumento de la presión debido a la descarga excéntrica, comparada con la que ocurre para una descarga concéntrica, ocurre en el lado opuesto a la abertura de la descarga excéntrica y que la presión disminuye en el lado cercano a donde se localiza la abertura.

Pruebas realizadas en modelos de silos a escala, usando diferentes arreglos de aberturas de descarga, revelan que las presiones debidas a la descarga excéntrica no tienen un comportamiento claramente definido, por lo que pueden aumentar o aún disminuir en cualquier lado, nivel o profundidad de almacenamiento, por arriba de la abertura (Pieper, 1968). Esta irregularidad causa momentos flexionantes verticales y horizontales en las paredes de los silos, los cuales comúnmente no eran tomados en cuenta para el diseño convencional de los silos de concreto.

La condición de flujo no simétrico causa presiones no uniformes sobre las paredes de los silos y, consecuentemente, las presiones no uniformes causan momentos flexionantes horizontales y verticales, los cuales deben considerarse en el diseño de las paredes de los silos. Estos momentos flexionantes deben considerarse en los silos de concreto. En silos circulares de acero, debido a que la pared es flexible, los momentos flexionantes horizontales usualmente no se consideran; pues las paredes únicamente cambian de forma, de tal manera que los momentos flexionantes no ocurren; sin embargo, es posible que la disminución de la presión pueda causar un pandeo de la pared hacia el interior, por lo cual debe revisarse esta condición.

1.1 Objetivos

El objetivo fundamental de esta tesis es la comparación de algunos métodos de análisis estructural, para silos circulares individuales de concreto reforzado tomando en cuenta el efecto de las cargas excéntricas, diferentes sistemas de fondo y de relaciones de altura con el diámetro. Entre los objetivos particulares se encuentran:

a) Describir las diferentes formas estructurales de silos, los tipos de construcción, las opciones más comunes de su utilización y las cargas y presiones a las que están sujetos presentando algunas teorías que existen para su evaluación.

b) Investigar el efecto que tienen las cargas excéntricas en la distribución de los esfuerzos y las deformaciones mediante el análisis de silos para diferentes sistemas de fondo y relaciones de la altura con el diámetro.

c) Caracterizar el comportamiento estructural de los silos, utilizando un método de Elemento Finito, para considerar la contribución de todo el conjunto de sus elementos estructurales (paredes, tapa o techo, sistema de fondo, tolvas cónicas, estructura de soporte), comparándolo con métodos de análisis simplificado.

d) Recomendar algunas razones para seleccionar adecuadamente el método más apropiado y definir sí éste es aplicable a diferentes geometrías de silos, condiciones de carga y presiones actuantes, con base en los resultados de los análisis.

CAPÍTULO 2

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

Esta tesis se enfoca, fundamentalmente, a la comparación de algunos métodos de análisis estructural, para silos circulares individuales de concreto reforzado y pretende dar una visión más exacta en cuanto al método que resultaría más apropiado utilizar en este tipo de silos. Se toman en cuenta las cargas excéntricas, debido a que generan presiones no simétricas sobre las paredes de los silos; modificando así el comportamiento de los silos en los que se considera solamente descarga concéntrica y; también, se toman en cuenta, diferentes geometrías de silos.

Para llevar a cabo esta investigación se seleccionaron cinco modelos estructurales, que se presentan en el capítulo 4, en los cuales varía la relación de la altura con el diámetro, la forma de la losa de fondo y la posición de la descarga del material (concéntrica y excéntrica).

En el capítulo 3, se describe con brevedad las diferentes formas de silos, los tipos de construcción, los elementos estructurales, las cargas y la determinación de las presiones sobre las paredes y el fondo de los silos, utilizando diferentes métodos.

2.1 Métodos de análisis seleccionados

En esta tesis se estudiaron los siguientes tres métodos de análisis de silos circulares individuales:

a) **Análisis convencional.** Este método es el más utilizado en la práctica profesional e involucra la obtención de fuerzas circunferenciales y axiales, siguiendo los criterios y procedimientos utilizados por S. Safarian (Safarian, 1985) y el código ACI 313 (ACI 313, 1991) y se describe detalladamente en el capítulo 5. Para fines comparativos, se le definió como "**Método I**".

b) **Analogía de marcos.** Este método de análisis fue desarrollado por Priestley para tanques cilíndricos de almacenamiento de líquidos o gases sometidos a cargas axisimétricas y cargas rotacionalmente no simétricas (Priestley, 1985). En el presente trabajo se aplicó esa teoría, por primera vez, hasta donde se ha sabido, para el análisis de silos circulares. La descripción de este método se menciona en le capítulo 6 y para fines comparativos, se le llamó "**Método II**".

c) **Elemento finito.** El Método del Elemento Finito involucra los principios del método de desplazamientos que requiere la determinación de las rigideces de una estructura, para la obtención de las fuerzas y desplazamientos con solución de matrices. A este método, para fines comparativos, se le llamó "**Método III**".

2.2 Hipótesis y consideraciones

Hipótesis: El método del elemento finito, para el análisis de silos, es el más completo para la determinación de las acciones mecánicas que se presentan en los mismos, debido a que pueden incorporarse todos los elementos que conforman la estructura, por lo que, este método, se toma como referencia para observar las diferencias que existen con respecto a los otros dos métodos seleccionados y para verificar si estos últimos son aplicables a diferentes tipos de geometría y casos de carga que actúan en los silos.

Consideraciones: Las consideraciones que se utilizaron para llevar a cabo el desarrollo de los análisis de los silos son las siguientes:

a) El estudio comparativo se extendió solamente para silos circulares individuales de concreto reforzado, considerando cinco modelos estructurales que varían en la relación de la altura con el diámetro o tienen diferentes formas en la losa de fondo.

b) Las cargas que se consideraron en los análisis comparativos son las cargas muertas debidas al peso propio de los elementos estructurales y las cargas vivas ocasionadas por los materiales almacenados: presión estática, sobrepresión, presión debido a la excentricidad de la descarga y fricción entre las paredes y el material.

c) No se consideró necesario incluir, en el estudio comparativo, las cargas accidentales, como la acción del viento y el sismo, ni el efecto de los cambios de temperatura en los materiales almacenados.

d) Se supuso suficiente enfocar, únicamente, las acciones mecánicas que se presentan en las paredes; sin embargo, en los análisis se consideraron las cargas que intervienen en todos los elementos estructurales que conforman los silos.

e) En los casos de estudio en que se consideró descarga excéntrica, la posición de esta descarga, se supuso localizada a una distancia de una cuarta parte del diámetro, a partir del centro del silo.

2.3 Estudio comparativo

Se realizó el estudio comparativo, que se describe en el capítulo 8, en el que se incluyen los resultados de las acciones mecánicas obtenidas para las paredes de los silos, con cada uno de los métodos de análisis y para varios casos de estudio mencionados en el mismo capítulo, en el que se consideró los diferentes modelos estructurales y condiciones de carga que se describen en el capítulo 4.

Resultado de este estudio son las conclusiones y recomendaciones que conforman el capítulo 9, en donde se menciona cuál de los métodos simplificados es el más apropiado y cuáles son sus principales limitaciones de uso, para cada caso en particular.

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DE LOS SILOS DE CONCRETO

Un silo es un contenedor vertical, destinado al almacenamiento de materiales granulares o polvorosos a granel. En la figura 3-1 se muestra el procedimiento típico para el manejo de materiales, el cual consiste primeramente en la recepción del material (F), que luego se transporta mediante un elevador (E) hacia el nivel superior de las celdas, en donde se transfiere a otro transportador de banda (T) que distribuye el material hacia diferentes orificios, para su colocación dentro de las celdas (C). Finalmente, se realiza la descarga del material en un transportador de salida (T′) o directamente a camiones o vagones de ferrocarril. Cada material requerirá de un proceso diferente de almacenamiento, por lo que las características de los silos podrán variar en capacidad, cantidad de celdas, geometría y materiales estructurales que lo conforman, según las necesidades para cada caso en particular.

3.1 Tipos de silos

La geometría del silo, para algunos autores, tiene una influencia muy importante en el comportamiento de los materiales almacenados, tanto en su estado de reposo como en el proceso de descarga de los mismos. De acuerdo con el proceso industrial que se utilice para el manejo y transporte de los materiales, la geometría del silo puede ser diferente en altura, diámetro y configuración de la losa de descarga. Se presenta una primera clasificación de los silos de acuerdo con su geometría global, en la que si se satisface alguna de las condiciones que se presentan a continuación se trataría de un silo de almacenamiento profundo y, por el contrario, si no se satisfacen estas condiciones, se trataría de un bunker o almacenamiento de poca altura:

a) Aproximaciones empíricas:

- $H > 1.5D$ para silos circulares
- $H > 1.5a$ para silos rectangulares

donde H es la altura del silo, D es el diámetro y "a" es la dimensión menor de un silo rectangular.

b) Aproximaciones basadas en el plano de ruptura

La figura 3-2 muestra silos de dos diferentes profundidades. El plano de ruptura se determina por la teoría de Coulomb. Despreciando la fricción de las paredes, para el caso de paredes verticales y la superficie horizontal superior, el plano de ruptura de Coulomb se localiza en la línea central entre el ángulo de reposo (ρ) y las paredes verticales. De acuerdo con A. Reimbert, el ángulo de ruptura debería ser igual a $\pi/4-\rho/3$. En cualquiera de los dos casos, si la línea de ruptura interseca la línea superior del material almacenado se trataría de un bunker, de lo contrario sería un silo.

La clasificación anterior no es crítica, debido a que por ejemplo, el comité ACI-313, considera, por simplicidad y con poco error, que todos los contenedores verticales, sin importar su relación altura-ancho, se traten como silos, aunque el comportamiento de los materiales almacenados pueda diferir según el tipo de recipiente; sin embargo, el mismo comité, señala la diferencia al aplicar factores de sobrepresión que dependen de la geometría del silo, a pesar de que las considere como estructuras similares (ACI 313, 1991).

3.1.1 Formas de silos

Los silos pueden ser individuales o formar grupos (batería de silos). La forma estructural más común es la circular; en cuyo caso, el silo está sujeto a una presión uniforme alrededor de su circunferencia y sus paredes se comportan como una membrana de tensión, sin momentos flexionantes, a lo largo de la mayor parte de su altura, excepto en los extremos en donde, generalmente, las paredes están conectadas a otros elementos. Por esta razón, los silos circulares se construyen con diámetros que exceden las dimensiones prácticas de silos rectangulares o cuadrados. Desafortunadamente, la mayoría de las veces, los silos circulares con grandes diámetros tienen varias aberturas de descarga excéntrica, de tal manera que la condición de estar libre de momentos, en la parte media de las paredes, no es real, debido a que se presentan momentos flexionantes horizontales. La fotografía 3-1 muestra un ejemplo típico de un silo individual circular de concreto para almacenamiento de clinker. Algunas de las secciones transversales típicas de silos individuales se muestran en la figura 3-3.

También, existen silos circulares que forman grupos, como los que se muestran en las figuras 3-4(a) a la 3-4(e). Cuando se utilizan dos o más silos, el espacio que queda entre silos (intersilo) también se aprovecha para el almacenamiento de los materiales. En algunos casos, se agregan otras formas de almacenamiento por el exterior del grupo de silos llamadas "bolsas de silos" para obtener la máxima capacidad. Las fotografías 3-2 y 3-3 muestran dos ejemplos de grupos de silos para el almacenamiento de granos.

Las formas de silos poligonales como hexagonal u octagonal (ver figura 3-4) tienen las mismas ventajas que los silos rectangulares, pero también tienen momentos flexionantes horizontales combinados con tensión; sin embargo, por su gran número de lados se aproximan más a la forma circular y a sus ventajas estructurales.

Las formas de silos mencionadas se pueden adaptar a la construcción con estructura de acero, concreto reforzado o presforzado o también a la construcción con elementos prefabricados de concreto.

3.1.2 Tipos de construcción de silos

Silos de concreto reforzado

El concreto es comúnmente, el material más utilizado para la construcción de silos. Éstos generalmente son colados en el lugar o prefabricados. El concreto puede utilizarse para la estructura completa: cimentación, paredes, techo, fondo y tolva; o sus componentes, tales como las tolvas, soporte de las losas de fondo o del techo pueden ser de acero y el resto de concreto. Además de los ejemplos de las fotografías 3-1 a la 3-3, que muestran las formas típicas de silos, otros ejemplos de silos de concreto reforzado pueden ser los de las fotografías 3-4 y 3-5, que muestran dos vistas de unos silos gemelos circulares, construidos para el almacenamiento de cemento y el de la fotografía 3-6, que muestra tres silos circulares individuales, para almacenar cemento, que están en etapa de construcción con cimbra deslizable.

Ventajas de los silos de concreto:

a) Pueden configurarse fácilmente.

b) Dado que el concreto es relativamente inerte no requieren membranas protectoras.

c) Se les pueden dar acabados estéticos, más fácilmente que en otros materiales.

d) Requieren menor mantenimiento que los de otros materiales.

e) Debido al gran espesor de sus paredes, son menos vulnerables al pandeo, comparados con silos de otros materiales.

Sus desventajas son:

a) El peso de las estructuras de concreto es mayor que el de las estructuras metálicas, de tal manera que requieren mayores dimensiones en la cimentación.

b) Son susceptibles de agrietamiento.

El criterio para definir si una estructura de acero o de concreto es más económica, para una aplicación particular, depende de muchos factores, que incluyen el costo, el tamaño, la complejidad de la estructura, su localización y los problemas de la entrega de los materiales en el sitio.

Los silos de concreto, con paredes rectangulares o cuadradas siempre tienen momentos flexionantes horizontales positivos y negativos mayores, por lo que requieren espesores de paredes más grandes y generalmente dos lechos de refuerzo. Otra alternativa de silos podría ser la hexagonal u octagonal, por acercarse a las ventajas estructurales de silos circulares y a las ventajas de construcción para silos con paredes planas rectangulares.

Silos de concreto post-tensado

La industria actual demanda la utilización de silos de grandes diámetros, con múltiples descargas y altas velocidades de descarga, que han hecho a los silos post-tensados una atractiva alternativa para el almacenamiento de materiales. El post-tensado provee un efectivo medio para el control de agrietamientos verticales de las paredes y se pueden usar paredes más esbeltas que las de concreto reforzado. Normalmente, únicamente las paredes son post-tensadas, y el resto de los elementos son reforzados convencionalmente. La fotografía 3-7 muestra dos silos gemelos de concreto post-tensado, de 24 m de diámetro, por 60 m de altura, para el almacenamiento de clinker en los que no se aprecia la diferencia con respecto a los silos de concreto reforzado convencional, debido a que los cables de presfuerzo se tensaron utilizando cavidades en las paredes, que fueron selladas después del post-tensado.

Ventajas de los silos de concreto post-tensado:

a) Su resistencia al agrietamiento. Las paredes se comportan monolíticamente y están sujetas a una compresión horizontal que previene las grietas de contracción.

b) Reportan economía en la construcción inicial. La mayoría de esta economía resulta de la eliminación de las dificultades de la cimbra deslizable, cuando el post-tensado no se utiliza. Las paredes de los silos de diámetros más grandes tienen presiones más altas que las de diámetros más pequeños, las fuerzas de tensión circunferencial también son más grandes y, por lo tanto, se requeriría más acero por habilitar, en el caso de los silos de concreto reforzado que haría más lento el deslizado de la cimbra. En el post-tensado se eliminan estas dificultades y, por supuesto, se agregan los tendones subsecuentes con sus respectivos tensados.

c) Economía en mantenimiento. Como el post-tensado se diseña para prevenir los esfuerzos de tensión horizontal en las paredes, éste puede ser efectivo en el control del agrietamiento vertical, aún en condiciones de vibración.

d) Las paredes post-tensadas pueden tolerar las irregularidades inesperadas de las distribuciones de presiones de los materiales almacenados, mejor que las de concreto reforzado. Las presiones irregulares son las que ocurren en silos de grandes diámetros y descargas múltiples, generando momentos flexionantes horizontales que podrían causar grandes daños.

Quizás la única desventaja de los silos post-tensados es que el diseñador debe familiarizarse con el post-tensado y los problemas de las cimbras deslizables.

Dentro de los silos post-tensados se usan principalmente dos tipos de sistemas de tensado: el sistema de alambres enrollados y el tensado de tendones.

El enrollado de alambres es común para los tanques de almacenamiento de líquidos, pero puede aplicarse igualmente a silos. En este método, el alambre de alta resistencia es enrollado, a tensión, alrededor de la superficie exterior de la estructura cilíndrica, mediante un equipo especial. Como el equipo se mueve alrededor de la estructura, este método sólo puede aplicarse a silos circulares individuales. Se pueden utilizar múltiples capas de alambres enrollados. Las capas de alambres enrollados se separan normalmente una de la otra y se cubren con concreto lanzado o grout.

Las ventajas del sistema de presfuerzo con alambres enrollados son:

a) Se realiza después de que las paredes han sido construidas y no requiere preparaciones especiales durante el deslizado de la cimbra.

b) Provee un presfuerzo uniforme alrededor de las paredes y este presfuerzo puede variarse verticalmente al patrón de esfuerzos de diseño calculados.

c) No requiere la construcción de pilastras desde las cuales se aplican las fuerzas de post-tensado.

Las desventajas del sistema de presfuerzo con alambres enrollados son:

a) Su aplicación se limita a silos circulares individuales.

b) Requieren un recubrimiento de mortero protector especial, que debe aplicarse con gran cuidado. Este recubrimiento protector se presfuerza parcialmente en forma horizontal, por lo que, puede agrietarse horizontalmente en condiciones extremas de temperatura. Por esta razón es esencial dar un espesor mínimo de recubrimiento. El agrietamiento vertical del mortero protector se controla con el presforzado y la adherencia del mortero a los alambres.

Por otro lado, el post-tensado con tendones puede hacerse con los siguiente métodos:

a) Los tendones y su cubierta protectora pueden colocarse y embeberse en las paredes durante la construcción. Este método es práctico con cimbra escalonada; sin embargo, no es práctico en la construcción con cimbra deslizable.

b) Los tendones pueden colocarse después de la construcción de las paredes, mediante el insertado de ellos dentro de ductos rígidos previamente embebidos en las paredes de concreto. Este método es aplicable a la construcción con cimbra escalonada o deslizable.

c) Se pueden tensar tendones exteriores después de la construcción. Este método es especialmente útil para la reparación o reforzamiento de estructuras existentes.

Una ventaja del sistema de tensado de tendones es que no sólo se aplica a silos circulares, sino también se aplica en grupos de silos y a silos de cualquier forma. Las desventajas de este sistema serían que la distribución de las fuerzas de presfuerzo es menos uniforme que la de los alambres enrollados y los anclajes y tendones exteriores requieren pilastras o salientes y protección contra la corrosión.

La figura 3-5 muestra las zonas típicas de tensado de silos individuales circulares; pudiendo ser, en pilastras externas, en intersecciones de paredes o en cavidades de las paredes. Las pilastras exteriores son usualmente de concreto reforzado y monolíticas con las paredes del silo, como se muestra en la figura 3-5(a); sin embargo, para la reparación de silos existentes, a menudo se utilizan pilastras de acero estructural soldado.

La cantidad de zonas de tensado se determina considerando las pérdidas de fricción, las concentraciones locales de esfuerzos y otros factores. Es común utilizar cuatro localizaciones para un silo circular individual, con tendones traslapados como se muestra en la figura 3-5(a). Lo más importante es que se tengan los suficientes traslapes para que la presión en los tendones contra las paredes sea lo más uniforme, alrededor de la circunferencia. De otra manera, las distorsiones de la flexión serán severas y el silo puede fallar durante el tensado de los tendones.

La figura 3-6(a) muestra un patrón de tendones con sólo tres puntos de tensado por silo. Cada tendón se extiende a dos tercios de la circunferencia. Las fuerzas de los tensados consecutivos serán adicionales para producir una presión promedio uniforme sobre las paredes.

Cuando se utilizan cavidades, éstas deben localizarse en forma escalonada (horizontalmente) para reducir la posibilidad de generar una zona de falla en las paredes, debida a la proximidad vertical entre las cavidades.

Silos de concreto prefabricado

Los silos de concreto prefabricado han sido ampliamente utilizados en Europa y Japón, siendo la clave de su éxito la estandarización de las paredes, el fondo y el techo de los mismos.

Las ventajas de los silos prefabricados son las siguientes:

a) Ofrecen mejor calidad, resultante de la fabricación según condiciones estrictas de control de calidad.

b) Implican un menor costo de montaje, resultante de: (i) poca o no-utilización de cimbra; (ii) menor tiempo de preparación antes de la construcción; (iii) menor necesidad de control de calidad de campo y (iv) la necesidad de menor personal altamente calificado, comparada con la construcción colada en el lugar.

Una desventaja de los silos prefabricados está constituida por las restricciones de transporte derivadas del peso y el tamaño de sus componentes. Para minimizar los problemas de transporte, las unidades precoladas más grandes pueden colarse al pie de la construcción.

Las paredes de los silos precolados generalmente son de espesor uniforme; aunque algunos silos de paredes delgadas, con costillas o nervaduras horizontales y verticales, también se utilizan ampliamente; sin embargo, las paredes con costillas pueden ser antieconómicas debido a las cimbras y patrones de refuerzo más complicados. También, en grupos de silos, se llegan a tener costillas interiores en la intersección de las paredes, que para algunos materiales no son aceptables, como los materiales granulares, el carbón o la harina.

Las paredes prefabricadas pueden ser reforzadas convencionalmente o presforzadas. El costo de unidades de sección transversal precoladas completas es usualmente menor que secciones conectadas para formar una unidad.

Para asegurar que un silo precolado sea suficientemente rígido para actuar como una unidad monolítica, las juntas horizontales y verticales (para grupos de silos) entre silos deben ser propiamente diseñados y construidos. Si estas juntas se diseñan para proveer una resistencia equivalente a través de la estructura, el silo precolado será tan capaz como un silo monolítico, para transferir fuerzas de corte horizontal y vertical.

Probablemente la mejor solución para una conexión rígida es usar llaves de cortante entre las unidades precoladas, además de conexiones soldadas. Las juntas verticales entre silos, en grupos de silos, se inyectan con grout y se amarran con refuerzo o pernos especiales.

Las figuras 3-7 a la 3-10 muestran ejemplos típicos de detalles de conexiones para silos prefabricados.

Grupos de silos prefabricados rectangulares. Algunos diseñadores de Europa han desarrollado un sistema de unidades precoladas para la construcción de grupos de silos cuadrados (Lipnitski, 1967). En este sistema, mostrado en las figuras 3-8 y 3-10, únicamente se tienen tres tipos básicos de unidades: (a) unidad cuadrada o espacial; (b) unidad en "L" o esquina y (c) unidad plana. La figura 3-8 muestra estos tres tipos de unidades y sus conexiones mediante pernos. Las juntas se inyectan con grout, después de que han sido unidas con los pernos.

La figura 3-10 muestra la planta y los detalles de las juntas para silos precolados cuadrados en grupo. En Europa, algunas conexiones van unidas con pernos y otras soldadas mediante placas embebidas. El tamaño más común de unidad precolada para silos cuadrados en Europa es de 3.0 x 3.0 m.

Para silos rectangulares (o cuadrados), cada pared debe resistir los momentos horizontales en combinación con la tensión horizontal. Las conexiones de los elementos deben ser capaces de resistir los momentos de empotramiento en cualquier elemento de pared que termina en una junta. Se recomienda un espesor de paredes mínimo de 160 mm para elementos de 3.0 x 3.0 m.

Silos prefabricados circulares. Dependiendo de su altura y su diámetro, los silos precolados circulares pueden ensamblarse como unidades circulares completas (montadas una sobre otra) o formarse con segmentos circulares verticales conectados a lo largo de sus extremos, para formar un círculo completo.

Un ejemplo de este segundo tipo de silos prefabricados se muestra en las figuras 3-11 y 3-12. En este sistema japonés hay juntas horizontales y verticales. Ambas conexiones usan pernos de alta resistencia. En los puntos donde los silos se conectan uno con otro, se utilizan pernos radiales, como se muestra en la figura 3-12(b). En estas uniones se coloca acero de refuerzo y se hace un colado de concreto, para formar una columna de intersección fuerte. Tales uniones de los elementos de paredes prefabricadas, están sujetas a momentos flexionantes, así como también a tensión circunferencial. Además, en ambas conexiones interior y exterior, los pernos tangenciales están excéntricos al centro del espesor de las paredes, de tal manera que los momentos flexionantes ocurren en cada elemento de pared, causando tensión adicional en la cara exterior de las paredes. Como se muestra en la figura 3-12(b), se utilizan dos lechos de refuerzo en las paredes, así como estribos anclados cerca de la cara de tensión de los patines.

3.1.3 Silos especiales

Silos de Homogenización

Los silos de homogenización se han desarrollado para la necesidad de almacenar grandes volúmenes para la homogenización y mezclado de una amplia variedad de materiales pulverizados secos, que requieren homogenización en el proceso de flujo. Entre estos materiales se encuentran: la mezcla de cemento crudo, el polvo de hierro, los materiales cerámicos, el polvo de zinc, el cemento terminado, las resinas de polivinilo, las resinas de polietileno y las de propileno, el polvo de óxido de níquel y la mezcla de magnesita. Estos silos tienen dos funciones: almacenar y mezclar en una misma unidad. Estos silos pueden ser de concreto o de acero.

Una vez que se han determinado las cargas y presiones, hay muy poca diferencia entre los procedimientos de diseño estructural y de construcción para silos de homogenización o de mezclado que para los silos ordinarios de almacenamiento.

Hay muchos procesos de mezclado disponibles en la actualidad. Entre los sistemas de mayor demanda destacan los de Claudius Peters, Fuller, IBAU Hamburg, Polysius, etc. La selección del sistema de mezclado y su capacidad depende de muchos factores, incluyendo requerimientos de proceso, costo y algunos otros factores.

Las paredes de los silos de homogenización deben de ser herméticas. En los silos de concreto se debe poner especial atención en las juntas entre el techo y las paredes y entre las paredes y el fondo. Debe seleccionarse un sellador que garantice el sello permanente. Este sellador debe ser independiente de la expansión y contracción, cuando ésta ocurre y ser capaz de tolerar el calor de los materiales almacenados.

Silo de homogenización con sistema Claudius Peters. El sistema de homogenización continua de Claudius Peters consiste de dos recipientes, uno dentro del otro: la cámara de almacenamiento exterior (el silo) y la cámara de mezclado interior. La cámara de mezclado puede ser de dos formas: (1) un cono invertido, como se muestra en la figura 3-13(b); o (2) un cilindro circular, como se muestra en la figura 3-13(a). La forma depende de los requerimientos del proceso.

El mezclado de los materiales se hace por aireación del silo y de la cámara de mezclado, mediante aireadores localizados en la losa de fondo. El material se extrae del área de almacenamiento dentro de la cámara mediante aireación del fondo del silo, en varias etapas. El mezclado final se hace dentro de la cámara de mezclado, mediante un sistema de aireación por cuadrantes. En este sistema, tres cuadrantes se mantienen inactivos y uno activo, rotando el cuadrante activo, en todo su derredor.

En los sistemas en los cuales se tiene una cámara de mezclado de concreto reforzado, ésta se localiza dentro del silo, como se muestra en las figuras 3-14 y 3-15. La figura 3-16 muestra la planta típica para una cámara de mezclado y el silo. Las figuras 3-14 y 3-15 muestran que la descarga puede ser localizada a cualquier altura, de acuerdo con las necesidades para el proceso. Las figuras 3-14 y 3-15 muestran tres tipos de soportes de losa de fondo:

a) En la figura 3-15(a), la losa de fondo descansa sobre las pilastras exteriores construidas con cimbra deslizable y las paredes de la cámara interior. Esta losa puede ser una unidad continua, o una losa interior circular independiente y un anillo de losa exterior. El fondo de la losa también puede soportarse con columnas, además de las paredes interiores o pilastras.

b) En la figura 3-15(b) la losa de fondo descansa sobre el relleno compactado, la losa puede ser una unidad simple o una losa circular independiente y un anillo exterior. La presión lateral del relleno compactado con sobrecarga debe considerarse en el diseño de las paredes inferiores.

c) En la figura 3-16, la losa de fondo se soporta únicamente con las paredes exteriores, sin soportes interiores. Se pueden utilizar niveles inferiores por abajo del fondo del silo.

Silo de homogenización con sistema Fuller. Los sistemas de homogenización de Fuller son de dos tipos: continuos y discontinuos. Cada tipo puede ser en uno o dos niveles o repetitivo, como se muestra en la figura 3-17(a) y (b). Éstos pueden tener los fondos con pendiente ligera o fondo cónico, con descarga centrada o excéntrica.

La figura 3-17(b) muestra el sistema de alimentación localizado debajo del silo, para la consideración de descarga centrada. La cámara superior se utiliza para mezclar y la inferior para homogenizar el material almacenado. El material se descarga mediante aerodeslizadores, localizados en la losa de fondo o en el caso de las tolvas de fondo se descarga por la cara interior de las paredes de la tolva. El mezclado en la cámara superior se realiza mediante almohadillas de aireación especiales, patentadas, que cubren prácticamente el fondo completo de la losa de la cámara superior. El fondo completo del silo se activa con aire fluidizado y, sobre una octava parte del área, se activa con aire a velocidad más alta, para crear el movimiento del material necesario para la acción de mezclado.

Estructuralmente, hay poca diferencia entre los silos utilizados para sistemas de homogenización continua o discontinua. La losa de fondo, para formar el piso de almohadillas para el sistema de aireación discontinua, lleva una pendiente de 4° hacia el punto de descarga (ver figura 3-18). Se hacen rellenos de concreto para dar la pendiente sobre la losa de fondo y para formar las trincheras que se requieren para el sistema de aireación.

Los requerimientos de la hermeticidad para los silos de homogenización con sistema Fuller, especialmente los construidos de concreto, son más estrictos que los silos de almacenamiento de líquidos debido a que en el sistema de mezclado Fuller, el mezclado real del material ocurre dentro del silo, exponiendo a las paredes y al fondo del silo a una presión considerable directa de aire debido a los efectos de aireación. La cara interior de las paredes debe tener un acabado tan liso como sea posible para minimizar la resistencia a la fricción, para mover la masa del material homogenizado.

Silos de carbón

Los silos de carbón varían en tamaño; desde silos pequeños, circulares con descargas concéntricas, hasta silos de grandes diámetros, con varias descargas. Un ejemplo puede ser el de la fotografía 3-8 que muestra 3 silos de almacenamiento de carbón de 15 m de diámetro por 60 m de altura y, también en la misma fotografía, se muestran algunos transportadores para el manejo del material. Los problemas especiales de los silos de carbón incluyen lo siguiente:

a) La posibilidad de generar fuego o una explosión, por combustión espontánea.

b) Problemas de flujo del carbón (acentuado por la variabilidad del carbón de diferentes fuentes, tiempo y condiciones.)

c) Problemas de vibración, cuando se utilizan descargas y alimentadores múltiples.

d) Susceptibilidad a la corrosión, por la reacción con los componentes del ácido sulfúrico que pueden ser liberados del carbón.

Los primeros dos puntos están relacionados, debido a que el flujo pobre puede ayudar a crear las condiciones que conducen al fuego o a la explosión.

El carbón (si es especialmente pulverizado) puede ser explosivo, en ciertas condiciones. Un silo de almacenamiento puede generar fácilmente estas condiciones, si no se toman las precauciones durante el diseño y la operación. Para hacer menos susceptible al silo de carbón al fuego o a la explosión, deben tomarse las siguientes medidas:

a) Prevenir los almacenamientos muertos, es decir, las zonas dentro del silo para el cual el carbón no se moverá durante la operación normal. El interior del silo no deberá tener extremos o zonas rugosas que detengan el material.

b) Mantener el polvo de carbón retirado de equipos que produzcan chispas y flamas abiertas o de algunas otras fuentes de calor.

c) Proveer el flujo continuo del carbón, de tal manera que no se generen zonas de material estancado y que tampoco sea necesario romper la formación de un arco de material.

d) Proveer adecuada ventilación a través de las paredes y el techo del silo para permitir la salida a la atmósfera de los gases que se generen dentro del silo.

e) Para reducir el contenido de oxigeno, especialmente en el carbón pulverizado, se puede inyectar nitrógeno al silo.

Para el manejo del carbón se prefiere el patrón de flujo de masa, debido a que éste previene la formación de zonas de material estancado y minimiza potencialmente el choque y la vibración.

Considerando el patrón de flujo de masa, la superficie superior del material almacenado puede ser que no se mueva en un modo uniforme; más bien, este material puede caer en incrementos de unos cuantos centímetros. Esto ocurre aparentemente cuando las partículas de las capas inferiores dejan huecos temporales, que se llenan con la caída del material superior. Este comportamiento no causa el impacto suficiente para cambiar significativamente las presiones del carbón.

Para reducir la probabilidad de explosión del polvo de carbón, se deben colocar colectores de polvo, de capacidad apropiada, que deben prevenir la concentración de la mezcla de aire con polvo que pueda explotar si es que se incendia.

El gas metano, en ocasiones causa de la explosión desastrosa de una mina de carbón, también puede presentarse en silos y causar una explosión similar. El metano es incoloro e inodoro por lo cual puede ser imposible de detectar y es altamente flamable. Debido a que el metano es más ligero que el aire, se localiza usualmente cerca de la losa de techo, entre las vigas de techo y justamente abajo del sistema del fondo del silo. Se deben proveer los medios para permitir el escape del metano de estas áreas, hacia la atmósfera. Las aberturas o las ventilas son los medios usuales para lograr esto. (Las ventilas de explosión requieren una presión interna para activarse y no previenen la acumulación de gas.)

Silos de granos

Algunos ejemplos de silos de almacenamiento de granos se muestran en las fotografías 3-1, 3-2 y 3-3 en las que la forma y arreglo de los silos, depende de las necesidades del producto que vaya a ser almacenado. Entre estas necesidades se consideran, especialmente, la degradación del grano y la explosividad del polvo del grano que son dos de los problemas que tienen que afrontar los diseñadores de los silos y los que manejan su operación. Inicialmente, cada problema puede ser dirigido a través del diseño y de la construcción apropiada, pero el mal uso o el poco mantenimiento, pueden nulificar el buen diseño y causar que los problemas aparezcan.

El polvo del grano se puede generar con el movimiento del grano o con el roce de las partículas, unas con otras. En una masa concentrada, el polvo del grano es inofensivo, pero al ser aerotransportado y cuando la proporción de aire a polvo es crítica, puede explotar violentamente. Una vez que el polvo aerotransportado se incendia y el aire de alrededor se empieza a expandir, el polvo adicional se levanta y la explosión viaja o se repite en otras partes de la estructura; es decir, la primera explosión puede causar explosiones secundarias que pueden ser más severas que la primera.

Los sistemas de colección de polvo, aunque estén bien diseñados, pueden permitir fugas pequeñas; por lo tanto, es muy importante eliminar o bloquear todas las fuentes potenciales de incendio. Esto requiere la atención combinada de los ingenieros estructurales, mecánicos, eléctricos y contratistas, además del personal de operación y mantenimiento.

Probablemente el método más simple y económico para el control de polvo sea retener el polvo en el grano, sin dejarlo escapar al aire; pero en algunos puntos, como el grano se mueve o se permite caer, el polvo llega a ser aerotransportado. En tales puntos, puede utilizarse un equipo de aspiración para extraer el polvo, mandándolo a un colector de polvo o mediante un sistema de colección por filtración.

Se ha sabido que rociando el grano con aceite de soya, antes de que entre al silo, provoca la reducción de la cantidad de polvo. Con este método, hay que considerar que las propiedades del material cambian (ángulo de reposo y coeficiente de fricción) que resultan de la capa de aceite sobre los granos.

El grano almacenado puede dañarse por bacterias, insectos, hongos, roedores o, simplemente, porque empiece a germinar por la presencia de humedad. Prevenir estos daños en general, involucra usar una apropiada ventilación y control de humedad y temperatura.

La recirculación propia del grano es otra manera de controlar el contenido de humedad. El grano se remueve del fondo del silo y se recircula hacia la parte superior del mismo. Obviamente, el material muerto no puede ocurrir y por lo tanto, permite la completa recirculación. También las tolvas deben estar completamente limpias y sin rugosidades. Las desventajas de la recirculación son que se requiere mayor costo en energía y el uso de más equipo y cada movimiento daña ligeramente el grano. Por lo tanto, la aireación (moviendo aire a través del grano) es un mejor método para controlar la humedad, mediante ventiladores y ductos perforados. Los ventiladores se colocan en la parte superior del silo, en el fondo o en el exterior de las paredes.

La protección del grano contra los insectos y hongos puede hacerse manteniendo la temperatura baja (5° C) y un contenido de humedad del 14 % o menor con respecto al peso seco. Otro factor que afecta el deterioro del grano es la presencia de oxígeno.

Silos con cono invertido

Los silos de concreto con cono invertido se utilizan para el mezclado y almacenamiento de materiales crudos y para almacenar cemento.

IBAU-Hamburg fueron los primeros que manejaron este concepto en la industria del cemento (IBAU-Hamburg, West Germany). IBAU los clasifica como se muestra en la figura 3-19: grupo 1, en el cual el fondo del cono esta empotrado con el fondo del silo; y grupo 2, en el cual el fondo del cono esta elevado. Para el grupo 2 la figura 3-19 muestra los huecos en las paredes para el paso de los vehículos. En el caso de silos de grandes diámetros, el espacio por abajo del cono se utiliza a menudo para el empacado del cemento en sacos o a granel, para todos los cementos almacenados, como se muestra en la figura 3-20.

Los conos del grupo 1 se soportan usualmente sobre la cimentación y son independientes de las paredes de los silos. Los conos del grupo 2 se soportan en todo su perímetro sobre las paredes de los silos. En estos últimos, los conos tienen juntas entre el anillo del cono y las paredes de los silos, para permitir la expansión independiente.

Para silos de grandes diámetros, la viga de anillo del cono puede requerir una gran sección transversal para soportar las cargas. IBAU sugiere que para silos mayores que 18.0 m de diámetro y con fondo elevado, la viga de anillo debe incluir el espesor de las paredes, como se muestra en la figura 3-21(a); sin embargo, este arreglo no permitirá el deslizamiento de la cimbra de las paredes superiores del silo, hasta que esté terminado el cono, mientras que para el caso de la figura 3-21(b), sí se podrá hacer el deslizado de las paredes del silo completo, dejando la construcción del cono para después.

En el caso de un silo concéntrico doble, como se muestra en la figura 3-22, el silo interior más pequeño se soporta sobre las paredes del cono. En este caso, el segundo deslizado de las paredes del silo, incluye al silo interior; obviamente, se realiza hasta que el cono se termina de construir. Los silos concéntricos se utilizan cuando se van a almacenar dos tipos de materiales en una estructura compacta.

3.2 Elementos estructurales

Un silo puede estar formado por elementos de concreto en su estructura completa: cimentación, paredes, techo, fondo y tolva o sus componentes, tales como las tolvas, el soporte de las losas de fondo o del techo pueden ser de acero (ver figura 3-23). En esta sección se describen los elementos estructurales que conforman los silos de concreto.

3.2.1 Paredes

Las paredes de los silos de concreto generalmente son verticales y pueden ser de planta circular o recta. Las paredes de planta circular están sujetas a fuerzas horizontales de tensión, fuerzas de compresión axial y momentos flexionantes horizontales y verticales ocasionados por el material almacenado y otras cargas.

En el caso de los silos de concreto reforzado, se deben distribuir las grietas de tensión de tal manera que los anchos de grieta se encuentren dentro de lo permitido. Para las paredes de los silos de concreto post-tensado se debe dejar un esfuerzo de compresión residual horizontal de 2.8 Kg/cm^2. Cuando se tiene la presión de diseño total y cuando se tienen presentes esfuerzos térmicos, puede requerir un esfuerzo de compresión más alto. Además, los silos deben resistir los momentos flexionantes horizontales y verticales, para distribuir los efectos de las concentraciones locales de presión sobre una área mayor de las paredes del silo.

Los momentos flexionantes verticales pueden causar agrietamientos horizontales. Estos momentos pueden resultar de una presión no uniforme sobre las paredes, de diferencias de temperatura entre el material almacenado y la superficie exterior de las paredes o de cargas concentradas externas. El refuerzo vertical que resiste estos momentos flexionantes también da soporte al acero horizontal y evita los posibles defectos de construcción.

3.2.2 Fondo de silos de concreto

Las formas de los fondos de los silos de concreto pueden ser:

a) Losa horizontal con una o más aberturas de descarga.

b) Tolva de concreto de forma cónica, piramidal, etc.

c) Cono de concreto reforzado invertido, con aberturas de descarga múltiple.

d) Tolva metálica.

Los fondos de los silos se pueden soportar por las paredes de los silos, mediante paredes de soporte separadas, que se extienden hacia la cimentación, mediante pilastras conectadas a las paredes inferiores del silo, mediante columnas independientes o por una combinación de éstas. En algunos casos la cimentación sirve como fondo del silo.

La selección del fondo del silo involucra cuestiones de economía y los métodos de extracción de material que se van a utilizar. Usualmente, esta decisión la toman otras personas diferentes al diseñador.

Los fondos de los silos que descargan sólo por gravedad deben tener superficies interiores lisas y sus paredes inclinadas deben tener una pendiente mayor que el ángulo de reposo del material que va a ser almacenado.

Para los silos con losas horizontales, sin tolvas y fondos sin adecuada pendiente, en la que los materiales no se descargan por gravedad, el material almacenado forma un flujo de embudo cónico por encima de la abertura de descarga. Esta inclinación del cono usualmente excede el ángulo de reposo del material almacenado. Los materiales en la zona muerta, que están a un lado del flujo, deben removerse manualmente o mediante aditamentos especiales o aireación. En la zona muerta, algunos materiales pueden degradarse. El carbón puede encenderse por combustión espontánea.

Los huecos de las tolvas deben diseñarse cuidadosamente, para producir el flujo deseado. Esto depende de factores como el tamaño, la forma de la abertura, la pendiente y la rugosidad de las paredes de la tolva y las propiedades de los materiales almacenados. El diseño de las tolvas se simplifica cuando se utiliza aireación para la descarga de los materiales.

Losas de fondo

Una estructura de fondo de un silo debe diseñarse para las cargas que generan los materiales almacenados, el peso propio, el peso de los equipos, las plataformas, las estructuras que se cuelguen del fondo y ocasionalmente los sismos y los efectos de la temperatura.

Descargas excéntricas. La influencia de la descarga excéntrica sobre la presión vertical es desconocida y la práctica común es ignorar la descarga excéntrica, cuando se calcula la presión en los fondos planos o utilizar un factor de sobrepresión.

Para tolvas rectangulares o cuadradas, generalmente se supone que el incremento de presión máxima ocurre en ambas paredes adyacentes a la abertura excéntrica y en el lado opuesto. Para tolvas cónicas, el incremento de presión ocurre alrededor de todo el perímetro.

Por simplicidad, el radio hidráulico puede suponerse constante, dentro de la profundidad de la tolva, e igual al de la parte superior de la tolva. El máximo valor de la presión excéntrica ($pecc$) puede calcularse usando las dimensiones del silo en la parte superior de la tolva y puede suponerse constante para la profundidad de la tolva o para la parte de material que forma la descarga. Las descargas excéntricas deben considerarse, en cualquier caso, con aberturas múltiples, ya sea que las aberturas estén o no localizadas simétricamente.

Fondos planos

Un fondo plano simple es una losa horizontal, generalmente con espesor uniforme. El fondo plano puede estructurarse con un sistema de vigas y losa. Para asegurar el flujo del material, generalmente se construye alrededor de las aberturas de descarga una tolva mediante un relleno de concreto. Este relleno generalmente se hace con concreto pobre o algún material similar. Éste puede tener un acabado liso del mismo concreto o el recubrimiento de una lámina de acero. Las aberturas concéntricas de la losa no deben exceder más de un tercio del diámetro del silo.

Fondos circulares planos

Los momentos flexionantes radiales y tangenciales, para losas circulares con un hueco concéntrico, pueden calcularse con ecuaciones de teoría de placas y cascarones (Timoshenko, 1984).

Cuando un hueco concéntrico no es mayor que un décimo del diámetro del silo, el hueco se ignora en el cálculo de los momentos flexionantes de la losa. En este caso, acero de refuerzo extra superior e inferior sustituye al que se elimina por la presencia del hueco alrededor del mismo. Las losas de fondo con aberturas múltiples o excéntricas deben ser analizadas utilizando un método de elemento finito.

Fondos rectangulares planos

Los silos rectangulares tienen dimensiones limitadas, debido a que las paredes serían antieconómicas para grandes dimensiones. Entonces, el claro de la losa de fondo es pequeño y generalmente se soportan a lo largo de sus extremos únicamente. Las losas usualmente son de espesor uniforme y pueden soportarse simplemente o en forma continua con las paredes. En grupos de silos se puede extender continuamente una losa común bajo el grupo completo.

Como la losa de fondo está sujeta esencialmente a presión uniforme, los métodos de análisis y diseño, utilizados para losas en dos direcciones, son satisfactorios. Los métodos usuales podrían ser el Método de Diseño Directo o del Marco Equivalente del ACI-318-95 o los métodos 2 y 3 del ACI-318-63.

Un método alternativo sería un análisis de placas elástico, usando las ecuaciones de Timoshenko o el análisis de elemento finito.

Los huecos pequeños, cuyas dimensiones no excedan de un cuarto de la dimensión mayor de la losa, pueden ignorarse cuando se calculan los momentos flexionantes en los ejes x y y; sin embargo, el refuerzo de la losa que sea interrumpido por los huecos debe agregarse a los lados de los huecos y, además, deben colocarse varillas diagonales en cada equina de los huecos.

Si los huecos son mayores que los descritos anteriormente o si los huecos se localizan cerca de las esquinas, no son satisfactorios los métodos sugeridos. En estos casos, debería utilizarse un análisis de elemento finito.

3.2.3 Tolvas cónicas

Las tolvas cónicas de concreto pueden estar unidas rígidamente a las paredes del silo pero, comúnmente están soportadas sobre una viga anular, alrededor de su perímetro superior (ver figura 3-24). El fondo del cono, preferiblemente, no debe restringirse o soportarse. La figura 3-25 muestra las dimensiones que se usan en el cálculo de las presiones verticales y normales, hacia las paredes de una tolva cónica.

La tolva cónica está sujeta a dos fuerzas de tensión de membrana: la fuerza meridional, Fm, que es paralela a la línea de las generatrices del cono y, la fuerza tangencial Ft, que está en el plano del cascarón y es horizontal. La fuerza meridional por unidad de ancho a una profundidad Y se calcula según el equilibrio de las cargas sobre el cono debajo de esta profundidad. Generalmente, se usan las dimensiones de la parte superior de la tolva para calcular la presión de diseño, ignorando la reducción de la sección transversal dentro de la tolva. Las cargas mostradas en la figura 3-25, son las resultantes de las presiones verticales q_{des} (a una profundidad Y) y W es el peso combinado de WL (material en la tolva abajo de la profundidad Y) y de Wg (tolva más equipo soportado por la tolva debajo de la profundidad Y).

El espesor mínimo aceptable para el cono debería determinarse considerando un ancho de grieta aceptable para las paredes de un silo circular. El espesor mínimo requerido no debe ser menor que 125 mm.

Si la tolva se soporta sobre todo el perímetro de las paredes del silo, las vigas de anillo, generalmente se diseñan para la componente horizontal de Fmu únicamente. Si las paredes de la tolva son excéntricas al centroide de la viga de anillo, la viga también recibirá momentos flexionantes uniformes. La viga de anillo colada monolíticamente con la tolva cónica es muy rígida (ver figura 3-24) y este momento se omite usualmente omitido en el diseño de la viga de anillo, con todo su perímetro soportado.

Si se conecta el extremo superior de la tolva con una llave de cortante, alrededor de las paredes del silo, o si es monolítico con las paredes, se debe considerar el refuerzo negativo adecuado en las paredes de la tolva, en la intersección de la tolva y las paredes del silo. Este acero negativo debe extenderse dentro de las paredes del silo, para completar el anclaje por adherencia.

Las vigas de anillo y los extremos superiores de las tolvas cónicas, soportadas en puntos aislados a lo largo de sus bordes, mediante columnas, pilastras o huecos en paredes, pueden diseñarse como una viga de anillo de concreto que soporta la tolva en forma individual. Si se desea, la rigidez y la resistencia que tiene la tolva de concreto, pueden agregarse a la viga considerando en forma aproximada un ancho de las paredes de la tolva para actuar como una parte de la viga de anillo.

3.2.4 Tolvas piramidales

Las tolvas piramidales de concreto se utilizan en silos rectangulares y pueden soportarse de los extremos de las vigas o en las paredes construidas del silo. Los detalles de vigas de extremo son similares a los que se muestran en la figura 3-24 que son aplicables a tolvas cónicas y piramidales.

Una desventaja de las tolvas piramidales es que las paredes están sujetas a tensión biaxial y a flexión en dos direcciones. Además, las paredes de las tolvas pueden tener, también, flexión en su plano, cuando son continuas con las paredes superiores del silo y cuando las paredes del silo tienen grandes huecos inmediatamente debajo de esta conexión.

3.2.5 Columnas de soporte de silos

Las columnas de soporte de silos o fondos de silos tienen grandes relaciones de carga muerta a carga viva. Bajo la carga total para un período largo de tiempo, el concreto de las columnas se relaja por fluencia, transfiriendo gran parte de esta carga al acero vertical. Cuando estas columnas no están cargadas, el acero se expande elásticamente, tendiendo a desarrollar grietas horizontales en el concreto.

Para contrarrestar esta tendencia, Lipnitski y Abramovitsch, sugieren que el área de acero de refuerzo vertical no sea mayor de 0.015 del área gruesa de la columna de concreto (Lipnitski, 1967). El ACI 313 da un límite de 0.02 veces el área gruesa de la columna. Para columnas con momentos flexionanates y cargas axiales es más dificil observar estos límites.

3.2.6 Techos

Los sistemas de techos de los silos se soportan sobre las paredes. La cubierta del silo debe conectarse a las paredes, para prevenir los movimientos laterales. Un segundo tipo de conexión permite movimientos laterales hasta un límite predeterminado y previene movimientos adicionales.

El primer tipo (techo empotrado) previene que las paredes del silo se expandan libremente bajo presión interna. Las fuerzas de restricción en la parte superior de las paredes causan momentos flexionantes verticales y frecuentemente, agrietamiento horizontal de las paredes de concreto.

Una ventaja de los techos empotrados es que rigidizan las paredes y reducen los desplazamientos laterales. Los techos empotrados son útiles cuando se aplican cargas laterales grandes al techo y deben transmitirse a las paredes.

Una ventaja del segundo tipo (techo soportado libremente) es que el techo puede expandirse y contraerse independientemente de las paredes, causado mucho menor fuerza horizontal para transmitirse a la parte superior de las paredes. En grupos de silos es aconsejable dividir el techo en unidades pequeñas, libremente soportadas, de tal manera que el movimiento de cada unidad no afecte a la otra.

Cuando un techo se soporta libremente, la parte superior de las paredes de concreto debe terminarse con una superficie suave. Se debería colocar un material elastomérico o neopreno, en toda el área de contacto.

Cuando se utiliza un techo con posibilidades de deslizarse, es importante proveer medios positivos para prevenir movimientos laterales excesivos. Debe determinarse una cantidad de movimiento tolerable, para permitir que el silo se expanda bajo presión y bajo expansión y contracción, debido a los cambios de temperatura. Además de esto, se deben proveer restricciones para evitar que el techo se deslice bajo cargas cíclicas repetitivas, como en el caso de cargas de transportadores.

La estructura de techo más común, consiste en losas de concreto reforzado sobre vigas de acero, debido a que este sistema puede adaptarse como plataforma de trabajo en la construcción del silo con cimbra deslizable.

Cuando las vigas de acero se incorporan a la plataforma de trabajo de cimbra deslizable, las vigas entran dentro de las caras de las paredes de 25 a 50 mm en cada extremo de la viga. Por lo tanto, deben de proveerse conexiones especiales. Después de la terminación del deslizado, estas conexiones se extienden dentro de los huecos de apoyo de las paredes.

Cuando la losa se ancla mediante llaves de cortante o conectores, la losa proporciona soporte lateral a las paredes. En este caso, la losa está sujeta a tensión y flexión combinadas. Si la tensión es importante ésta debe considerarse en el diseño de la losa.

La cabeza motriz de los transportadores de galerías a menudo se apoya sobre los techos de los silos. Especialmente en la industria del carbón, los transportadores transmiten cargas verticales, paralelas y transversales al transportador y son problemáticas cuando también se involucra la vibración.

En cualquier caso, con o sin vibración, es esencial tener buenas conexiones deslizables, para minimizar la transferencia de cargas horizontales del transportador al techo. No deben utilizarse conexiones empotradas o articuladas. Debe existir buena comunicación y coordinación entre el diseñador estructural del silo y la persona responsable del sistema del transportador.

3.2.7 Cimentación

Se utilizan varios tipos de cimentación para silos: losas de cimentación, zapatas aisladas, zapatas continuas circulares, zapatas combinadas, pilotes o pilas de cimentación.

Cada diseño en particular se basará en el reporte de mecánica de suelos y en las condiciones del suelo del sitio seleccionado. De acuerdo con esta información, el diseñador deberá determinar el tipo de cimentación más apropiado para el proyecto especificado.

Losas de cimentación. Las losas de cimentación se utilizan comúnmente en silos individuales o grupos de silos. Este tipo de cimentación minimiza los efectos dañinos de asentamientos diferenciales y ayuda a reducir los problemas de valores bajos de capacidad de carga del suelo. Las losas de cimentación son apropiadas cuando se requieren muescas para túneles de descarga, rieles y básculas. (Ver figura 3-26.)

Una losa de cimentación de espesor uniforme generalmente es la más económica; sin embargo, en algunos casos se utilizan vigas continuas o pedestales sobre la losa, cuando existe un sistema de columnas como se muestra en la figura 3-27.

Una suposición común en el diseño de losas de cimentación es considerar las paredes monolíticas con la losa; de esta manera las presiones en el suelo debidas a las cargas de la estructura serían uniformemente distribuidas; pero realmente las presiones pueden ser diferentes, dependiendo de la distribución de las cargas de la estructura superior, del comportamiento y las condiciones del suelo de soporte y su interacción con la estructura, el suelo y la losa de cimentación.

En el caso de silos de concreto reforzado, en los cuales se integra la losa de cimentación y el techo en forma monolítica con las paredes, para minimizar los efectos de expansión térmica, algunos códigos recomiendan usar una longitud máxima de 55 m y una relación longitud a ancho de 3.0.

Si existe suficiente información disponible para obtener el módulo de reacción del suelo, se puede hacer un análisis de elemento finito, para tomar en cuenta la interacción del suelo y la estructura.

Zapatas continuas. Una zapata continua se utiliza comúnmente cuando la capacidad del suelo es alta; por ejemplo, cuando la estructura se coloca sobre un estrato de roca o si se soporta sobre pilas.

Una cimentación continua sería en forma de anillo o tipo dona, bajo las paredes del silo circular o bajo un grupo de columnas colocadas circularmente. La cimentación debe colocarse de tal manera que los momentos en el interior y el exterior del cantiliver sean iguales, para no provocar a las paredes del silo momentos flexionantes.

3.3 Cargas en silos

Las principales cargas para el diseño de silos provienen de la acción de los materiales almacenados; también, se consideraran las cargas y fuerzas de otras fuentes, incluyendo cargas muertas, cargas de equipo; viento; cargas vivas de piso y techo; cargas sísmicas; fuerzas térmicas y fuerzas aplicadas por la restricción de los elementos conectados.

3.3.1 Cargas muertas

Las cargas muertas incluyen el peso propio del silo (paredes, techo, vigas de anillo, tolva) más otros elementos que se soportan sobre el silo. Estos elementos pueden ser escaleras exteriores o interiores y plataformas de servicio, equipo sobre el techo del silo (como colectores de polvo y transportadores), edificios soportados en el techo, galerías, etc.

La mayoría de estas cargas muertas puede ser estimadas en las primeras etapas de diseño del silo. Si la estimación de cargas no es suficientemente precisa, ésta podría corregirse después, en el desarrollo del diseño.

Las cargas muertas de los fondos de los silos que se soportan independientemente (es decir, que no se soportan en las paredes de los silos) deben separarse de las cargas que afectan directamente las paredes de los silos.

3.3.2 Cargas vivas

Las presiones debidas a los materiales almacenados, de acuerdo con los métodos de resistencia, se consideran como cargas vivas y se describen más adelante. En algunas ocasiones, en que los materiales almacenados se apilan contra el exterior de las paredes del silo, también se consideran como carga viva.

Las cargas vivas de plataformas, techos y pisos deben considerarse según los códigos correspondientes para el diseño de edificios o estructuras. En algunos casos, algunos materiales se acumulan con el tiempo sobre los techos y pisos (por ejemplo el polvo de cemento) y pueden causar cargas vivas significativas, mayores que las que especifican los códigos.

Para determinar las cargas en las paredes de los silos provenientes de los materiales almacenados, el diseñador debe considerar las condiciones de flujo que van a prevalecer. Cualquier método apropiado se puede utilizar para determinar las presiones de diseño. Más adelante, se presentan algunos métodos para calcular las presiones estáticas laterales y verticales, incluyendo los factores de sobrepresión correspondientes, los efectos de descarga excéntrica, los tipos de canales de flujo y algunas otras condiciones y las presiones de diseño en los fondos de los silos.

3.3.3 Cargas de viento

La estructura de soporte del silo debe diseñarse para soportar los efectos de volteo causado por las fuerzas de viento o sismo. Estas cargas deben aplicarse de acuerdo con el código que rige en cada región.

Como en el caso de los edificios, las cargas de viento para silos pueden actuar en cualquier dirección, considerando una presión positiva en el lado que actúa el viento y sumando simultáneamente la presión negativa en el lado de sotavento. Para la distribución de presiones es importante considerar las estructuras adyacentes.

El viento puede afectar la estabilidad de los silos vacíos, los silos angostos o los grupos de silos, particularmente los silos de acero, madera o de fibra de vidrio. Las presiones de la cimentación y los esfuerzos en las columnas pueden ser más críticas si el silo está lleno. Si es posible considerar factores de reducción de acuerdo con el código correspondiente, podrían manejarse los siguientes valores que dependen de la forma de la sección transversal:

Silos individuales de sección hexagonal u octagonal	0.8
Silos individuales de sección circular	0.6
Grupos de silos (no se permite reducción)	1.0

3.3.4 Cargas de equipos

Además de la carga muerta, los equipos pueden aplicar cargas vivas importantes sobre la estructura del silo. Teóricamente, los fabricantes de los equipos deben proporcionar datos sobre las cargas de sus propios equipos; pero si los equipos producen vibración, pueden generar cambios en otras cargas. Por ejemplo, el material almacenado puede llegar a compactarse, adquiriendo una densidad más alta y la alteración de las características de flujo con el resultado de presiones laterales y verticales modificadas.

La vibración de los equipos puede afectar el silo entero. Las paredes, inclusive las de concreto, pueden vibrar en forma de óvalo, debido al equipo vibratorio sobre el techo del silo. Si el equipo por utilizar es vibratorio, es aconsejable considerarlo en el diseño; pero, si fuera posible, debería evitarse tal equipo.

Los transportadores de banda y sus soportes estructurales pueden incluir grandes cargas muertas y vivas a la estructura del silo. A menudo, los extremos de los transportadores se apoyan sobre el techo del silo. Esta estructura transmitirá cargas laterales de viento así como también cargas muertas y vivas.

Uno de los efectos más severos del transportador podría ser su expansión y contracción térmica, transmitiendo grandes fuerzas horizontales sobre la parte superior del silo, si es que no se incluyen juntas de expansión y contracción adecuadas. Se recomienda que los apoyos sean de tipo móvil sobre el silo. No deberían usarse apoyos articulados o fijos.

La tensión de la banda del transportador generalmente es soportada por la estructura del silo. Es recomendable incrementar la tensión de la banda en un 25 % del valor especificado, para tomar en cuenta el choque que puede ocurrir durante el arranque, cuando la banda está completamente cargada, a menos que el valor especificado considere esta condición.

3.3.5 Efectos térmicos

Dos tipos de efectos térmicos necesitan considerarse: (a) el gradiente de temperatura, muy importante en silos de concreto, causado por los materiales almacenados (tales como el cemento, clinker de cemento o ceniza volante, etc.), que son mucho más calientes que la temperatura del aire alrededor del silo, (b) los cambios de temperatura que ocurren diariamente debido a la exposición de los rayos solares que puede causar expansión y contracción. Los esfuerzos debido a estas acciones pueden ser suficientemente grandes para causar agrietamiento en las paredes de concreto. Los efectos de los cambios de temperatura en las temporadas de invierno y verano pueden tener un efecto similar, por lo que los esfuerzos térmicos debido a estos efectos, deben considerarse en el diseño de las paredes de los silos.

Los silos de acero pueden fallar por la expansión y contracción térmica diaria mientras que el material interior llega a ser más denso con cada movimiento del día.

También, los techos de concreto pueden afectarse por los cambios de temperatura y gradiente. Si los movimientos del techo no se controlan por los cambios de temperatura, el techo puede moverse de su posición original y causar serios daños.

El análisis de los esfuerzos térmicos, debido a la continuidad de las paredes, es complicado, aunque se puede hacer mediante métodos de elemento finito. Debido a la complejidad del análisis, algunos diseñadores no los consideran.

Un efecto térmico ignorado frecuentemente es la contracción y expansión de las paredes de los silos, en respuesta a la variación de la temperatura de las aberturas de salida y el calentamiento debido a la exposición del sol. A medida que las paredes se expanden, el área de la sección transversal se incrementa, permitiendo al material almacenado, moverse para llenar el espacio formado. Cuando las paredes se contraen, su movimiento hacia adentro se resiste por la presión pasiva del material almacenado. Las fuerzas agregadas por esta presión pueden ser muy grandes y agregar fuerzas de tensión circunferenciales significativas. Si el silo está conectado con otros elementos, los efectos térmicos también causarán momentos flexionantes cerca de los puntos de continuidad.

3.3.6 Cargas de restricciones externas

Un silo puede considerarse como una membrana flexible; por lo que las paredes de un silo circular, bajo una presión interior uniforme alrededor de la circunferencia, se expanden radialmente. Estas paredes tienen esfuerzos de tensión de membrana, pero no momentos flexionantes horizontales y, verticalmente, tendrán compresiones que generen un pequeño momento flexionante vertical; sin embargo, si cualquier punto de las paredes se fija o se tiene algo que resista su movimiento radial, ocurrirán pandeos locales o momentos horizontales y verticales importantes. Estos momentos flexionantes, donde los efectos se agregan a la tensión circunferencial y a la compresión vertical, podrían causar la falla de las paredes.

Cualquier elemento conectado a las paredes genera un problema importante. Puede ser una plataforma conectada a dos silos separados o un miembro estructural o un ducto rígido conectados a cada uno.

A menudo el diseñador del silo llega a conocer los elementos de conexión después de que el diseño principal del silo se ha terminado. En esa etapa puede ser inconveniente hacer las provisiones propias para el diseño. Una buena medida protectora con silos de concreto sería usar dos lechos de refuerzo uno cerca de cada cara.

3.3.7 Cargas sísmicas

Las cargas sísmicas pueden afectar la estabilidad y la resistencia de los silos. Las paredes y columnas pueden ser vulnerables a las fuerzas sísmicas y también la cimentación si es profunda.

Se utilizará el código correspondiente en cada región en particular, tomando en cuenta las siguientes consideraciones que involucran las recomendaciones del ACI 313:

a) Las fuerzas sísmicas pueden actuar en cualquier dirección horizontal. Las fuerzas sísmicas verticales se omiten, para la mayoría de los aspectos de diseño sísmico.

b) Únicamente una fracción del material almacenado necesita considerarse cuando se calculan las fuerzas sísmicas. Por simplicidad, la fuerza sísmica sobre esta fracción se trata como la fuerza estática lateral, aplicada al centroide de la masa completa almacenada y actuando en cualquier dirección horizontal. Algunos diseñadores usan el 80 % del peso del material almacenado como peso efectivo, W_{eff}, para calcular la fuerza lateral en la base (Safarian, 1985).

c) El peso del material almacenado en tolvas suspendidas no debe reducirse a un valor de peso efectivo.

d) Cuando el fondo de los silos está soportado con elementos independientes de las paredes del silo, las fuerzas sísmicas laterales se dividen de acuerdo con su peso efectivo, W_{eff}. Es difícil, pero no imposible, predecir la distribución real de las fuerzas entre las paredes del silo y el fondo de la estructura.

En el cálculo de la estabilidad contra volteo se debe usar el peso total; sin embargo, si el silo tiene un fondo soportado independientemente, el peso del material debe ser el correspondiente al que se localiza entre las paredes del silo y el fondo.

Otras consideraciones de carga. Es posible que durante un sismo la vibración lateral de la estructura y el material almacenado pueda reducir o eliminar momentáneamente la fricción vertical del material almacenado desarrollada en las paredes, por lo que se sugiere que el fondo de los silos se diseñe para cargar el peso total efectivo (W_{eff}) del material almacenado en zonas sísmicas de alta sismisidad (ejemplo zona D en México) y en proporción a la carga de fondo vertical para otras zonas sísmicas mediante la interpolación lineal (por zona) suponiendo que la carga del fondo para la zona asísmica (ejemplo zona A en México) es la debida a la presión de diseño q_{des}. Con este criterio, sí la carga que se obtiene sobre la losa de fondo, multiplicada por el factor de reducción de carga accidental de 0.75, es mayor que q_{des}, entonces, la carga con sismo rige el diseño de esta losa.

Si la carga de techo de un silo es pequeña comparada con las paredes del silo y las cargas del material almacenado, las cargas del techo se pueden agregar a las cargas de las paredes suponiendo que están aplicadas en el centro de la altura de las paredes del silo; sin embargo, cuando las cargas del techo son demasiado pesadas o cuando la altura del silo se divide verticalmente en pisos, las fuerzas laterales deben distribuirse verticalmente, según lo especifique el código correspondiente. También los momentos horizontales locales que ocurren en las paredes deben considerarse para el diseño de las paredes.

3.4 Presiones ocasionadas por los materiales almacenados

Originalmente, no se reconocían la importancia de la fricción vertical entre el material almacenado y las paredes de los silos; se suponía que las presiones laterales variaban hidrostáticamente. Esta suposición a menudo daba resultados demasiado conservadores. Posteriormente, los métodos analíticos fueron desarrollados de tal manera que consideraran la fricción de las paredes de los silos, con los cuales se puede calcular: (a) la presión del material almacenado en contra de las paredes verticales, de las superficies inclinadas y de los fondos planos; (b) las fuerzas de fricción y de compresión de las paredes; y (c) las presiones verticales a varias profundidades en el propio material almacenado.

Algunos de estos métodos dan presiones estáticas (presiones cuando el material esta en reposo) únicamente. Durante el llenado o vaciado de un silo, las presiones pueden ser más grandes que la estática. Además, las presiones pueden diferir si no existe simetría, como en el caso en que las aberturas de descarga se localizan excéntricamente. Los diseñadores estructurales necesitan conocer la presión total final o la presión de diseño. Esta presión de diseño se puede estimar mediante la modificación de la presión estática calculada para tomar en cuenta los movimientos del material, las descargas excéntricas y otras condiciones que afectan las presiones, o mediante el uso de métodos analíticos que pretenden dar las presiones de diseño directamente.

3.4.1 Materiales almacenados

Las propiedades fisicas de los materiales almacenados en silos influyen sobre el flujo de extracción y las fuerzas que los materiales aplican al fondo y a las paredes del silo. Obviamente, las propiedades variaran para cada material en particular, pero también, pueden variar para un mismo material supuestamente uniforme. Esta variación de las propiedades fisicas, puede deberse a la edad del material, al grado de compactación y a cambios del medio ambiente.

Para el cálculo de las presiones, las propiedades más importantes de los materiales son el peso unitario (γ), el ángulo de fricción interna (ρ, aproximadamente el mismo que el ángulo de reposo) y el coeficiente de fricción (μ') entre el material almacenado y las paredes del silo.

Otras propiedades que pueden influir en el flujo de extracción y las presiones son el tamaño de las partículas y su graduación, lo cual afecta el contenido de humedad, la resistencia fisica que afecta el grado de compactación, la cohesión y las características de expansión y contracción.

El peso unitario, γ, puede variar con la profundidad abajo de la superficie del material almacenado; el material inferior estará más compactado que el superior y también puede variar con el tiempo de almacenaje y el método de llenado.

En cualquier momento, el peso unitario puede llegar a variar y, por lo tanto, es prudente obtener las propiedades de los materiales con pruebas de laboratorio, cubriendo un amplio espectro de materiales. Los resultados de las pruebas deben incluir los datos de γ, ρ y μ' y puede también considerarse la variación de estas propiedades con presión aplicada a estos materiales.

El coeficiente de fricción, μ', entre el material almacenado y las paredes del silo puede variar también con la edad del silo. Si las paredes son metálicas o de concreto, la superficie probablemente llegue a ser más lisa con la edad, generada por la abrasión, debido al deslizamiento del material sobre las paredes. Los materiales polvorosos, como el cemento, pueden adherirse a la superficie de las paredes causando que el coeficiente de fricción (μ') se aproxime al coeficiente de fricción interna (tan ρ). Los materiales que contienen aceites o ceras (por ejemplo las semillas de soya) pueden lubricar las paredes reduciendo el coeficiente de fricción, μ', e incrementando la presión lateral sobre las paredes. La tabla A-1 del apéndice A da valores aproximados de peso unitario, ángulo de fricción interna y coeficientes de fricción del acero y del concreto para varios materiales de acuerdo con el ACI-313. Esta tabla da valores típicos que fueron obtenidos mediante pruebas, pero no es posible dar valores precisos o intervalos de valores para cualquier tipo de material, por lo que debe tomarse con reservas el uso de esta tabla.

En lo más posible, las propiedades de los materiales γ, ρ y μ', deben determinarse mediante pruebas de laboratorio, cubriendo la totalidad de los materiales que van a ser almacenados. Desafortunadamente, en algunos casos, los productos terminados no existirán hasta que el silo y el resto de la planta hayan sido construidos, por lo que las propiedades de estos materiales no podrán conocerse exactamente. En estos casos, el uso de tablas con datos aproximados debe hacerse con mucha precaución y con la experiencia del propietario de la planta para determinar las propiedades para el diseño del silo.

Algunos materiales almacenados son calientes, como el caso del cemento, el clinker de cemento, la ceniza volante, etc. Los grandes volúmenes de material caliente almacenado pueden causar esfuerzos térmicos de importancia sobre el fondo, el techo y las paredes de la estructura del silo. Es muy importante conocer las temperaturas a las que van a estar sujetos los materiales almacenados. Por otro lado, no se aceptaría como normal que los materiales fríos pudieran causar tantos problemas como los materiales calientes.

3.4.2 Métodos para calcular la presión estática

Estos métodos están basados en el equilibrio del material almacenado en una condición estática. No se considera la interacción elástica con la estructura del silo, ni tampoco la energía de deformación del material almacenado ni de la estructura. Estos métodos analíticos están correlacionados con pruebas de medición que concuerdan en varios aspectos. Se presentan tres métodos para la evaluación de las presiones estáticas.

Método de Janssen

El inicio en el cálculo de presiones de materiales almacenados tuvo lugar en 1895, cuando H. A. Janssen desarrolló las ecuaciones para calcular las presiones laterales y verticales de materiales granulares en silos profundos.

El método de Janssen está basado en el equilibrio de una capa horizontal de material almacenado, como se muestra en la figura 3-28.

Igualando las fuerzas verticales a cero, nos da:

$$qA + \gamma A dy = A\left[q + dy\frac{dq}{dy}\right] + \mu' p(Udy)$$

Sustituyendo kq por p y el radio hidráulico R por AY, la ecuación diferencial de equilibrio llega a ser:

$$\frac{dq}{dy} = \gamma - \frac{\mu' k}{R} q$$

La solución a esta ecuación diferencial es la fórmula de Janssen para la presión vertical a una profundidad Y:

$$q = \frac{\gamma R}{\mu' k}\left[1 - e^{-\mu' k Y / R}\right] \qquad (3\text{-}1)$$

Posteriormente se mejoró el Método de Janssen incluyendo el término

$$k = \frac{(1 - \operatorname{sen}\rho)}{(1 + \operatorname{sen}\rho)} \text{ o simplemente } k = tan^2(45° - \rho/2)$$

el cual es el coeficiente de Rankine para presión activa de empuje del suelo

La presión horizontal p se obtienen multiplicando por k:

$$p = \frac{\gamma R}{\mu'}\left[1 - e^{-\mu' k Y / R}\right] \qquad (3\text{-}2)$$

La fuerza de fricción de las paredes es $\mu' p$ por unidad de área de pared a una profundidad Y. Las fuerzas de fricción vertical causan fuerzas verticales en las paredes: compresión, si las paredes están soportadas desde abajo, tensión, si están soportadas desde arriba. Integrando desde la parte superior del material almacenado a una profundidad Y, la fuerza vertical en las paredes (por unidad de perímetro de pared) a una profundidad Y es:

$$V_y = \mu' \int p dy = \gamma R\left[Y - \frac{R}{\mu' k}\left(1 - e^{-\mu' k Y / R}\right)\right] \qquad (3\text{-}3)$$

Esta derivación no considera como es la forma de la sección transversal del silo. Si la sección transversal es circular, el radio hidráulico es:

$$R = \text{área/perímetro} = \left(\pi D^2\ 4\right)/(\pi D) = D/4$$

en la cual D es diámetro interior.

Para un silo cuadrado, de lado a, R = área/perímetro $= a/4$. Para silos de polígono regular, una aproximación ligeramente conservadora es $R = De/4$, donde De es el diámetro de un círculo que tiene una área igual a la del polígono.

Un silo rectangular con longitudes a y b tendrán diferentes presiones sobre el lado largo y el corto. Un procedimiento común es dejar $R = a/4$ cuando se calculan las presiones en el lado corto a, y para el lado largo se supone $R = a'/4$, donde:

$$a' = \frac{2ab}{a+b} \tag{3-4}$$

Un valor alternativo sugerido por Reimbert es usar:

$$a' = \frac{2ab - a^2}{b} \tag{3-5}$$

El diseñador de las paredes del silo necesita saber la fuerza vertical total aplicada a las paredes proveniente de la fricción del material almacenado. Esta fuerza, del material superior a cualquier profundidad Y, es igual al peso de este material menos la fuerza hacia arriba de la presión vertical q. Por lo tanto, la fuerza de fricción por unidad de longitud de pared es:

$$V = R(\gamma Y - q) \tag{3-6}$$

Método de Reimbert

En 1953 y 1954, Marcel y André Reimbert presentaron su método para calcular la presión estática debido al material almacenado (Reimbert, 1976). Su derivación reconoce que a una mayor profundidad Y, la curva de la presión lateral llega a ser asintótica con el eje vertical. A esta profundidad, la presión lateral alcanza un máximo, mostrado como $pmax$ en la figura 3-29(a). Una lámina de material a esta profundidad, se muestra en la figura 3-29(b), donde se observa que la presión es igual arriba y abajo. Consecuentemente, el peso de la lámina esta exactamente balanceado por la fricción de las paredes, o:

$$\gamma A dy = \mu'\, pmax U dy$$

Así:

$$pmax = \gamma\, R/\mu' \tag{3-7}$$

en la cual R es el radio hidráulico, A/U. La presión vertical en esta localización es:

$$qmax = pmax/k = \gamma R/\mu'\, k \tag{3-8}$$

Considerando un cono de material en la parte superior del silo, el peso del material total arriba de la profundidad Y es $\gamma AY + \gamma Ah$.

La curva I de la figura 3-30, muestra la gráfica del peso total. Sin la fricción de las paredes, el peso sería exactamente la resultante de la presión vertical en la parte superior de la profundidad Y; sin embargo, las fuerzas de fricción de las paredes, reducen la resultante y la presión vertical. La curva III, muestra las fuerzas de fricción total sobre las paredes arriba de la profundidad Y. La curva II, muestra la fuerza vertical total sobre la superficie y es igual al peso total (curva I) menos la fuerza de fricción (curva III).

M. y A. Reimbert mostraron experimentalmente que la forma de la curva III puede expresarse muy aproximadamente a la siguiente ecuación:

$$z = \frac{a_1 Y^2 + a_2 + a_3}{b_1 Y + b_2} \tag{3-9}$$

Usando cinco condiciones de frontera para las curvas de la figura 3-30, pueden evaluarse las cinco constantes. De esto, resultó la ecuación final de Reimbert. Hay que notar que, mientras las ecuaciones de Janssen fueron derivadas únicamente de la teoría, las ecuaciones de Reimbert dependen de la forma de una curva sugerida mediante datos experimentales.

Las ecuaciones de Reimbert para la presión estática son las siguientes:

La presión vertical a una profundidad Y abajo del material almacenado es:

$$q = \left[Y\left(\frac{Y}{C} + 1\right)^{-1} + \frac{h}{3} \right] \tag{3-10}$$

La presión estática lateral a una profundidad Y:

$$p = pmax\left[1 - \left(\frac{Y}{C} + 1\right)^{-2} \right] \tag{3-11}$$

Para silos circulares el término p_{max} y C en las ecuaciones de arriba son:

$$p_{max} = \gamma D/(4\mu') \tag{3-12}$$

$$C = \frac{D}{4\mu' k} - \frac{h}{3} \tag{3-13}$$

Para silos poligonales de más de cuatro lados:

$$p_{max} = \gamma R/\mu' \tag{3-14}$$

$$C = \frac{L}{4\pi\mu' k} - \frac{h}{3} \tag{3-15}$$

Para silos rectangulares en la pared corta de ancho a:

$$p_{max} = \gamma a/4\mu' \tag{3-16}$$

$$C = \frac{a}{\pi\mu' k} - \frac{h}{3} \tag{3-17}$$

Para silos rectangulares en la pared larga de ancho b:

$$p_{max} = \gamma a'/4\mu' \tag{3-18}$$

$$C = \frac{a'}{\pi\mu' k} - \frac{h}{3} \tag{3-19}$$

en la cual a' es $(2ab - a^2)/b$. En las ecuaciones de arriba, R y k se definen igual que en el método de Janssen. También, la fuerza de fricción se determina de la misma manera que el método de Janssen, usando la ecuación 3-6.

Presión normal en superficies inclinadas

La presión sobre superficies inclinadas, como en el caso de las paredes de las tolvas, se calcula usualmente como:

$$q\alpha = p\,\mathrm{sen}^2\alpha + q\cos^2\alpha \tag{3-20}$$

Esta ecuación puede ser derivada del equilibrio de un elemento triangular de material como se muestra en la figura 3-31.

3.4.3 Patrones de flujo

La causa de las presiones no uniformes en las paredes de los silos se debe al flujo no simétrico del material. Durante la descarga, el material localizado directamente arriba de la abertura de descarga forma un canal de flujo. Si la abertura de descarga esta cerca o en las paredes del silo, se forma un canal de flujo a lo largo de las paredes del silo, en este caso, una porción de las paredes actúa como una frontera del canal de flujo. A menudo, para silos de descargas múltiples, los canales de flujo adyacentes se intersecan formando un amplio canal de flujo.

La figura 3-32 muestra varios patrones de canales de flujo. Dependiendo de las propiedades cohesivas de los materiales almacenados en los silos de flujo de embudo, pueden formarse canales de flujo reducido estables a menos que el diámetro del canal de flujo sea suficientemente grande para hacer que las paredes de tales canales reducidos sean inestables.

El tamaño de los canales de flujo esta en función de las propiedades de cohesión de los materiales almacenados, de la humedad, del contenido de finos, principalmente. La limpieza o descarga incompleta debido a la pendiente de la tolva inadecuada y a problemas de congelamiento en algunas áreas de invierno severo, también causan condiciones de cargado no simétrico sobre el fondo y las paredes de los silos.

El flujo de los materiales almacenados en los silos tiene dos principales patrones: flujo de embudo y flujo de masa. En el flujo de masa todos los materiales están en movimiento durante la descarga y en el flujo de embudo, los movimientos ocurren únicamente en un canal dentro del material almacenado y este canal esta rodeado por material que no esta fluyendo. Los dos tipos de canales de flujo están mostrados en la figura 3-33.

Debido a que las cargas y esfuerzos están relacionado con el patrón de flujo, el diseñador de silos debe considerar el efecto del patrón de flujo del material.

Silos con flujo de masa

En los silos con flujo de masa las tolvas de descarga tienen la pendiente pronunciada de tal manera que causa el flujo de todos los sólidos sin dejar zonas de materiales estancados. Este tipo de silos es recomendado para materiales cohesivos (carbón, por ejemplo), materiales que se degradan como los materiales polvorosos (a menos que se descarguen mediante aireación) y materiales en los cuales se requiera que la segregación sea minimizada. La figura 3-34(a) muestra las formas típicas de flujo de masa.

El flujo de masa ocurrirá si se presentan las siguientes tres condiciones:

a) La salida del material debe ser suficientemente amplia para que fluya sin formarse un arco de material.

b) El controlador de flujo debe permitir el flujo del material a través de toda el área abierta.

c) Las paredes de la tolva de salida deben ser lisas y tener la pendiente suficiente para permitir el deslizamiento del material, de tal manera que el canal de flujo llegue hasta las paredes verticales del silo.

Ventajas de los silos con flujo de masa:

a) El flujo del material es uniforme y la densidad de alimentación es prácticamente independiente de la profundidad del material del silo. Esto a menudo permite usar alimentadores volumétricos para el control del nivel de alimentación.

b) Los indicadores de bajo nivel trabajan realmente.

c) La segregación por corte de la descarga se minimiza. Mientras que el material puede segregarse dentro del silo, la secuencia de flujo de arranque y de paro causa la misma distribución del tamaño de partículas tanto en la carga como en el llenado. Esta secuencia de flujo también asegura el tiempo uniforme en almacenamiento y desaireación del polvo fino. Por lo tanto, con los cierres del aire puede preverse que los niveles de flujos de entrada y salida no se excedan.

Los bordes de las paredes, usualmente no se permiten en tolvas con flujo de masa, ni las salientes dentro de las mismas. Las aberturas de descarga pueden ser totalmente efectivas; es decir, si la tolva esta equipada con un botón de encendido, la puerta de salida deberá estar completamente abierta. Si la tolva esta equipada con alimentadores, éstos deben estar descargando simultáneamente el material a través de área de salida total.

Silos con flujo de embudo

El flujo de embudo ocurre cuando la pendiente de las paredes de la tolva no está suficientemente pronunciada y suave para forzar al material a deslizarse a lo largo de las paredes, o cuando la salida de un silo de flujo de masa no es totalmente efectiva. En un silo de flujo de embudo, el flujo de los sólidos es hacia la salida a través de un canal que se forma dentro del material estancado. Usualmente, los silos con flujo de embudo son apropiados únicamente para materiales gruesos, ligeramente cohesivos y sólidos no degradables en los cuales la segregación no es importante.

Los silos con flujo de embudo se muestran en las figuras 3-34(b) y 3-35. Sin un flujo libre de sólidos, el canal de flujo se expande hacia la salida a un diámetro que se aproxima a la dimensión mayor de la salida efectiva. Cuando la salida es totalmente efectiva, esta dimensión es igual al diámetro de la salida si es circular, o la diagonal si la salida es cuadrada o rectangular. En un nivel superior, dentro de la masa, el canal de flujo permanecerá vertical, formando un cilindro, si su diámetro es menor que el diámetro del canal de flujo reducido crítico. Con un flujo libre de sólidos, el canal de flujo se expande a un ángulo que depende del ángulo efectivo de fricción del material. El canal de flujo resultante es generalmente circular, con un diámetro que excede el diámetro de la salida o la dimensión diagonal.

Cuando la cantidad de descarga del silo es mayor que la de llenado, el nivel de material dentro del canal de flujo baja, causando capas que se desprenden de la parte superior del material estancado y caen dentro del canal. Este comportamiento intermitente afecta a los suelos cohesivos, debido a que el material se compacta a sí mismo con el impacto de su caída y con esto se incrementa la posible formación de un arco de material. Con suficiente cohesión, el desprendimiento del material puede eliminarse, permitiendo que el canal se vacié formando un canal de flujo reducido estable. El material cargado dentro de este canal reducido vacío puede exceder el alimentador.

Cuando un material polvoroso es aireado se carga directamente en un canal de flujo de embudo en un rango suficientemente alto y se descarga al mismo tiempo, éste no tiene oportunidad de asentarse. Por lo tanto, permanece aireado en el canal y fluye hacia la salida del silo. A menudo se utiliza una válvula rotatoria, en estas condiciones para contener el material, pero aún así, el flujo uniforme no puede asegurarse, debido a que el flujo en el interior de la válvula es errático.

La figura 3-36 muestra las cartas de Jenike que pueden utilizarse para predecir cuándo ocurrirá un flujo de embudo o un flujo de masa. La región marcada como "incierta" indica las condiciones en las cuales el tipo de flujo puede cambiar abruptamente. Preferiblemente, estas condiciones deberían evitarse, cuando puediesen conducir a un patrón de flujo no simétrico, vibración frecuente y cargas de choque, las cuales puedan dañar seriamente el silo.

Silos con flujo expandido

Además de los dos patrones principales de flujo, existe un patrón intermedio llamado "flujo expandido". El flujo expandido es una combinación de flujo de masa y flujo de embudo. Las figuras 3-34(c) y 3-37 muestra silos con flujo expandido. La parte inferior de la tolva opera en flujo de masa y la superior como flujo de embudo. Para prevenir un canal de flujo reducido en la parte superior, el canal de flujo debe expandirse a una diagonal o a un diámetro igual o mayor que el diámetro del canal reducido, determinado por el material que va ser almacenado, en la porción con flujo de embudo de la tolva con flujo de masa.

Los silos con flujo expandido son usualmente recomendados para almacenamiento de grandes cantidades de materiales no degradables. Generalmente, el diseño de una tolva con flujo expandido se utiliza para modificar una tolva con un flujo de embudo existente, corrigiendo los problemas de flujo, tales como arco, canales de flujo reducido y grandes flujos.

Este concepto también puede ser usado con salidas múltiples, donde el flujo simultáneo de las tolvas con flujo de masa se colocan muy juntas para causar un canal de flujo combinado de un tamaño mayor que el diámetro del canal de flujo reducido crítico.

Flujo excéntrico y efectos de cohesión

El problema de diseño estructural es más fácil si el silo es axisimétrico y tanto la carga y la descarga están centradas; sin embargo, los arreglos de proceso, los detalles del sitio, etc., con frecuencia no necesariamente tienen arreglos axisimétricos. Los silos, a menudo, tienen salidas excéntricas o múltiples aberturas de tal manera que ocurrirá un flujo no simétrico cuando todas las salidas no estén trabajando simultáneamente.

Estos silos no simétricos con múltiples salidas o salidas laterales, incluyendo llenados excéntricos, crean un patrón de canal flujo que puede causar problemas estructurales severos, generados por cargas no simétricas en las paredes. Si estas condiciones de carga no son evaluadas y consideradas apropiadamente por el diseñador, pueden desarrollarse problemas estructurales serios.

También debe reconocerse que los silos simétricos y con descargas concéntricas no están libres de problemas de flujo. Estos silos pueden causar canales de flujo excéntrico o patrones de descarga excéntrica. Esto puede ocurrir si un alimentador fue impropiamente diseñado o seleccionado o cuando en operación las salidas se dejaron parcialmente abiertas. Estos patrones de descarga excéntrica pueden ocurrir por algún material estancado y caída del material no simétrica, etc. Estos problemas deben ser previstos por el diseñador.

Hay frecuentes reportes de estructuras en peligro o fallas de silos con flujo de embudo que contienen materiales cohesivos como el carbón. En la mayoría de los casos se ha concluido que tales fallas han ocurrido debido a que el comportamiento de los materiales almacenados durante la descarga no fue considerado propiamente en el diseño. Por esta razón es necesario poner una gran atención en los patrones de flujo.

Los medios confiables para asegurar el flujo en los materiales cohesivos se considera que son los silos con flujo de masa o al menos con flujo expandido; sin embargo, desgraciadamente los costos y los requerimientos de geometría, a menudo impiden esta selección.

3.4.4 Irregularidades del flujo

Ciertas combinaciones de las propiedades de los materiales y la geometría del silo o la tolva pueden afectar el flujo, generándose la formación de arco, pulsaciones o choques. Jenike ha estudiado su origen y las formas para reducir o eliminar sus efectos dañinos (Jenike, 1977). A continuación se mencionan las diferentes irregularidades de flujo que se pueden presentar en los silos.

Pulsación

Las pulsaciones ocurren cuando la pendiente de las paredes de las tolvas cae en los límites de la región entre flujo de masa y flujo de embudo, como se muestra en la figura 3-38. Las pulsaciones resultan de la formación repetitiva y el colapso de una obstrucción para el flujo. La frecuencia de pulsación, la cual esta usualmente entre 0.2 y 10 Hz, es directamente proporcional a la velocidad del flujo de salida, mientras que la amplitud tiende a ser más alta para una velocidad del flujo baja que para una alta.

Se presentan las pulsaciones cuando existe una altura considerable de material almacenado arriba de la localización del origen de la pulsación; y cuando la altura es pequeña las pulsaciones desaparecen. El flujo de salida de un silo durante las pulsaciones es uniforme. Esto significa que el flujo del material debajo de la localización del origen de la pulsación es continuo, mientras que arriba esto es como el deslizamiento de una cuña. Cada deslizamiento causa una pulsación.

Las pulsaciones molestas ocurren únicamente con los materiales que contienen al menos una fracción de partículas gruesas, es decir partículas de más de 5 mm. Los finos inhiben las pulsaciones. Cuando los huecos entre las partículas están completamente llenos con partículas impermeables, las pulsaciones no ocurren. Los materiales con menos gruesos (tales como las arenas) pueden producir pulsaciones, pero con una amplitud muy baja. Los polvos no presentan pulsaciones.

Jenike propone el siguiente mecanismo de pulsación: Las pulsaciones se generan en una transición o en una transición efectiva en el diámetro de cilindros (Jenike, 1977). Las presiones altas, debido a una altura de material h_C, compacta los sólidos de la parte inferior del cilindro como un tapón firme. En la transición, una gran parte de la presión debido a la altura h_C se transfiere a las paredes. El material altamente consolidado es capaz de formar un arco estable de cierto claro. Este arco no se rompe ni fluye hasta que el arco ha sido expuesto a través del flujo de salida, por debajo del mismo arco.

El perfil de velocidad de un sólido fluyendo en la parte convergente de un canal de flujo se muestra en la figura 3-38. El flujo del material es más rápido en el centro, donde se forma un hueco y se expone el arco estable. El hueco y el claro del arco se incrementan gradualmente aumentando los esfuerzos en el arco. Cuando la resistencia del material del arco se excede, éste se colapsa, la cuña se desliza y se llena el hueco. El proceso anterior es repetitivo.

La tendencia de las pulsaciones es inherente en materiales de ciertas propiedades y ocurre en una transición o en una transición efectiva. Como el diseñador no puede seleccionar el material y las transiciones que se presentan en los silos, el diseñador únicamente puede intentar minimizar la amplitud de las pulsaciones. Se puede hacer esto mediante la reducción efectiva de la altura de los sólidos, h_c, en la transición y mediante la selección de las condiciones de la tolva para prevenir el desarrollo de grandes arcos.

Los siguientes factores disminuyen la altura h_c:

a) Relación baja de H/D.
b) Paredes del cilindro rugosas.
c) Cilindros convergentes.
d) Silos construidos con pendientes que contengan una variedad de convergencia, divergencia y extremos rugosos.
e) Repisas salientes circunferenciales como se muestra en la figura 3-39. Solamente un nivel de repisas puede ser suficiente. La superficie de la repisa puede ser dura o suave.

Las presiones sobre la repisa se calculan como si la repisa fuera la parte superior de la tolva. Mientras que puede ser que la repisa genere pulsaciones por si sola, realmente no ocurre porque el perfil de velocidad en el cilindro bajo la repisa es uniforme. El arco entero está continuamente expuesto y se colapsa antes que un hueco pueda desarrollarse. La altura efectiva h_c sobre la tolva está limitada a que sea menor que el diámetro D.

También se explica el mecanismo de pulsación como sigue: para formación de arcos repetitivos y colapsos del material, es necesario que el plano de falla de un arco llegue a ser una superficie libre del siguiente arco. Así, el plano de falla debe ser paralelo a la superficie libre del arco. Un plano de falla esta inclinado en un ángulo de $\alpha = (45° - \rho/2)$ para la mayor presión. En un arco con una superficie libre, la presión mayor esta alineada con la superficie. Por lo tanto, el plano de falla es paralelo a la superficie libre y forma un ángulo $\alpha = 0$. Esto implica $\rho = 90°$ o una línea del tipo mostrado en la figura 3-40. Aquí $\rho = 90°$ para el cargado en una superficie libre, indicada por el círculo de Mohr. Un material de este tipo tiene una resistencia a la compresión fc y cero resistencia a la tensión. Esto se presenta para explicar el porqué únicamente los materiales que contienen partículas gruesas presentan pulsaciones. Entre más grande es el esfuerzo de compresión fc, es mayor el claro de falla, también es mayor el hueco bajo el arco y es más fuerte la pulsación. Los esfuerzos fc se incrementan con la altura h_c debido a que se requiere un nivel suficiente de material por arriba de una transición antes de que se observe una pulsación.

Mientras que el esfuerzo de compresión fc puede ser grande en varios materiales finos, estos materiales no presentan pulsaciones porque ellos tienen resistencia a la tensión. Esta línea geométrica no pasa a través de (0,0), $\rho < 90°$ en una superficie libre, y el plano de falla penetra profundamente dentro del arco. Así, el mecanismo de frecuencia repetitiva alta no se presenta. Además, los huecos no pueden formarse rápidamente en materiales de baja permeabilidad. Cualquier tendencia para formar un hueco reduce la presión de aire en dicho hueco y los gradientes de presión de aire se forman dentro del material que forma el arco, provocando el colapso del arco. En consecuencia, los sólidos finos fluyen uniformemente.

Choques

La explicación de Jenike de choque es como sigue: Los choques periódicos se presentan en silos con flujo de embudo que contienen sólidos gruesos con pocos finos. Entre estos materiales se encuentran el clinker de cemento, el carbón grueso y el maíz. En silos grandes estos choques pueden ser destructivos. Los intervalos entre choques son irregulares que pueden durar desde algunos segundos hasta varios minutos. En el caso de salida constante, la severidad de los choques se incrementa con el tiempo del intervalo que le precede.

La uniformidad de la velocidad de alimentación no se ve afectada con los choques, pero el nivel superior del material en el silo regularmente permanece estacionario durante el intervalo, cayendo abruptamente durante el choque. A medida que el nivel superior del silo desciende, la fuerza de los choques disminuye y luego desaparece.

Los choques se presentan debido a la inestabilidad recurrente del material estancado alrededor de los canales de flujo. El material estancado se desliza dentro del canal, formado un canal secundario. Esto densifica al material en el canal de flujo, con lo cual se forma de nuevo una presión en las paredes más alta capaz de estabilizar el material alrededor de ellas. A medida que el material se descarga, este se dilata, disminuye la presión en las paredes y de nuevo ocurre un colapso.

Este mecanismo se justifica mediante la medición de presiones en paredes, las cuales en los niveles superiores muestran una disminución de la presión durante el intervalo sin movimiento (correspondiente a la dilatación), seguido de un incremento agudo de la presión de las paredes (correspondiente al colapso y la contracción). En un nivel inferior, la presión es esencialmente constante durante el intervalo, esto indica la existencia de un canal angosto lejos de las paredes.

Los choque pueden ser eliminados o al menos minimizados mediante la expansión del canal de flujo a un diámetro base de algunos 2.5 m. Arriba de este diámetro, usualmente se supone un canal de flujo con forma cónica estable. Esta expansión puede ser obtenida usando una salida rectangular de 2.5 m o expandiendo el canal de flujo con una tolva con flujo de masa con un diámetro de 2.5 m. Lo anterior, es fácil de realizar en silos existentes.

Los choques de este tipo generalmente no ocurren en materiales cohesivos que desarrollan canales de materiales estancados estables. Tampoco ocurren en materiales finos, probablemente debido a que los materiales finos siempre tienen la misma cohesión y resisten la rápida dilatación y contracción directa contrarrestando los gradientes de presión de aire en los huecos. En materiales gruesos que tienen alta permeabilidad, los gradientes de presión de aire importante no se incrementan.

Se pueden originar choques severos dentro de un material fluyendo cuando la pendiente de la tolva y la fricción están entre los límites de flujo de masa y flujo de embudo. Puede ser el caso, cuando se tiene una tolva cónica para un material con ρ = 50°, una tolva con θ = 30 ° y μ = 16°. Si la fricción de las paredes se incrementa un poco, quizás debido a la corrosión de las paredes durante el almacenaje con el material en reposo, entonces, el flujo de masa no ocurrirá en el inicio de la descarga; más bien, el flujo seguirá en el canal central. Si el material en la región de la transición tiene la suficiente resistencia para formar el arco a través de ese canal, el canal tenderá a vaciarse gradualmente dejando expuestas las paredes. En la altura expuesta, el material estable en la tolva caerá y todo el contenido del silo caerá en el hueco, produciendo un choque. Estos choques pueden ser recurrentes.

Para prevenir estos choques, la pendiente de las paredes de las tolvas deben ser pronunciadas lo suficiente, de tal manera que θ y μ estén en la región de flujo de masa. También, las propiedades friccionantes no deben deteriorarse con el tiempo. Un recubrimiento de acero inoxidable, recubrimiento de epóxico o de plástico especial puede dar la solución en un silo existente que no tiene la pendiente necesaria para considerar un flujo de masa.

Efecto de sólidos muy cohesivos

Si el diámetro crítico de arco de un material se aproxima o excede al diámetro del cilindro se tenderá a desarrollarse un arco en todo el silo. Entonces, el material no se descargara libremente por gravedad. Por lo tanto, se requerirá vibración, aireación o inyección de aire para iniciar el flujo de la tolva; sin embargo, después que la tolva esta vacía, aún puede existir un cilindro completo de material mediante un arco en la transición. Esta es una condición peligrosa porque existe la posibilidad de que la gran masa pueda caer dentro de la tolva al mismo tiempo y dañe la tolva y sus soportes o las paredes del silo. Bajo estas condiciones la altura de material en el cilindro no debe exceder una vez su diámetro y la tolva debe tener la resistencia para soportar el impacto de la caída de la masa.

3.4.5 Presiones totales (Presión estática más sobrepresión)

Las presiones totales (vertical y lateral) pueden exceder las presiones calculadas por un amplio margen. (Estas presiones totales pueden ser llamadas presiones de "operación" o de "flujo"). En los primeros diseños de silos las sobrepresiones no se consideraban, sino hasta los años 50 que se reconoció que las sobrepresiones ocurrían durante la descarga de los silos. El resultado de no considerar las sobrepresiones era la reducción de los factores de seguridad totales. Se construían estructuras cerca de su límite de resistencia con la probabilidad del pandeo de las paredes de los silos y agrietamientos o el colapso de la estructura.

Las sobrepresiones se deben a varias causas, incluyendo la formación de arco de los materiales almacenados, el colapso del material que forma arco, el cambio repentino de los canales de flujo, su velocidad y su dirección y los cambios entre el flujo de embudo y el flujo de masa.

Hay dos enfoques para determinar las presiones totales. Uno es modificando la presión estática calculada con "factores de sobrepresión"; y el segundo calculando las presiones directamente. En las primeras etapas de desarrollo ninguno de los dos enfoques fueron completamente satisfactorios. En las siguientes secciones se mencionan algunos métodos y códigos para calcular las presiones de diseño en silos.

Presiones de diseño por Reimbert

En 1980 Marcel y André Reimbert presentaron el método para calcular presiones de operación y diseño en silos, incluyendo los efectos de descarga excéntrica. Esto se realizó usando factores numéricos determinados experimentalmente para multiplicarlos por las presiones estáticas de Janssen o Reimbert.

En este método el factor dinámico K_d, se utiliza para la condición de descarga de material solamente. El factor de sobrepresión K_b se multiplica por el factor K_d para llenado y descarga simultánea de material.

Las fuerzas fueron determinadas mediante pruebas que utilizan arena fina como material almacenado. Por lo tanto, para determinar los valores de K_b y K_d para otros materiales estos factores se multiplican por los siguiente factores como sigue: $K_{a\,1}$ para descarga, y $K_{a\,2}$ para llenado y descarga simultánea. Estos factores se basan en arreglos de puntos de descarga y en la esbeltez del silo, e_1. Las curvas de presión y los valores están indicados en la figura 3-41.

$e_1 = H/a$ para silos poligonales y cuadrados
$e_1 = H/1.12D$ para silos circulares

Desgraciadamente, se dan valores de K_a limitados a ciertos materiales. Otra limitación es que estos factores son válidos únicamente para materiales no cohesivos. La figura B-1, del apéndice B, muestra los arreglos geométricos de aberturas de descarga y las tablas B-1 y B-2 del mismo apéndice muestran los factores que se utilizan para el método de Reimbert.

Enfoque de Safarian

Este procedimiento para el cálculo de presiones de diseño de materiales almacenados en silos involucra la determinación de la presión estática obtenida con el método de Janssen o de Reimbert y después se multiplica por un factor de sobrepresión C_d para obtener la presión o fuerzas de diseño. La tabla C-1 del apéndice C muestra los valores de los factores de sobrepresión, C_d, recomendados por Safarian.

Para mejorar el flujo de material, algunos diseñadores usan un aditamento localizado directamente sobre la tolva. (Buehler Nose.) Las pruebas muestran que tales aditamentos pueden causar grandes sobrepresiones locales, mayores que las que se presentan sin el aditamento. Cuando los aditamentos se utilizan y sus efectos no son determinados experimentalmente, se sugiere que los factores de sobrepresión normal, C_d, para las paredes con altura igual a tres veces la profundidad del aditamento, sean por lo menos un 50 % más grandes que los de la tabla C-1

Se recomienda que los efectos de descargas excéntricas se consideren mediante la inclusión de una presión de corrección, p_{ecc}, para la presión de diseño lateral, p_{des}. El método de Safarian para calcular p_{ecc} esta incluido en la sección 3.4.6 o se puede utilizar algún otro método confiable.

Para presiones con flujo de masa el método de Safarian sugiere un incremento del 10 al 25 % con respecto a los factores C_d que se dan en la tabla C-1.

Los silos que contienen materiales granulares calientes están sujetos a esfuerzos de temperatura, que pueden ser muy altos y no deben ignorarse. En estos casos, los esfuerzos térmicos y el refuerzo adicional correspondiente debe calcularse. El refuerzo calculado para estos esfuerzos debe agregarse adicionalmente al refuerzo obtenido para las presiones del propio material.

La figura 3-42 muestra la curva resultante de la presión de diseño lateral dada por el método de Safarian. Nótese que la presión se incrementa debido a la presión por la excentricidad de la descarga p_{ecc} y se suma al producto $C_d p$.

Código ACI 313

En 1977, el Instituto Americano del Concreto (ACI), publicó sus estándares "Recommended Practice for Design and Construction of Concrete Bins, Silos and Bunkers for Storing Granular Materials (ACI 313-77) and Commentary." y una edición revisada apareció en 1983 y, más recientemente en 1991, se publicaron los estándares "Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials (ACI 313-91) and Commentary".

En los estándares del ACI-313 se dan las recomendaciones para los materiales, para el diseño y para la construcción de silos de concreto reforzado y para silos segmentados para el almacenamiento de materiales granulares. También, se dan los métodos y las cargas recomendadas para la determinación de los esfuerzos en el concreto y en el acero de refuerzo resultantes de estas cargas. Además, se recomiendan los métodos para la determinación de los efectos térmicos de materiales calientes almacenados y para la determinación del ancho de grieta en las paredes de concreto debido a las presiones de los materiales almacenados.

Para el cálculo de las presiones estáticas, se puede utilizar el método de Janssen o el de Reimbert, con algunas modificaciones.

Los estándares están basados en el método de diseño por última resistencia e incluyen factores de sobrepresión e impacto. Las presiones de los materiales almacenados sobre las paredes y fondo del silo para su diseño se determinan como sigue:

a) Cálculo de la presión estática usando el método de Janssen o el de Reimbert. El ACI 313 usa una pequeña modificación de la ecuación de Janssen en el cálculo de la fuerza de fricción vertical sobre las paredes del silo:

$$V = R\left[\gamma Y - 0.8q\right] \tag{3-21}$$

Mediante el método de Reimbert o Janssen, la presión estática normal unitaria para una superficie inclinada en un ángulo α con respecto a la horizontal a una profundidad Y por debajo de la superficie del material almacenado se calcula como:

$$q\alpha = p\,\mathrm{sen}^2\alpha + q\cos^2\alpha \tag{3-22}$$

b) Las presiones de diseño $pdes$, $qdes$, $q\alpha,des$ se obtienen multiplicando la presión estática por un factor de corrección Cd (o un factor de impacto Ci que aplica únicamente a silos de poca altura). El factor de sobrepresión no se aplica a la fuerza de fricción; entonces:

$$pdes = Cdp \tag{3-23}$$

$$qdes = Cdq \tag{3-24}$$

$$Vdes = V \tag{3-25}$$

Los valores mínimos requeridos de los factores Cd y Ci corresponden a los valores de las tablas A-2 y A-3 del apéndice A. La presión de diseño, en silos de homogenización, es la que resulte mayor de $pdes$, $qdes$, $q\alpha,des$ calculadas como se describió arriba (omitiendo la presión de aire) o la presión calculada suponiendo una condición semi-líquida:

$$pdes = qdes = q\alpha,des = 0.6\gamma Y \tag{3-26}$$

Las fuerzas de fricción vertical se calculan usando la condición de presión estática (no líquida). Se debe considerar el aumento de la presión debido a la excentricidad de la descarga.

3.4.6 Efecto de descarga excéntrica y flujo no simétrico

Enfoque del ACI 313

Este enfoque se considera en los comentarios del ACI 313 para el incremento de la presión lateral. Supone un incremento de la presión lateral de diseño de por lo menos un 25 % de la presión estática en el fondo del silo, cuando una abertura está cerca de las paredes del silo.

Si la excentricidad (e) de la abertura con respecto al centro del silo es menor que el radio (r), se ha de considerar el incremento como al menos el 25 % de e/r. Este valor se supone constante, desde la parte superior de la tolva, hasta una altura igual a D (o a o b) y se reduce linealmente, hasta la parte superior del material almacenado. Este incremento no necesita multiplicarse por Cd. Si se expresa como una ecuación quedaría como:

$$pdes = C_d\, pst + pecc \tag{3-27}$$

Método de Safarian

La excentricidad de la descarga puede ser considerada agregando un factor de corrección, $pecc$, a la presión de diseño lateral, $pdes$, calculada a una profundidad H mediante la fórmula de Janssen o Reimbert; $pecc$ se supone constante desde la parte superior de la tolva hasta una altura igual a D (o a o b) y se reduce linealmente hasta la parte superior del material almacenado. Entre las alturas H-D, la presión de diseño lateral a una profundidad Y es:

$$pdes = C_d p + \frac{Y}{H-D} pecc \tag{3-28}$$

La presión de corrección $pecc$ a una profundidad H es:

$$pecc = pi - pH \tag{3-29}$$

donde pH = presión estática a una profundidad H.

La presión pi es la presión estática lateral a una profundidad H en un silo imaginario, como se muestra en las figuras 3-43 y 3-44.

Para silos rectangulares, el silo imaginario se determina como se muestra en la figura 3-43. Cuando la abertura se desplazada hacia el lado a, la corrección $pecc$ para el lado a se calcula usando un silo imaginario que mide $(a + 2e_a)b$. (Si e_a es mayor que a, el silo imaginario debe medirse como $3ab$.) Similarmente, si la abertura es excéntrica hacia el lado b, el silo imaginario medirá $(b + 2e_b)a$. Si ambas excentricidades se presentan, cada corrección es calculada separadamente, usando primero el silo imaginario descrito para determinar $pecc$ para el lado a y segundo para el lado b.

Para el caso de silos circulares, el silo circular imaginario de la figura 3-44 se centra con respecto a la abertura de descarga y tiene un radio igual al del silo real más la excentricidad. Cuando se presentan descargas múltiples, aunque el grupo esté localizado centradamente, la descarga excéntrica es siempre posible y debe considerarse.

CAPÍTULO 4

MODELOS ESTRUCTURALES DE LOS SILOS ANALIZADOS

Se presentan cinco modelos estructurales, cuya geometría se seleccionó tomando en cuenta el efecto que pudiera ocasionar la relación entre la altura y el diámetro (H/D), la excentricidad de la descarga y la forma de la losa de fondo.

La cantidad de elementos que se requieren para generar los modelos estructurales depende del método de análisis que se utilice. Los métodos de análisis que se utilizaron para el estudio comparativo de los silos fueron los siguientes:

a) Método I. Análisis Convencional. (Safarian, ver capítulo 5.)
b) Método II. Analogía de Marcos. (Priestley, ver capítulo 6.)
c) Método III. Elemento Finito. (Programa SAP2000, ver capítulo 7 (SAP 2000, 1997)).

En la siguiente sección se describe, en forma general, las dimensiones de los modelos estructurales que se utilizaron para los análisis.

4.1 Dimensiones de los modelos estructurales de silos

Las dimensiones de los cinco modelos seleccionados para esta tesis se muestran en las figuras 4-1 y 4-2. En todos los casos se consideró la misma altura de los silos pero se varió el diámetro y la forma de la losa de fondo. En la figura 4-1(a) se muestra un silo con un diámetro de 12.0 m, en la figura 4-1(b) un silo con un diámetro de 18.0 m y en la figura 4-1(c) un silo de 24.0 m de diámetro. En estos tres modelos la altura de almacenamiento se consideró de 36.0 m y la altura total de 45.0 m. En la figura 4-2 se ilustran dos modelos estructurales con losa de fondo cónica. La figura 4-2(a) muestra un silo de 12 m de diámetro con losa cónica concéntrica y la figura 4-2(b) un silo con losa cónica excéntrica. En estos últimos modelos, la altura total también se consideró de 45 m y la altura de almacenamiento de 36.0 m pero, se consideró adicionalmente, la capacidad de la tolva. En estas mismas figuras se indican, además, los elementos estructurales principales de un silo circular individual con losa de fondo plana (figura 4-1) y con losa de fondo cónica (figura 4-2). Los elementos estructurales principales que conforman estos silos son:

- Paredes
- Losa de cimentación
- Losa de fondo plana
- Losa de fondo cónica concéntrica
- Losa de fondo cónica excéntrica

En el caso del silo de 18 m de diámetro se utilizaron 8 columnas de concreto de 1.2 m de diámetro para soportar la losa de fondo plana de 1.4 m de espesor y, para el silo de 24 m de diámetro, se utilizaron 12 columnas de 1.5 m de diámetro para soportar una losa plana de 1.7 m de espesor (ver figuras 4-1b y 4-1c).

4.2 Datos propuestos para los análisis

4.2.1 Propiedades de los materiales

Para los análisis se seleccionaron las propiedades de material, para un silo de almacenamiento de cemento. Las propiedades correspondientes son:

- Peso volumétrico del material γ (Kg/m^3) 1600
- Ángulo de fricción interna ρ 25°
- Coeficiente de fricción entre paredes y material μ' 0.446

Las propiedades del concreto de los elementos estructurales del silo son:

- Peso volumétrico del concreto γ_C (Kg/m^3) 2400
- Resistencia del concreto f'_C (Kg/cm^2) 280
- Módulo elasticidad concreto E_C (Kg/cm^2) 252671
- Relación de Poisson del concreto ν 0.25

4.2.2 Cargas consideradas

Las cargas que se consideraron para el estudio comparativo fueron las siguientes:

Carga muerta:

- **Peso propio** de los elementos estructurales (paredes del silo, losa de fondo y losa de cimentación).

Carga viva:

- **Presión estática** (pst) proveniente del material almacenado en el cilindro del silo y en la losa de fondo plana o cónica.

- **Sobrepresión** adicional a la presión estática considerando un factor de sobrepresión Cd debido al flujo del material hacia la descarga.

- **Presión excéntrica** ($pecc$) debido a la localización excéntrica de la descarga.

- **Carga de fricción** que se presenta debido a la fricción entre las paredes del silo y el material almacenado.

La evaluación de cargas para los diferentes casos de estudio de silos se realizó siguiendo la información de las secciones 5.2.2, 6.2.2 y 7.2.2 y se presenta en las tablas 5-1 a la 5-5 para el método I, en la tablas 6-1 a la 6-5 para el método II y en las tablas 7-1 a la 7-5 para el método III, en las cuales se indican los datos que se utilizaron en los análisis a diferentes profundidades Y del silo. Los datos que se muestran en esas tablas se resumen para profundidades Y a cada 6.0 m; sin embargo, la información proporcionada en los análisis para los diferentes métodos, se consideró para profundidades Y a cada 1.5 m.

4.2.3 Combinaciones de carga

Las condiciones de carga utilizadas para los análisis de silos fueron las siguientes:

- PRESIÓN: Presión estática más sobrepresión ($Cdpst$)

- PRES2ECC: Presión excéntrica ($pecc$)

- FRICCIÓN: Fuerza de fricción (F_{fricc})

- VIVAF: Presión en losa de fondo ($qdes$, en losas de fondo plano y $q\alpha,des$ en losas de fondo cónicas).

- PPROPIO: Peso propio de las paredes del silo y de la cimentación.

- MUERTAF: Peso propio de la losa de fondo.

- MUERTAT: Carga muerta sobre la losa de techo (2980 Kg/m sobre el perímetro de las paredes del silo sólo para silo de 12 m de diámetro)

- VIVAT: Carga viva sobre la losa de techo (1490 Kg/m sobre el perímetro de las paredes del silo sólo para silo de 12 m de diámetro).

Para los fines de los análisis comparativos de silos se utilizaron las condiciones de carga anteriores y las siguientes combinaciones de carga:

- CMUERTA = PPROPIO + MUERTAF + MUERTAT
- MATERIAL = PRESIÓN + FRICCIÓN +VIVAF + PRES2ECC
- MAT2 = PRESIÓN + FRICCIÓN + VIVAF
- COMB1 = PRESIÓN + FRICCIÓN +VIVAF + PRES2ECC + PPROPIO + MUERTAF + MUERTAT + VIVAT

Además de las combinaciones de carga anteriores, también se consideró la siguiente combinación de carga para observar el comportamiento de los silos bajo cargas factorizadas para revisar las dimensiones de los elementos que forman los silos para que estén dentro de valores apropiados estructuralmente, aunque el diseño detallado de los elementos no forma parte de este proyecto de tesis:

- COMB2 = 1.7 PRESIÓN + 1.7 FRICCIÓN +1.7 VIVAF + 1.7 PRES2ECC + 1.4 PPROPIO + 1.4 MUERTAF + 1.4 MUERTAT + 1.7 VIVAT

4.3 Acciones mecánicas

Las acciones mecánicas (ver figura 4-3) que se obtuvieron utilizando los tres métodos de análisis descritos anteriormente son:

Fuerza circunferencial. Se presenta en forma horizontal, a lo largo de la circunferencia de las paredes del silo y en toda su altura. Generalmente, resultan ser fuerzas de tensión generadas por las presiones de los materiales almacenados.

Fuerza axial. Pueden ser fuerzas de tensión o compresión verticales, que se presentan en toda la altura de las paredes del silo y son el resultado del peso propio de las paredes y de la losa de fondo, la fricción del material almacenado y en algunos casos, se deben a la presencia de cargas ocasionadas por la excentricidad de la descarga del material.

Momentos flexionantes verticales. Se presentan principalmente, en las uniones monolíticas de las paredes del silo con la losa de fondo o con la estructura de techo.

Momentos flexionantes horizontales. Se pueden presentar también en las conexiones de las paredes con la losa de fondo y el techo y a cualquier altura de las paredes del silo, en el caso de que exista la presencia de cargas excéntricas. En las losas de cimentación y de fondo, estos momentos, se presentan en dos direcciones ortogonales.

Los métodos de análisis seleccionados son aplicables al diseño de un silo, según las acciones mecánicas que se puedan determinar en cada caso en particular y de acuerdo a los elementos estructurales que conforman el silo. La tabla 4-1 muestra un resumen de las acciones mecánicas que se pueden obtener en cada método y los elementos estructurales que se pueden considerar en los análisis.

4.4 Deformaciones

En este estudio no se determinaron las deformaciones en los elementos estructurales de los silos; sin embargo, es posible determinarlas, por cualquiera de los tres métodos seleccionados, pero los valores resultantes de los análisis, para las paredes, sólo son comparables en el caso de considerar cargas rotacionalmente simétricas, o sea, cargas debidas a la presión de los materiales cuando se tiene descarga concéntrica; por el contrario, si se tratara de presiones ocasionadas por descarga excéntrica, los resultados que proporcionan los tres métodos no son comparables, debido a que los métodos I y II no toman en cuenta la distribución variable de presiones a lo largo de la circunferencia del silo. Por esta razón, en esta tesis, no se hicieron comparaciones de deformaciones entre los tres métodos seleccionados.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS CON EL MÉTODO CONVENCIONAL

En este capítulo se describe un método de análisis convencional que involucra la obtención de las acciones mecánicas que se presentan en silos siguiendo los criterios y procedimientos utilizados por S. Safarian (Safarian, 1985) y el ACI 313 (ACI 313,1991) que para fines comparativos se le denominó "**Método I**".

Este método de análisis surge de la teoría de placas y cascarones, de donde se derivan las expresiones que se muestran más adelante (Timoshenko, 1984). Para fines del análisis, con este método, se hacen algunas simplificaciones de las ecuaciones para obtener las acciones mecánicas en las paredes de los silos.

Una de las simplificaciones de este método, para la determinación de las fuerzas circunferenciales, es que las paredes de los silos se consideran libres a deslizarse tanto en la conexión de las mismas con la losa de fondo y con el techo y generalmente, estas fuerzas resultan ser de tensión, en toda la altura del silo, dependiendo su magnitud de las presiones ocasionadas por los materiales almacenados.

Así mismo, para la determinación de los momentos flexionantes verticales y horizontales, se considera que las paredes de los silos están empotradas en la losa de fondo o en la losa de cimentación, utilizando las ecuaciones de la teoría de placas, como se describe más adelante.

La carga axial se puede obtener en toda la altura de las paredes del silo, sumando las cargas de peso propio de los elementos estructurales, las cargas vivas sobre el techo, losas de fondo y paredes y las fuerzas de fricción que se generan entre el material almacenado y la superficie interior de las paredes.

Para las losas de fondo planas o cónicas y las losas de cimentación se hace el análisis por separado para la determinación de las acciones mecánicas, considerando que sus extremos, inicialmente, están empotrados a las paredes del silo; utilizando, también, la teoría de placas y cascarones.

Los resultados que se obtienen, considerando las paredes de los silos y las losas empotradas en sus extremos en la conexión de ambos elementos, no son los valores reales, por lo que se requiere realizar un análisis de compatibilidad para tomar en cuenta las rigideces de estos elementos, siguiendo, también, la teoría de placas y cascarones (Billington, 1982).

5.1 Descripción del método

Los primeros métodos desarrollados para el análisis de silos involucran la teoría de placas y cascarones cilíndricos (Timoshenko, 1984) sujetos a presiones generadas por los materiales almacenados.

A continuación se describen, brevemente, las ecuaciones correspondientes para el caso de cargas axisimétricas.

Las cargas actúan en dos formas: esfuerzos circunferenciales y flexión de las paredes a lo largo de su altura. La fig. 5-1 muestra la deflexión radial de un silo o tanque cilíndrico soportado sobre el terreno bajo presión interna.

Las consideraciones de compatibilidad resultan en la ecuación característica para la deformación radial:

$$\frac{d^4 y}{dY^4} + \alpha^4 y = \frac{\phi(Y)}{K} \tag{5-1}$$

donde $\phi(Y)$ es la función de [$\phi(Y) = \rho g Y$ para la carga del material, donde ρ es la densidad de la masa y g es la aceleración debido a la gravedad]

$$K = Ec\,I \Big/ \left(1 - \nu^2\right)$$

$$I = h^3/12$$

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{\left(1-\nu^2\right)}{r^2 h^2}}$$

α es la característica de la función, donde r es el radio del silo, h es el espesor de las paredes y ν es la relación de Poisson del concreto.

La ecuación 5-1 tiene la solución típica:

$$y = PI + \left[e^{\frac{\alpha Y}{\sqrt{2}}} \left(A \operatorname{sen} \frac{\alpha Y}{\sqrt{2}} + B \cos \frac{\alpha Y}{\sqrt{2}} \right) + e^{\frac{-\alpha Y}{\sqrt{2}}} \left(C \operatorname{sen} \frac{\alpha Y}{\sqrt{2}} + D \cos \frac{\alpha Y}{\sqrt{2}} \right) \right] \tag{5-2}$$

donde PI es la integral particular que depende de las cargas, y A, B, C y D son las constantes de integración que dependen de las condiciones de frontera en la base y en la parte superior de las paredes.

Una vez que la ecuación 5-2 se resuelve para "y", la distribución de esfuerzos completa en el silo puede calcularse como sigue:

Tensión circunferencial

Como la longitud circunferencial y el radio r se relacionan con la constante 2π, una deformación radial "y" causa un incremento de longitud de $2\pi\, y$. La deformación circunferencial será:

$$\xi h = 2\pi\, y / 2\pi r = y\ r$$

y entonces el esfuerzo de tensión circunferencial esta dado por:

$$fh = Ec\, y / r \tag{5-3}$$

donde Ec es el módulo de elasticidad del concreto.

Flexión vertical

De la ecuación de la viga, los momentos flexionantes verticales se encuentran con la doble diferenciación de la ecuación 5-2 como:

$$Mv = \frac{EcI}{1-v^2}\frac{d^2 y}{d Y^2} \tag{5-4}$$

Si los momentos se calculan para un ancho unitario, los esfuerzos de flexión superficial en la dirección vertical se pueden encontrar con:

$$Fv = \pm 6Mv / h^2 \tag{5-5}$$

Esfuerzos circunferenciales superficiales

Como las cargas y las estructuras son ambas axisimétricas, las líneas radiales conectan los puntos en la superficie interior y exterior de las paredes del silo y permanecen radiales después de la aplicación de las cargas. Esta significa que las deformaciones transversales por la relación de Poisson proveniente de los momentos flexionantes verticales no pueden desarrollarse, y en consecuencia, las paredes están en estado de deformación plana para flexión vertical. Consecuentemente, los esfuerzos de Poisson circunferenciales, νfv, también se desarrollan en las paredes.

Estos esfuerzos de Poisson se ignoran comúnmente en el diseño, pero, pueden ser muy significativos cuando los momentos flexionantes altos se desarrollan en la base empotrada. Los esfuerzos circunferenciales finales en la superficie de las paredes son:

$$fc = fh \pm \nu fv = Ec\, y/r \pm \nu 6Mv/h^2 \qquad (5\text{-}6)$$

En silos de paredes cilíndricas bajo cargas simétricas rotacionalmente se involucran cargas que manejan dos mecanismos: tensión circunferencial y flexión vertical. La ecuación 5-1 se desarrolló de los requerimientos de compatibilidad de que las deformaciones radiales de los dos mecanismos deben ser idénticas en todos los puntos.

En los siguientes párrafos se incluyen los criterios para el análisis y diseño de silos circulares, para la determinación de fuerzas circunferenciales y axiales propuestos por S. Safarian (Safarian, 1985) y para la determinación de los momentos flexionantes que se obtienen de la teoría de placas y cascarones. En estos criterios, se involucran, también, las recomendaciones de diseño del ACI-313 y el ACI-318.

Determinación de la fuerza de tensión circunferencial

En el capítulo 3 se mencionaron algunos métodos para la obtención de las presiones de diseño. En este capítulo se utilizó el método de Safarian (Safarian, 1985) y los criterios del ACI-313 para la obtención de las presiones y fuerzas de fricción generadas por los materiales almacenados. La información obtenida con estos métodos corresponde a las cargas vivas que actúan en los silos y son parte de las cargas que se consideraron para la determinación de las acciones de diseño.

Suponiendo que la presión radial del material almacenado es uniforme alrededor de su circunferencia en una elevación en particular, las paredes del silo se tratan como un cilindro de pared delgada esforzada a una fuerza de tensión circunferencial horizontal únicamente, sin tomar en cuenta la existencia de momentos flexionantes y cortantes. La fuerza de tensión circunferencial por unidad de altura del cilindro se determina con la siguiente expresión:

$$F = pdes\, D/2 \qquad (5\text{-}7)$$

Suponiendo que el diseño se haga con el método de última resistencia, la fuerza de tensión circunferencial se determina con:

$$Fu = Klpdes\, D/2 \qquad (5\text{-}8)$$

en la cual Kl es el factor de carga viva.

El área de acero circunferencial requerida por unidad de altura es:

$$As\,\text{requerida} = Fu/\phi fy$$

donde φ es el factor de reducción (0.9 para tensión según el ACI-318).

El área de acero requerida As varía con la elevación debido a que la presión lateral $pdes$ es una función de la profundidad del material almacenado siendo menor en la parte superior del silo y mayor en el fondo de la zona de presión del silo.

El acero de refuerzo circunferencial no debe interrumpirse abruptamente en el fondo de la zona de presión. La condición real de esfuerzos es mucho más compleja que la que implica la ecuación de la fuerza de tensión circunferencial en la que se considera que las paredes son libres a deslizarse. El silo es realmente un cascarón tridimensional, con fuerzas de tensión circunferencial y momentos flexionantes verticales. La fuerza de tensión circunferencial disminuye gradualmente hacia debajo de la zona de presión y los momentos flexionantes verticales son menos intensos si se reduce gradualmente la cantidad de acero de refuerzo circunferencial.

Así, un método que ha sido desarrollado y utilizado con buenos resultados es como sigue:

a) Para paredes que son independientes del sistema del fondo del silo, se continúa el acero de refuerzo circunferencial (requerido para la zona de presión) hacia abajo 1.0 m o seis veces el espesor de la pared h por debajo de la zona de presión o por debajo de la viga de anillo. A partir de este punto se reduce el acero de refuerzo al mínimo permitido por el reglamento del ACI-318.

b) Para paredes de silos con tolvas se continúa el área de acero requerida As por lo menos 1.0 m abajo del punto más bajo en el cual la superficie llena de la tolva coincide con las paredes, después, se reduce a la mitad del acero As hasta el fondo del relleno de la tolva, pero a no menos que el acero mínimo.

c) Donde las paredes del silo que soportan el sistema de fondo son más gruesas que las paredes del silo de la zona de presión, continuar al menos la mitad del área de acero requerida por debajo de la zona de presión 1.0 m debajo de la parte superior de las paredes más gruesas.

Determinación del espesor de las paredes de los silos

El espesor de las paredes de los silos se determina con base a criterios de resistencia, ancho de grieta permisible y de detalles constructivos.

Si la presión radial fuera verdaderamente uniforme, alrededor de la circunferencia, existiría tensión pura y la presión del material no causaría momentos flexionantes horizontales. El concreto tendría grietas espaciadas regularmente y la resistencia de las paredes sería proporcionada por el acero circunferencial, y por lo tanto, sólo se requeriría un espesor de las paredes para la protección contra la corrosión del acero de refuerzo para asegurar la adherencia del acero y para resistir las fuerzas verticales de compresión; sin embargo, la presión radial puede ser no uniforme debido a condiciones inestables de flujo, llenado y descargas excéntricas e imperfecciones de construcción, por lo que los momentos flexionantes horizontales usualmente existen.

Una ecuación que presenta la Asociación de Cemento Pórtland (PCA) puede ser utilizada para estimar el espesor de las paredes del silo:

$$h_{min} = \left[\frac{mE_s + f_s - nf_{c,ten}}{100 f_s f_{c,ten}} \right] p_{des} D/2 \qquad (5\text{-}9)$$

en la cual f_s es el esfuerzo de trabajo permisible del acero de refuerzo equivalente a 0.4 a 0.45 f_y; $f_{c,ten}$ es el esfuerzo permisible del concreto a tensión (la PCA sugiere 0.1 f'_c); n es la relación modular E_s/E_c; y m es el coeficiente de contracción del concreto, supuesto igual a 0.0003.

Revisión del ancho de grieta

Aunque muy finas, pero bien distribuidas, las grietas por contracción siempre se presentan en concreto reforzado convencionalmente, pero las grietas importantes debidas a las cargas del silo pueden prevenirse o minimizarse en ancho para que no afecten la protección del refuerzo contra la corrosión principalmente. En los comentarios del ACI-313 se presenta un procedimiento de cálculo para la estimación del ancho de grieta probable en silos (ACI 313, 1991).

Determinación de las cargas verticales en las paredes

Las fuerzas verticales en las paredes se requieren para revisar el espesor de la porción de pared seleccionada. Las fuerzas verticales por unidad de longitud de la pared son mayores en el fondo del silo, pero los esfuerzos verticales pueden ser tan altos en paredes delgadas, en donde el espesor de las paredes cambia. Las fuentes de fuerzas verticales incluyen:

a) Fricción proveniente del material almacenado por arriba del nivel en cuestión.
b) Cargas muertas y vivas del techo, incluyendo estructuras y equipos montados sobre el silo.
c) Peso propio de las paredes.
d) Las cargas impuestas del sistema de fondo sobre las paredes inferiores.
e) Momentos de volteo debidos a la acción del viento o el sismo.
f) Cargas generadas por la excentricidad de la descarga.

Una vez seleccionando el espesor tentativo, se puede calcular la fuerza vertical total factorizada Fvu por unidad de longitud de pared:

Fvu = 1.7(fuerza de fricción vertical + cargas de techo + otras cargas vivas) + 1.4 (peso propio paredes + techo + otras cargas muertas) (5-10)

La carga vertical última calculada no debe exceder del valor permisible del ACI-318-95:

$$\varphi Pn,w = 0.55\phi f'cAg \qquad (5\text{-}11)$$

para paredes que se consideran que no van a fallar por pandeo; sin embargo, se debe revisar la posibilidad de la falla por pandeo.

El ACI-318 ofrece algunas sugerencias para considerar el pandeo en paredes circulares como sigue:

Para paredes circulares con presión radial uniforme que resiste pandeo:

a) Para paredes que son continuas alrededor de toda su circunferencia (sin huecos) usar la carga axial permisible de la ecuación 5-11, o sea, el pandeo no necesita considerarse.

b) Para paredes con huecos en los cuales no existen elementos estructurales alrededor de sus bordes:

$$\phi Pn,w = 0.55\phi f'c\left[1-\left(\frac{ho}{40h}\right)^3\right]Ag \qquad (5\text{-}12)$$

Para paredes circulares que no están sujetas a presión radial uniforme:

a) Para paredes continuas en toda su circunferencia sin huecos:

$$\phi Pn,w = 0.55\phi f'c\left[1-\left(\frac{D}{120h}\right)^3\right]Ag \qquad (5\text{-}13)$$

b) Para paredes con huecos en los cuales no existen elementos estructurales alrededor de sus bordes:

$$\phi Pn,w = 0.55\phi f'c\left[1-\left(\frac{ho}{40h}\right)^3-\left(\frac{D}{120h}\right)^3\right]Ag \qquad (5\text{-}14)$$

donde ho es la altura del hueco.

Las cargas laterales debidas al viento o sismo deben considerarse en combinación con las cargas verticales. Se pueden utilizar los factores de carga del reglamento ACI-318.

Determinación de los momentos flexionanates

Los criterios de S. Safarian no mencionan como determinar los momentos flexionantes verticales y horizontales en silos circulares (Safarian, 1985). Con la teoría de placas y cascarones se pueden obtener los momentos flexionantes verticales y horizontales debidos a la presión de los materiales almacenados en la conexión de las paredes del silo con el sistema de fondo considerando la base empotrada y, para el resto de la altura del silo, se podrían estimar siguiendo la misma teoría, a partir del momento resultante en la base utilizando la ecuación general para un silo (ec. 5-2) de la que se deducen expresiones simplificadas en función de factores que varían con respecto a la altura del silo (Timoshenko, 1984).

El momento flexionante vertical en la conexión con la losa de fondo, considerando las paredes empotradas, es:

$$Mv = \left(1 - \frac{1}{\beta H}\right) \frac{pdes(D\ 2)h}{\sqrt{12(1-v^2)}} \tag{5-15}$$

y la fuerza cortante es:

$$Qo = -\left(2\beta - \frac{1}{H}\right) \frac{pdes(D\ 2)h}{\sqrt{12(1-v^2)}} \tag{5-16}$$

donde;

$$\beta^4 = \frac{3(1-v^2)}{(D\ 2)^2 h^2} \tag{5-17}$$

Para la estimación de los momentos flexionates horizontales en la conexión mencionada se puede considerar la siguiente expresión:

$$Mh = vMv \tag{5-18}$$

Estos momentos no son realmente los que se presentan en la conexión de las paredes con la losa de fondo, debido a la continuidad que existe entre estos elementos, por lo que se requiere hacer, primeramente, el análisis convencional de la losa de fondo, para obtener sus momentos de empotramiento en esta unión y, después, realizar un análisis de compatibilidad en función de la rigidez de los elementos, para encontrar los momentos finales (Billington, 1982).

Para la determinación del acero de refuerzo por flexión y tensión combinados se puede seguir los criterios del ACI-313 en su sección 4.5 de diseño de paredes (ACI-313, 1991).

Momentos flexionantes para esfuerzos térmicos

Para la evaluación de fuerzas térmicas, el momento flexionante último por unidad de ancho debido al gradiente de temperatura se considera como:

$$Mxu = Myu = 1.4 E_c h^2 \alpha_c \Delta T / (1 - \nu) \tag{5-19}$$

El área de acero adicional requerida es aproximadamente:

$$As,x = \frac{Mxu}{fy(d - d')} \quad \text{para acero horizontal} \tag{5-20}$$

y:

$$As,y = \frac{Myu}{fy(d - d')} \quad \text{para acero vertical} \tag{5-21}$$

En cada caso, el acero debe agregarse al lecho más cercano al lado frío, pero por simplicidad de detalle, se coloca una cantidad igual en el otro lecho.

Fuerzas en tolvas cónicas

La presión de diseño $q\alpha,des$ en las paredes inclinadas de las tolvas puede calcularse con la ecuación 3-20. Al calcular $q\alpha,des$ a menudo se usan las dimensiones de la parte superior de la tolva para obtener R y C para las fórmulas de Janssen o Reimbert, ignorando la reducción de la sección transversal dentro de la tolva.

La fuerza meridional Fm y la fuerza tangencial Ft resultan de las presiones verticales $qdes$ (a una profundidad Y) y del peso combinado de: WL (material en la tolva abajo de la profundidad Y) y Wg (tolva más equipo soportado por la tolva debajo de la profundidad Y). Para el diseño por última resistencia, estas fuerzas se determinan con las siguientes expresiones:

$$Fmu = 1.7\left[\frac{qdesD}{4\,\text{sen}\,\alpha} + \frac{WL}{\pi D\,\text{sen}\,\alpha}\right] + 1.4\left[\frac{Wg}{\pi D\,\text{sen}\,\alpha}\right] \tag{5-22}$$

$$Ftu = 1.7\left[\frac{q\alpha.desD}{2\,\text{sen}\,\alpha}\right] \tag{5-23}$$

Ambas fuerzas son máximas en el extremo superior de la tolva y se aproximan a cero en el extremo inferior. El área de refuerzo requerida por unidad de ancho del cascarón debe ser:

$$A_s \text{ reqd} = F_{mu}/(\phi f_y) \qquad \text{(dirección meridional)} \qquad (5\text{-}24)$$

$$A_s \text{ reqd} = F_{tu}/(\phi f_y) \qquad \text{(horizontal)} \qquad (5\text{-}25)$$

5.2 Análisis de los modelos

5.2.1 Datos generales de los modelos

Para este método, se tomó un ancho unitario para la obtención de las acciones mecánicas a profundidades de 1.5 m y, los datos del material almacenado propuesto y las propiedades de los elementos estructurales que se mencionaron en la sección 4.2.1. Los datos geométricos de los modelos estudiados, tomando como referencia las figuras 4-1 y 4-2, se indican a continuación:

Silo con losa plana y H/D = 3

- Diámetro del silo D = 12 m
- Altura de almacenamiento H = 36 m
- Altura total = 45 m
- Espesor de las paredes h = 0.28 m
- Radio hidráulico $R = D/4$ = 3 m
- Excentricidad de la descarga e = 3 m (en caso de que se considere)
- Espesor de la losa de fondo = 1.2 m
- Espesor de la losa de cimentación = 1.2 m

Silo con losa plana y H/D = 2

- Diámetro del silo D = 18 m
- Altura de almacenamiento H = 36 m
- Altura total = 45 m
- Espesor de las paredes h = 0.45 m
- Radio hidráulico $R = D/4$ = 4.5 m
- Excentricidad de la descarga e = 4.5 m (en caso de que se considere)
- Espesor de la losa de fondo = 1.4 m
- Espesor de la losa de cimentación = 1.4 m

Silo con losa plana y H/D = 1.5

- Diámetro del silo D = 24 m
- Altura de almacenamiento H = 36 m
- Altura total = 45 m
- Espesor de las paredes h = 0.7 m
- Radio hidráulico $R = D/4$ = 6 m
- Excentricidad de la descarga e = 6 m (en caso de que se considere)
- Espesor de la losa de fondo = 1.7 m
- Espesor de la losa de cimentación = 1.7 m

Silo con losa cónica concéntrica y H/D = 3

- Diámetro del silo D = 12
- Altura de almacenamiento H = 36 m
- Altura total = 45 m
- Espesor de las paredes h = 0.28 m
- Radio hidráulico $R = D/4$ = 3 m
- Espesor de la losa de cimentación = 1.2 m
- Tolva de descarga con losa cónica concéntrica:

  - Altura de la tolva = 7.5 m
  - Diámetro superior de la tolva = 12 m
  - Diámetro inferior de la tolva = 1.5 m
  - Espesor de las paredes de la tolva = variable de 0.7 m (superior) a 0.4 m (inferior)

Silo con losa cónica excéntrica y H/D = 3

- Diámetro del silo D = 12 m
- Altura de almacenamiento H = 36 m
- Altura total = 45 m
- Espesor de las paredes h = 0.28 m
- Radio hidráulico $R = D/4$ = 3 m
- Espesor de la losa de cimentación = 1.2 m
- Tolva de descarga con losa cónica excéntrica:

  - Excentricidad de la descarga = 3 m
  - Altura de la tolva = 7.5 m
  - Diámetro superior de la tolva = 12 m
  - Diámetro inferior de la tolva = 1.5 m
  - Espesor de las paredes de la tolva = variable de 0.7 m (superior) a 0.4 m (inferior)

5.2.2 Determinación de cargas y presiones

Los datos de cargas y presiones que se calcularon para los modelos propuestos (figuras 4-1 y 4-2) se encuentran en forma resumida en las tablas 5-1 a la 5-5. Las tablas 5-1 a la 5-3 contienen la información para el análisis de los modelos estructurales de silos que tienen losa de fondo plana y diámetros de 12, 18 y 24 m, respectivamente. En estas tablas se proporcionan las cargas para las paredes y losa de fondo. Por otro lado, la información contenida en las tablas 5-4 y 5-5 corresponde a los modelos de silos con losa cónica concéntrica y excéntrica, respectivamente, en las cuales se dan cargas y presiones para la losa cónica solamente porque los datos que se requirieron para las paredes fueron los mismos que para el silo de 12 m de diámetro (tabla 5-1) debido a que se trata de la misma geometría de las paredes de estos silos con la única diferencia en la forma de la losa de fondo.

Presiones

Presión estática horizontal (p_{st}): Se utilizaron las fórmulas de Janssen y se calculó, primeramente, el factor k = (1-senρ)/(1+senρ) para un ángulo de fricción interna ρ = 25° con el que se obtuvo k = 0.406. La presión estática se determinó con la siguiente fórmula (ecuación 3-2):

$$p = \frac{\gamma R}{\mu'}\left[1 - e^{-\mu' k Y / R}\right]$$

Los datos de las presiones calculadas con esta fórmula se resumen en las tablas 5-1 a la 5-5, para los cinco modelos estudiados a diferentes profundidades Y.

Factor de sobrepresión (C_d): Siguiendo las recomendaciones del ACI 313 se determinó el factor de sobrepresión (C_d) de acuerdo con la tabla A-2 del apéndice A utilizando una altura $H1 = D \tan\rho$ correspondiente a la parte superior del silo, en donde el material se acumula siguiendo su ángulo de reposo, el resto de la altura del silo H se dividió en cuatro partes iguales, asignándose a cada segmento de altura, un factor diferente de sobrepresión en función de la relación H/D del silo. En las tablas 5-1 a la 5-5 se indican los factores C_d que se consideraron en cada modelo estudiado para diferentes profundidades Y.

Presión excéntrica ($pecc$): En los casos en que se tomó en cuenta la descarga excéntrica, la determinación de la presión excéntrica ($pecc$), se hizo siguiendo los criterios de Safarian (sección 3.4.6), considerado la máxima presión a diferentes profundidades Y sobre el ancho unitario de la pared del silo. Esta presión excéntrica se calculó con la siguiente fórmula:

$$pecc = pi - pH$$

donde;

$$pH = \frac{\gamma R}{\mu'}\left[1 - e^{-\mu' k H / R}\right] \text{ (para silo original)}$$

$$pi = \frac{\gamma Ri}{\mu'}\left[1 - e^{-\mu' k H / Ri}\right] \text{ (para silo imaginario)}$$

$H = 36$ m, $R = D/4$, $Ri = Di/4$ y

Di = diámetro de silo imaginario (ver figura 3-44).

El cálculo de estas presiones se resume en las tablas 5-1 a la 5-3 para los silos con losa plana. La tabla 5-1, también, contiene la información de estas presiones para el silo con losa cónica excéntrica.

Presión horizontal total ($pdes$): La presión horizontal total se obtuvo sumando la presión estática (pst) multiplicada por el factor de sobrepresión (Cd) más la presión excéntrica ($pecc$):

$$pdes = Cd \cdot pst + pecc$$

Los datos obtenidos para esta presión total también se incluyen en las tablas 5-1 a la 5-3.

Presiones en tolvas cónicas: Para el cálculo de la presión en las paredes inclinadas de las tolvas se utilizó la ecuación 3-20:

$$q\alpha, des = pdes \operatorname{sen}^2 \alpha + qdes \cos^2 \alpha$$

Estas presiones se incluyen en las tablas 5-4 y 5-5 para los silos con losa cónica concéntrica y excéntrica, respectivamente.

Cargas verticales

Fuerza de fricción: De acuerdo con el código ACI-313, la fuerza de fricción sobre las paredes de los silos se determinó utilizando la ecuación 3-21:

$$V = R[\gamma Y - 0.8q]$$

en la cual, q es la presión vertical que se obtiene utilizando las fórmulas de Janssen (ecuación 3-1). En las tablas 5-1 a la 5-3 se resumen los valores de estas fuerzas sobre las paredes de los silos de 12, 18 y 24 m de diámetro, respectivamente, para diferentes profundidades Y.

Cargas de peso propio y techo: También se consideró el peso propio de las paredes del silo y las cargas provenientes del sistema de techo que se indicaron en el capítulo 4 como datos de carga. En las tablas 8-1 a la 8-5 se resumen los datos de estas cargas, junto con los resultados de las acciones mecánicas, para los diferentes métodos de análisis.

5.3 Resultados de los análisis

Los resultados de los análisis, utilizando este método, se resumen en las tablas 8-1a la 8-5 para los cinco modelos estudiados y para profundidades Y a cada 6 m, junto con los resultados que se obtuvieron para los métodos II y III. La determinación de las acciones mecánicas y los resultados que se obtuvieron con el método I, se describen a continuación:

Fuerzas circunferenciales:

Para el cálculo de la fuerza circunferencial se utilizó la ecuación 5-7:

$$F = pdes\, D/2$$

El cálculo de estas fuerzas se resume en las tablas 8-1 a la 8-5 para las diferentes presiones actuantes (pst, $pecc$ y $pdes$) y a diferentes profundidades Y.

Fuerzas axiales

Las fuerzas axiales se obtuvieron sumando el peso propio de las paredes del silo, la fuerza de fricción generada por los materiales almacenados y las cargas provenientes del techo. Estas fuerzas totales, también se resumen en las tablas 8-1 a la 8-5.

Momentos flexionantes verticales

El momento flexionante vertical se determinó, solamente, en la conexión con la losa de fondo, considerando la base de la pared empotrada en esta unión, con la ecuación 5-15:

$$Mv = \left(1 - \frac{1}{\beta H}\right) \frac{pdes(D/2)h}{\sqrt{12(1-v^2)}}$$

En otros niveles del silo no se determinaron estos momentos, aunque se pudieran obtener siguiendo la teoría de placas y cascarones. Por otro lado, si se requiriese llegar a determinar un valor más preciso de estos momentos, se debe realizar un análisis de compatibilidad como se mencionó anteriormente.

Los resultados de los momentos flexionantes verticales en la base de las paredes de los silos, para las diferentes presiones actuantes, también se encuentran en las tablas 8-1 a la 8-5.

Momentos flexionantes horizontales

El momento flexionante horizontal en la conexión con la losa de fondo se determinó con la ecuación 5-18:

$$Mh = vMv$$

De la misma manera que para los momentos flexionantes verticales, los momentos horizontales, se determinaron únicamente en la conexión con la losa de fondo, por lo que tampoco, para el método I, se proporcionó información de ellos en otros niveles del silo. Los resultados de estos valores para las diferentes presiones actuantes se encuentran en las tablas 8-1a la 8-5.

Fuerzas en losa cónica

El cálculo de las fuerzas meridionales y tangenciales se incluye en las tablas 5-4 y 5-5 para los silos con losa cónica concéntrica y losa cónica excéntrica, respectivamente, para las cuales se utilizó las ecuaciones 5-22 y 5-23. Para el caso de la losa cónica excéntrica, su pendiente varía a lo largo de su circunferencia, por lo que en este caso, se seleccionó el ángulo de inclinación menor para obtener las fuerzas de tensión mayores para las diferentes profundidades de almacenamiento.

Fuerzas y momentos en losas planas

El diseño de las losas planas de fondo y de cimentación requiere un análisis independiente utilizando cualquier método que sea satisfactorio. Se considera inicialmente que estas losas están empotradas en su perímetro exterior en la conexión con las paredes; posteriormente, se tiene que realizar un análisis de compatibilidad, como se mencionó anteriormente, para evaluar los momentos finales que existen en dicha conexión. De esta manera, se puede decir que la influencia de las acciones mecánicas que se presentan en las losas de fondo sobre las paredes de los silos no se puede evaluar directamente con el método I, a menos que se realice el análisis de compatibilidad mencionado. Por otro lado, en esta tesis, no se incluye la comparación de las acciones mecánicas que se generan en estas losas, por lo que tampoco se incluye la determinación de las mismas.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS CON EL MÉTODO DE LA ANALOGÍA DE MARCOS

El método de analogía de marcos fue desarrollado por Priestley, para tanques cilíndricos de almacenamiento de líquidos o gases sujetos a cargas axisimétricas y cargas rotacionalmente no simétricas (Priestley, 1985). En el presente trabajo se aplicó su teoría para el análisis de silos circulares. Para fines comparativos, a este método se le llamó "**Método II**".

6.1 Descripción del método

6.1.1 Silos cilíndricos con cargas axisimétricas

En la introducción del capítulo anterior se describieron brevemente, las ecuaciones correspondientes para silos circulares con cargas axisimétricas. La ecuación 5-1 se desarrolló de los requerimientos de compatibilidad y de que las deformaciones radiales deben ser idénticas en todos los puntos. Este comportamiento puede describirse como la acción de una viga vertical básica, en donde las deformaciones radiales; además, están restringidas por la rigidez de la acción circunferencial. (Ver figura 5-1.)

La analogía de la viga sobre cimentación elástica se ha utilizado en el pasado para generar tablas de diseño. La flexión vertical de las paredes del silo se representan mediante la acción de viga y la rigidez radial elástica de la acción circunferencial y se representa por la rigidez de los resortes de la cimentación de Winkler.

Considerando una altura unitaria de la pared del silo sujeto a una presión p y libre por la acción en voladizo. De las consideraciones de simple estática, la expansión radial será:

$$y = \frac{pr^2}{hEc} \tag{6-1}$$

La figura 6-1 (a) muestra una longitud circunferencial unitaria del silo soportado por una cimentación horizontal de Winkler. Las deflexiones de esta cimentación bajo la presión p será:

$$y = p/k \tag{6-2}$$

donde k es el módulo de reacción.

De esta manera, la figura 6-1 (a) puede modelar exactamente el comportamiento de las paredes con el módulo de reacción dado por:

$$k = \frac{hEc}{r^2} \tag{6-3}$$

Un método más conveniente de simulación, capaz de modelar la variación del espesor de las paredes y cargas complejas, consiste en remplazar la cimentación continua de la figura 6-1 (a) mediante el sistema discretizado de la figura 6-1 (b), donde las paredes del silo se dividen en un número de elementos de viga vertical cuyos nudos conectados están soportados por "struts" laterales, con extremos articulados de una cimentación rígida.

Este sistema se puede resolver por un análisis de marcos simples. Los elementos de viga tendrían las propiedades de rigidez a flexión vertical de la sección transversal de la pared representada, mientras que las propiedades de los "struts" modelan la rigidez radial de la porción de la pared y se extienden desde la porción media entre nudos adyacentes como se muestra en las figuras 6-1 (b) y 6-1 (c) para paredes de sección variable.

Entonces, si se considera nuevamente un ancho unitario de pared circunferencial, la simulación de la rigidez circunferencial requiere:

$$y = \frac{2pr^2}{(h_1 + h_2)Ec} = \frac{p\Delta Yli}{AiEi} \tag{6-4}$$

Aquí, por conveniencia el módulo de elasticidad del "strut" Ei se toma igual al módulo de elasticidad del concreto Ec, entonces:

$$\frac{Ai}{li} = \frac{(h_1 + h_2)}{2r^2}\Delta Y \tag{6-5}$$

El área de la sección transversal Ai o la longitud li del "strut" pueden modificarse para obtener la similitud requerida. Las cargas aplicadas a la viga vertical deben ser proporcionadas con el ancho de la pared adoptado para el análisis (por ejemplo un ancho unitario). Los momentos flexionantes verticales, en las paredes del silo, se obtienen directamente de los momentos desarrollados en los elementos de viga y los esfuerzos circunferenciales se encuentran de los desplazamientos radiales, usando la ecuación 5-6.

Las cargas aplicadas a los elementos del marco corresponden a las cargas aplicadas al ancho de la pared modelada con la distribución real de cargas o presiones del silo.

6.1.2 Silos cilíndricos con cargas rotacionalmente no simétricas

No es común considerar que las cargas que no son rotacionalmente simétricas se puedan analizar con adecuada precisión mediante el uso de análisis simétrico rotacional. De interés particular es el caso de la carga sísmica que se muestra en la figura 6-2, en donde se ve la distribución de presiones inducidas sobre un silo cilíndrico.

La distribución circunferencial de presiones sigue una distribución cosenoidal con un incremento de presión máximo y un decremento ocurriendo en extremos opuestos del diámetro paralelo a la excitación del sismo. La distribución vertical de presión sobre las paredes en cualquier localización consiste de componentes de la respuesta impulsiva y convectiva del silo y su contenido. Los métodos para el cálculo de las magnitudes de esta distribución de presiones se han descrito por Housner. (Priestley, 1985.)

Para propósitos analíticos, es común aproximar la distribución de presiones de las figuras 6-2 (b) y 6-2 (c) mediante aproximación lineal como se muestra; sin embargo, parecería que es necesario analizar un cascarón completo para modelar la variación de la presión circunferencial. De hecho, una solución de suficiente precisión para esfuerzos máximos puede hacerse suponiendo la distribución de presión máxima p_P en la figura 6-2 (a) para distribuirse con simetría rotacional alrededor del silo. Esto es debido a que en la localización de la presión máxima, el intervalo de variación de la presión en la dirección circunferencial es pequeño y los esfuerzos inducidos por la distorsión del cascarón, resultantes de la diferencia de presión a lo largo de las generatrices adyacentes se descartan. Siendo este el caso, el método de la analogía de marcos puede utilizarse para la predicción de los esfuerzos máximos inducidos por las cargas sísmicas.

6.1.3 Silos con generatrices curvas

Es posible aplicar la simulación de la analogía de marcos a paredes no cilíndricas con una ligera modificación.

La figura 6-3 describe la simulación de un cascarón curvo de un silo elevado, mediante la analogía de marcos. En la figura 6-3(a) la pared está dividida en un número de elementos de viga meridionales rectos, los cuales llevarán cargas axiales, momentos flexionantes y cortantes. La rigidez radial del mecanismo de tensión circunferencial nuevamente se simula con "struts" de extremos articulados de rigidez axial equivalente.

En el desarrollo del método analítico para paredes cilíndricas en la sección anterior se adoptó un ancho circunferencial unitario de pared. Las consideraciones de simetría rotacional muestran que esto es inapropiado para paredes no cilíndricas, por lo que se requiere del uso de una sección angular de ángulo constante para la altura total de la pared. Cualquier ángulo ϕ puede utilizarse considerando que las cargas están basadas, también, en la misma sección angular.

Propiedades de las vigas

La figura 6-3 muestra un elemento típico de viga de longitud Lij y espesor variable de hi en el nudo i a hj en el nudo j. Para una sección angular de ϕ radianes, los anchos en i y en j serían:

$$bi = \phi ri \; ; \quad bj = \phi rj \tag{6-6}$$

donde ri y rj se refieren a los radios del centro de la pared en el nudo i y en el nudo j, respectivamente.

Las propiedades del elemento de viga son:

Momento de inercia:

$$Iij = \frac{1}{12}\left(\frac{bi + bj}{2}\right)\left(\frac{hi + hj}{2}\right)^3$$

Área de la sección transversal:

$$Aij = \left(\frac{bi + bj}{2}\right)\left(\frac{hi + hj}{2}\right)$$

Nótese que debido a la forma no cilíndrica, las fuerzas se desarrollan en la dirección circunferencial y meridional, haciendo esencial la simulación correcta de la viga.

Propiedades del "strut"

El "strut" radial j para los elementos de viga adyacentes ij y jk deben modelar la rigidez circunferencial de la mitad de la viga ij y la mitad de la viga jk. Colocando el módulo de elasticidad del "strut" igual al de la pared, el enfoque utilizado para desarrollar la ecuación 6-5, daría:

$$\frac{Aj}{lj} = \frac{1}{2}\left[\frac{bijhij}{rij^2}Lij + \frac{bjkhjk}{rjk^2}Ljk\right] \tag{6-7}$$

donde Aj y lj son el área y la longitud respectivamente, del "strut" en el nudo j y bij, hij, rij son el ancho, el espesor y el radio promedios del elemento ij, etc. Nótese que para $Lij = Ljk = \Delta Y$; $bij = bjk = 1$; y $rij = rjk = r$, la ecuación 6-7 se reduce a los valores dados en la ecuación 6-5 para un ancho circunferencial unitario de un cascarón cilíndrico de sección variable.

Cargas

Las cargas aplicadas en los elementos, como se muestra en la figura 6-4, deben estar basadas en el ancho del elemento adyacente a los nudos. Las cargas aplicadas provenientes de la presión de los materiales almacenados, actúan perpendicularmente al eje del elemento. La magnitud wij depende del ancho del elemento y la altura del material.

Las cargas térmicas requieren una consideración especial, debido a su importancia, como un caso de carga que genera esfuerzos. Se puede incluir los efectos de cambios de temperatura separándolos como se muestra en la figura 6-5, a través del espesor de la pared del silo como un promedio de cambio de temperatura θ_A, y una temperatura diferencial θ_D, con respecto a la temperatura libre de esfuerzos térmicos θ_r.

El método de análisis es similar al desarrollado por Priestley (Priestley, 1985) para fuerzas térmicas. Primeramente, las deformaciones asociadas con θ_A y θ_D se restringen y se calculan las fuerzas y momentos debidos a esta restricción térmica, posteriormente, se calculan sus esfuerzos correspondientes, pero estas fuerzas de restricción no estarán balanceadas por equilibrio interno, por lo que fuerzas iguales y opuestas a los valores desbalanceados deben aplicarse a la estructura y los esfuerzos resultantes del análisis bajo estas fuerzas deben agregarse a los esfuerzos de restricción para obtener el estado de esfuerzos finales.

Contracción y expansión

La influencia de la contracción y expansión sobre el estado de esfuerzos en paredes es similar a los efectos térmicos (Priestley, 1985). Si las paredes se contraen debido a la pérdida de humedad antes del llenado, habrá una tendencia hacia un movimiento interior, el cual será restringido en la base, a menos que la base sea libre a deslizarse. Para silos circulares la restricción será en forma de una reacción radial en la base hacia el exterior induciendo tensión circunferencial y flexión vertical en las partes inferiores de las paredes. Lo anterior puede usarse para calcular los esfuerzos inducidos en silos no cilíndricos. Generalmente, los esfuerzos de contracción influyen únicamente en la cuarta parte inferior de las paredes del silo y son mucho menores que los que resultan de los esfuerzos térmicos.

6.2 Análisis de los modelos

Los resultados que se obtuvieron con este método se determinaron con la ayuda de un programa de análisis de marcos en un plano (SAP 2000) de acuerdo con la geometría de las estructuras modeladas, en forma simplificada, de las figuras 6-6 a la 6-10 y según los criterios adoptados en este capítulo. Estos resultados se resumen en las tablas 8-1 a la 8-5 con la información que se describe en las siguientes secciones.

6.2.1 Discretización de los modelos

Para generar los modelos matemáticos con este método se seleccionó una franja vertical de pared del silo, cuya altura se dividió en 30 segmentos de 1.5 m de longitud, para todos los casos y, se seleccionó un ancho de pared de 1.178 y de 1.767 m para silos con diámetros de 12 y 18, respectivamente, considerando que la circunferencia del cilindro se dividió en 32 segmentos de los cuales se tomó uno de ellos para modelar, en forma simplificada, la estructura del silo. Para el caso del silo de 24 m de diámetro, el ancho de la pared se determinó dividiendo la circunferencia en 48 segmentos, quedando un ancho de 1.57 m para la franja modelada de este silo.

Las figuras 6-6, 6-7 y 6-8 muestran la geometría de los modelos estructurales de los silos de 12, 18 y 24 m de diámetro, respectivamente. En estas figuras los elementos verticales forman los segmentos de la pared del silo y los elementos horizontales representan la rigidez circunferencial equivalente del silo de acuerdo a la descripción del método. De una manera similar, la figura 6-9 muestra la geometría del modelo estructural del silo de 12 m de diámetro con losa cónica concéntrica y la figura 6-10, muestra el modelo para el silo de 12 m de diámetro con losa cónica excéntrica.

6.2.2 Datos generales de los modelos

Los datos geométricos de los modelos estudiados se describieron en el capítulo anterior (sección 5.2.1) con referencia a las figuras 4-1 y 4-2. Así mismo, los datos del material almacenado propuesto y las propiedades de los elementos estructurales, también, se mencionaron en la sección 4.2.1. Además de los datos anteriores, se utilizó la información relacionada propiamente con la geometría de los modelos estructurales que se consideraron para este método (ver figuras 6-6 a 6-10) en los que las paredes están empotradas en la losa de cimentación. Los datos adicionales que se utilizaron fueron los siguientes:

Silo con losa plana y $H/D = 3$
(Ver figura 6-6)

- Diámetro del silo $D = 12$ m
- Ancho de la pared (b) = 1.178 m
- Altura total = 45 m
- Número de segmentos en altura de la pared = 30
- Altura de cada segmento (ΔY) = 1.5 m
- Longitud (l_i) del "strut" típico = 6 m
- Espesor de la losa de fondo = 1.2 m
- Longitud (l_i) del "strut" de losa de fondo = 6 m
- Área (A_i) del "strut" típico (ec. 6-5): $A_i = \frac{h_{li}}{r^2} b\Delta Y = 0.0825 \text{ m}^2$
- Área (A_i) del "strut" de losa de fondo: $A_i = \frac{(6)(6)}{(6)^2} 1.178(1.2) = 1.4137 \text{ m}^2$

Silo con losa plana y H/D = 2
(Ver figura 6-7)

- Diámetro del silo D = 18 m
- Ancho de la pared (b) = 1.767 m
- Altura total = 45 m
- Número de segmentos en altura de la pared = 30
- Altura de cada segmento (ΔY) = 1.5 m
- Longitud (li) del "strut" típico = 9 m
- Espesor de la losa de fondo = 1.4 m
- Longitud (li) del "strut" de losa de fondo = 9 m
- Área (Ai) del "strut" típico (ec. 6-5): $Ai = \frac{hli}{r^2} b\Delta Y = 0.1325 \text{ m}^2$
- Área (Ai) del "strut" de losa de fondo: $Ai = \frac{(9)(9)}{(9)^2} 1.767(1.4) = 2.4738 \text{ m}^2$

Silo con losa plana y H/D = 1.5
(Ver figura 6-8)

- Diámetro del silo D = 24 m
- Ancho de la pared (b) = 1.5708 m
- Altura total = 45 m
- Número de segmentos en altura de la pared = 30
- Altura de cada segmento (ΔY) = 1.5 m
- Longitud (li) del "strut" típico = 12 m
- Espesor de la losa de fondo = 1.7 m
- Longitud (li) del "strut" de losa de fondo = 12 m
- Área (Ai) del "strut" típico (ec. 6-5): $Ai = \frac{hli}{r^2} b\Delta Y = 0.1375 \text{ m}^2$
- Área (Ai) del "strut" de losa de fondo: $Ai = \frac{(12)(12)}{(12)^2} 1.5708(1.7) = 2.67 \text{ m}^2$

Silo con losa cónica concéntrica y H/D = 3
(Ver figura 6-9)

Se consideraron las mismas propiedades para las paredes de este silo que para el silo con losa plana y H/D = 3, solamente se incluyeron, para este caso, las siguientes propiedades adicionales correspondientes a la losa cónica:

- Diámetro superior de la losa cónica D = 12 m
- Diámetro inferior de la losa cónica D = 1.5 m
- Altura de la losa cónica = 7.5 m

- La altura de la losa cónica se dividió en cinco anillos de 1.5 m de altura (longitud diagonal = 1.831 m), con forma de conos truncados divididos en 32 segmentos en su perímetro con diferentes anchos (b) y las longitudes de los "struts" varían en cada nivel, como se muestra en la figura 6-9:

  - Anillo 1 (superior): b prom =1.074 m, $h$prom = 0.67 m y Ai= 0.2296 m^2
  - Anillo 2: b prom = 0.868 m, $h$prom = 0.61 m y Ai= 0.209 m^2
  - Anillo 3: b prom = 0.663 m, $h$prom = 0.55 m y Ai= 0.187 m^2
  - Anillo 4: b prom = 0.455 m, $h$prom = 0.49 m y Ai= 0.164 m^2
  - Anillo 5 (inferior): b prom = 0.249 m, $h$prom = 0.43 m y Ai= 0.131 m^2

- El área del "strut" en la conexión de la tolva con las paredes del silo se consideró como el promedio de los dos segmentos de pared, arriba y debajo de este nivel, y el segmento de tolva que se conecta en este punto (Ai = 0.0825 + 0.1231 = 0.2056 m^2).
- Los "struts" de la pared del silo por debajo de la conexión con la losa de fondo se consideraron de una longitud li= 1.0 m, por lo que el área correspondiente Ai = 0.0137 m^2.

Silo con losa cónica excéntrica y H/D = 3
(Ver figura 6-10)

Al igual que en el modelo anterior, para este silo, se consideraron las mismas propiedades que para el silo con losa plana y H/D = 3, se incluyeron únicamente, para este caso, las siguientes propiedades adicionales correspondientes a la losa cónica excéntrica:

- Diámetro superior del la losa cónica D = 12 m
- Diámetro inferior del la losa cónica D = 1.5 m
- Altura de la losa cónica = 7.5 m
- De la misma manera que en el modelo anterior, la altura de la losa se dividió en cinco anillos de 1.5 m de altura (longitud diagonal mayor = 2.23 m) con forma de conos truncados divididos en 32 segmentos en su perímetro con diferentes anchos (b) y las longitudes de los "struts" varían en cada nivel, como se muestra en la figura 6-10:

  - Anillo 1 (superior): b prom =1.074 m, $h$prom = 0.67 m y Ai= 0.2796 m^2
  - Anillo 2: b prom = 0.868 m, $h$prom = 0.61 m y Ai= 0.255 m^2
  - Anillo 3: b prom = 0.663 m, $h$prom = 0.55 m y Ai= 0.228 m^2
  - Anillo 4: b prom = 0.455 m, $h$prom = 0.49 m y Ai= 0.20 m^2
  - Anillo 5 (inferior): b prom = 0.249 m, $h$prom = 0.43 m y Ai= 0.16 m^2

- El área del "strut" en la conexión de la tolva con las paredes del silo se consideró como el promedio de los dos segmentos de pared, arriba y debajo de este nivel, y el segmento de tolva que se conecta en este punto (Ai = 0.0825 + 0.15 = 0.2325 m^2).
- Los "struts" de la pared del silo por debajo de la conexión con la losa de fondo se consideraron, también, de una longitud li= 1.0 m, con la misma área Ai = 0.0137 m^2.

6.2.3 Determinación de cargas y presiones

Los datos de cargas que se requirieron para los modelos estructurales mostrados en las figuras 6-6 a 6-10, se resumen en las tablas 6-1 a la 6-5. Las tablas 6-1 a la 6-3 contienen la información para el análisis de los modelos de las figuras 6-6 a la 6-8 para silos que tienen losa de fondo plana y diámetros de 12, 18 y 24 m, respectivamente. En estas tablas se proporcionan las cargas para las paredes y la losa de fondo. Por otro lado, la información contenida en las tablas 6-4 y 6-5 corresponde a los modelos estructurales de las figuras 6-9 y 6-10 para silos con losa cónica concéntrica y excéntrica, respectivamente, en las cuales se dan cargas y presiones para la losa cónica solamente, porque los datos que se requirieron para las paredes de los silos fueron los mismos que para el silo de 12 m de diámetro (tabla 6-1 y figura 6-6) debido a que se trata de la misma geometría de las paredes de estos silos, con la única diferencia en la forma de la losa de fondo.

Presiones

Presión estática horizontal (pst): La forma en que se determinó esta presión estática fue igual que para el método I, sólo que para dar los datos de carga para el modelo estructural del método II, se consideró un ancho de pared del silo (b) por la que hay que multiplicar la presión (pst) obtenida con el método I y por la altura de cada segmento (ΔY) de pared de silo para obtener una fuerza concentrada en cada nudo del modelo.

Los datos de las presiones calculadas con esta fórmula se resumen en las tablas 6-1 a la 6-5, para los cinco modelos a diferentes profundidades Y.

Factor de sobrepresión (Cd): El coeficiente (Cd) del ACI 313 se obtuvo de la misma manera que para el método I, por lo que corresponden a los mismos valores indicados en las tablas 5-1 a la 5-5. En las tablas 6-1 a la 6-5 se incluyó nuevamente el valor ($Cd\ pst$) que se obtuvo con método I.

Presión excéntrica ($pecc$): En los casos en que se tomó en cuenta la descarga excéntrica, la determinación de la presión excéntrica ($pecc$), se hizo siguiendo los criterios de Safarian (sección 3.4.6), considerado la máxima presión a diferentes profundidades Y sobre el ancho de pared del silo (b) indicada en los modelos estructurales correspondientes. Esta presión excéntrica se calculó con la siguiente fórmula:

$$pecc = pi - pH$$

donde;

$$pH = \frac{\gamma R}{\mu'}\left[1 - e^{-\mu' k H / R}\right] \text{ (para silo original)}$$

$$pi = \frac{\gamma Ri}{\mu'}\left[1 - e^{-\mu' k H / Ri}\right] \text{ (para silo imaginario)}$$

$H = 36$ m, $R = D/4$, $Ri = Di/4$ y

Di = diámetro de silo imaginario (ver figura 3-44).

El cálculo de estas presiones, se resume en las tablas 6-1 a la 6-3 para los silos con losa plana. La tabla 6-1, también contiene la información de estas presiones para el silo con losa cónica excéntrica.

Presión horizontal total ($pdes$): La presión horizontal total se obtuvo, también, con los criterios de Safarian (sección 3.4.6) como sigue:

$$pdes = Cdpst + \frac{Y}{H - D} pecc$$

Los datos obtenidos para esta presión total, también se incluyen en las tablas 6-1 a la 6-3.

Presiones en tolvas cónicas: Para el cálculo de la presión en las paredes inclinadas de las tolvas se utilizó la ecuación 3-20:

$$q\alpha, des = pdes \operatorname{sen}^2 \alpha + qdes \cos^2 \alpha$$

Estas presiones se incluyen en las tablas 6-4 y 6-5 para los silos con losa cónica concéntrica y excéntrica, respectivamente. Además, para la determinación de estas fuerzas que se incluyeron en los modelos estructurales, se multiplicó la presión ($q\alpha, des$) por el ancho (b) y por (ΔY) y, después, se dividió en una fuerza vertical (Fy) y en una fuerza horizontal (Fx) que se muestran, también, en las tablas 6-4 y 6-5.

Cargas verticales

Fuerza de fricción: Esta fuerza de fricción, a lo largo de las paredes de los silos, se determinó de la misma manera que con el método I, utilizando la ecuación 3-21:

$$V = R\left[\gamma Y - 0.8q\right]$$

pero, para el método II se requirió dividirla entre la longitud del segmento (ΔY) y multiplicarla por el ancho (b) de la pared para obtener una fuerza concentrada en cada nudo del modelo. En las tablas 6-1 a la 6-3 se resumen los valores de estas fuerzas sobre las paredes de los silos de 12, 18 y 24 m de diámetro, respectivamente, para diferentes profundidades Y.

Cargas de peso propio y techo: También se consideraron las cargas del peso propio de las paredes de los silos y las cargas provenientes del sistema de techo, que se indicaron en el capítulo 4, como datos de carga. En las tablas 8-1 a la 8-5 se resumen los datos de estas cargas junto con los resultados de las acciones mecánicas para los diferentes métodos de análisis.

6.3 Resultados de los análisis

Los resultados de los análisis se resumen en las tablas 8-1 a la 8-5 para profundidades Y a cada 6 m junto con los resultados que se obtuvieron con los métodos I y III. La determinación de las acciones mecánicas y los resultados que se obtuvieron con el método II, se describen a continuación:

Fuerzas circunferenciales

Para el cálculo de la fuerza circunferencial se utilizó la siguiente ecuación:

$$Fcircunf = Fstrut\left(D\ 2\right)/b\Delta y$$

en donde $Fstrut$ es la fuerza axial que resulta del análisis de las estructuras modeladas en las figuras 6-6 a la 6-10.

El cálculo de estas fuerzas circunferenciales ($Fcircunf$) se resume en las tablas 8-1(a) a la 8-5(a) para las diferentes presiones actuantes (pst, $pecc$ y $pdes$) y a diferentes profundidades Y.

Fuerzas axiales

Las fuerzas axiales se obtuvieron sumando el peso propio de las paredes del silo, la fuerza de fricción generada por los materiales almacenados y las cargas provenientes del techo. Estas fuerzas totales, también, se resumen en las tablas 8-1(b) a la 8-5(b).

Momentos flexionantes verticales

Los valores de los momentos flexionantes verticales se obtuvieron directamente con los análisis de las estructuras modeladas de las figuras 6-6 a la 6-10. Los resultados de estos valores para las diferentes presiones actuantes se encuentran en las tablas 8-1(c) a la 8-5(c).

Momentos flexionantes horizontales

Los valores de los momentos flexionantes horizontales se obtuvieron solamente en la conexión de las paredes con la losa de fondo multiplicando la relación de Poisson (ν) por el momento flexionante vertical correspondiente. En el resto de la altura de las paredes del silo no fue posible determinar, directamente, el valor de los momentos flexionantes horizontales. Los resultados de estos valores para las diferentes presiones actuantes se encuentran en las tablas 8-1(c) a la 8-5(c).

Fuerzas en losa cónica

Las fuerzas meridionales en las losas cónicas se obtuvieron directamente con los resultados de los análisis de los modelos estructurales de las figuras 6-9 y 6-10 y las fuerzas tangenciales se calcularon de la misma manera que para las fuerzas circunferenciales ($Fcircunf$) obtenidas con este método. Las fuerzas máximas meridionales y tangenciales que se obtuvieron en la unión con las paredes del silo fueron las siguientes:

Para losa cónica concéntrica:

Fmu = 241295 Kg.
Ftu = 266268 Kg.

Para losa cónica excéntrica:

Fmu = 406250 Kg.
Ftu = 395618 Kg.

Fuerzas y momentos en losas planas

El diseño de las losas planas de fondo y de cimentación requiere un análisis independiente utilizando cualquier método que sea satisfactorio. Esta tesis, no contempla la comparación de las acciones mecánicas que se generan en estas losas, por lo que no se incluyó su determinación; sin embargo, con este método si se tomó en cuenta la influencia de las acciones mecánicas provenientes de la losa de fondo en la conexión con las paredes de los silos por la manera como se hizo la estructuración de los modelos, pero, no proporciona resultados confiables sobre los momentos flexionantes propios de esta losa y tampoco de los momentos flexionantes en la losa de cimentación debido a que las paredes del silo se consideran empotradas en esta última losa.

CAPÍTULO 7

ANÁLISIS CON EL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO

El Método del Elemento Finito involucra los principios del análisis de desplazamientos que requieren la determinación de las rigideces de las estructuras para la obtención de las fuerzas y desplazamientos con solución de matrices. El programa del SAP 2000 se utilizó en el análisis estructural de silos y, para fines comparativos, a este método se le denominó "**Método III**".

7.1 Descripción del método

El método del elemento finito se aplicó por primera vez a problemas de esfuerzo en el plano, usando elementos triangulares y rectangulares por R. H. Clough (Ghali, 1983). Desde entonces, el método se ha extendido y ahora se pueden usar elementos triangulares y rectangulares en la flexión de placas, elementos tetraédricos y hexaédricos en el análisis de esfuerzos tridimensional y elementos curvos en problemas de cascarones con una o dos curvas. El campo de aplicaciones también se ha ampliado a problemas de vibración y estabilidad.

Para resolver una estructura con el método del Elemento Finito es necesario convertir lo continuo en discreto, es decir, transformarlo en un sistema con un número finito de incógnitas de modo que el problema se pueda resolver numéricamente. Se adopta el siguiente procedimiento:

a) Se divide el cuerpo continuo en elementos finitos de dos o tres dimensiones con líneas o superficies ficticias. Es claro que el método es eminentemente adecuado para cuerpos con propiedades no homogéneas o con geometría compleja e irregular.

b) Se supone que los elementos están interconectados en un número discreto de puntos nodales, situados sobre los límites de los elementos. El número de grados de libertad de cado nudo, que se conoce como parámetros de desplazamiento nodal, normalmente se refiere a los desplazamientos y sus primeras derivadas parciales (rotaciones) en los nudos, pero también puede incluir otros términos tales como esfuerzos, deformaciones, segundas derivadas parciales (curvaturas), etc. No todos los parámetros de desplazamientos nodales tienen fuerzas nodales generalizadas correspondientes en la relación de rigidez; es decir, si bien un desplazamiento lateral corresponde a una fuerza y una rotación a un par, no se puede definir cantidades físicas correspondientes para deformación, curvatura, etc.

c) Se selecciona una función de desplazamiento, en función de los parámetros de desplazamiento nodal, para representar el campo de desplazamiento dentro de cada elemento. La función de desplazamiento debe tener el mismo número de constantes desconocidas que el número total de grados de libertad del elemento, también debe permitir que el elemento soporte un movimiento de cuerpo rígido sin ninguna deformación interna. Además, la función de desplazamiento debe poder representar estados de esfuerzos o deformaciones constantes (curvatura o momento en flexión de placas); de otro modo, los esfuerzos no convergerán a una función continua si se usan elementos progresivamente más pequeños en la idealización de la estructura y debe satisfacer la compatibilidad de desplazamientos a lo largo de límites con elementos adyacentes, en otras palabras, los valores de las funciones, y algunas veces sus primeras derivadas parciales, deben ser continuas a lo largo de los límites.

Una vez que se ha determinado la función de desplazamiento, es posible obtener todas las deformaciones y esfuerzos dentro del elemento y formular una matriz de rigidez y una matriz de carga consecuente, usando el principio del trabajo virtual o el principio de energía potencial mínima total. Esta matriz de carga consecuente representa las fuerzas nodales equivalentes que sustituyen la acción de las cargas distribuidas externas y dependen de la función de desplazamiento que se utilice (Ghali, 1983).

Se han desarrollado varios paquetes de programas o sistemas en que las matrices de rigidez de muchos elementos diferentes se incorporan como subrutinas, y cualquiera de éstas o una combinación de ellas se puede usar cuando surge la necesidad. Por lo tanto, el método de Elemento Finito constituye una herramienta extremadamente útil en el análisis de esfuerzos de grandes estructuras y problemas complejos.

Generalmente, los datos de entrada que se proporcionan a los programas de análisis parten de un diagrama esquemático de la estructura con sus ejes y cargas globales, con la numeración de todos los nudos y elementos con sus ejes locales, de esta manera es posible alimentar el programa con las coordenadas de todos los nudos, las propiedades elásticas y geométricas de todos los elementos y sus conexiones con los nudos correspondientes, las cargas y los desplazamientos prescritos de ciertos nudos.

Programa de análisis y diseño SAP 2000

El programa del SAP 2000 es una herramienta muy poderosa para el análisis y diseño de estructuras; es muy rápido y sencillo, en lo que se refiere a la generación de los datos de entrada.

Algunas de las características del programa de análisis del SAP 2000 son:

- Análisis estático y dinámico.
- Análisis lineal y no lineal, incluyendo análisis sísmico.
- Análisis de carga viva vehicular.
- Análisis P-Delta
- Elementos estructurales tipo marco y cascarón, incluyendo vigas, columnas, armaduras y comportamiento de placa y membrana.
- Elementos en dos y tres direcciones y elemento sólido axisimétrico.
- Elementos no lineales y resortes.
- Sistema de coordenadas múltiple.
- Una amplia variedad de opciones de carga.

Los siguientes pasos son necesarios para el análisis y diseño de una estructura usando el programa SAP 2000:

a) Crear o modificar un modelo que numéricamente define la geometría, propiedades, cargas y los parámetros de análisis para la estructura.

b) Ejecutar y analizar el modelo.

c) Revisar los resultados del análisis.

d) Revisar el diseño de la estructura.

Generalmente, este es un proceso iterativo que puede involucrar muchos ciclos de acuerdo con la secuencia mencionada arriba.

La generación del modelo es sencilla y permite definir un gran número de nudos y elementos usando los comandos de especificación de datos del programa. También de manera similar se pueden especificar las propiedades de los materiales, las secciones de los elementos tipo marco y cascarón, las cargas, las combinaciones de carga, las restricciones, etc.

Para el caso particular del elemento tipo cascarón, que es el caso típico que se utilizará para el análisis de silos, los elementos se pueden generar con tres o cuatro nudos, o sea, pueden ser elementos planos triangulares o rectangulares. En cada nudo se consideran seis grados de libertad. (Tres desplazamientos y tres rotaciones.)

Las estructuras que se pueden modelar con los elementos tipo cascarón, incluyen:

- Cascarones en tres dimensiones, tales como silos, tanques o domos.
- Estructuras tipo placa, como losas de piso.
- Estructuras tipo membrana, tales como los muros de cortante.

Cada elemento tipo cascarón tiene su propio sistema de coordenadas locales para la definición de las propiedades de los materiales, cargas y para la interpretación de los resultados. A cada elemento se le pueden aplicar cargas uniformes en cualquier dirección, o con presión superficial en la parte superior, en el fondo y en las caras laterales; y con cargas debidas a los cambios de temperatura.

La configuración de los elementos que se utilizarán en la estructura de los silos se muestran en la figura 7-1, en la cual se indica la localización de los ejes locales y la dirección de las cargas y momentos que se obtienen del análisis.

La descripción completa de los elementos tipo cascarón y la forma de incluir las propiedades, secciones y los datos de carga, se indican en el manual de referencia del programa SAP 2000.

7.2 Análisis de los modelos

Los resultados que se obtuvieron con este método se determinaron con la ayuda del programa de análisis SAP 2000 utilizando elementos finitos tipo cascarón para paredes y losas como lo muestra la geometría de las estructuras modeladas en las figuras 7-2 a la 7-8 y con los criterios adoptados en este capítulo. Estos resultados se resumen en las tablas 8-1 a la 8-5 con la información que se describe en las siguientes secciones.

7.2.1 Discretización de los modelos

Para generar los modelos matemáticos, utilizando este método, en todos los casos, la altura de las paredes se dividió en 30 segmentos de 1.5 m de longitud y, alrededor de su circunferencia, los silos con diámetros de 12 y 18 m se dividieron en 32 segmentos, quedando anchos de 1.178 y 1.767 m, respectivamente. Para el caso del silo de 24 m de diámetro, su circunferencia se dividió en 48 segmentos dando anchos de 1.57 m.

La geometría de los modelos estructurales, analizados con el método III, se muestra en las figuras 7-2 a la 7-8. En la figura 7-2 se muestra, en forma tridimensional, la estructura de un silo de 12 m de diámetro por 45 m de altura modelada con elementos finitos utilizando el programa SAP 2000. En esta figura, se muestra la división de los segmentos del silo, mencionada anteriormente. En la figura 7-3 se muestra la planta de la losa de cimentación y en la figura 7-4 se muestra la planta de la losa de fondo plana, modeladas con el mismo programa.

De manera similar, los silos con diámetros de 18 y 24 m están modelados con el mismo programa SAP 2000. Las figuras 7-5 y 7-6 muestran la geometría de la porción inferior de la estructura de los silos de 18 y 24 m de diámetro con losa plana, mientras que las figuras 7-7 y 7-8 muestran, también, la porción inferior de la estructura de los silos de 12 m de diámetro con losa cónica concéntrica y excéntrica, respectivamente.

7.2.2 Datos generales de los modelos

Los datos geométricos de los modelos estudiados se describieron en el capítulo cinco (sección 5.2.1) y con referencia a las figuras 4-1 y 4-2. Así mismo, los datos del material almacenado propuesto y las propiedades de los elementos estructurales, también, se mencionaron en la sección 4.2.1. Además de los datos anteriores, también se necesitó información relacionada propiamente con la geometría de los modelos estructurales mostrados en las figuras 7-2 a 7-8. Los datos adicionales que se requirieron, para este método, fueron los siguientes:

Silo con losa plana y H/D **= 3**
(Ver figura 7-2)

- Diámetro del silo D = 12 m
- Número de segmentos en perímetro = 32
- Ancho de un segmento de circunferencia = 1.178 m
- Altura total = 45 m
- Número de segmentos en altura de las paredes = 30
- Longitud de un segmento de altura = 1.5 m
- Espesor de la losa de fondo = 1.2 m
  (ver geometría de elementos finitos en figura 7-3)
- Espesor de la losa de cimentación = 1.2 m
  (ver geometría de elementos finitos en figura 7-4)

Silo con losa plana y H/D **= 2**
(Ver figura 7-5)

- Diámetro del silo D = 18 m
- Número de segmentos en perímetro = 32
- Ancho de un segmento de circunferencia = 1.767 m
- Altura total = 45 m
- Número de segmentos en altura de las paredes = 30
- Longitud de un segmento de altura = 1.5 m
- Espesor de la losa de fondo = 1.4 m
- Espesor de la losa de cimentación = 1.4 m
- 8 columnas de 1.2 m de diámetro
  (ver geometría de elementos finitos de losas y columnas en figura 7-5)

Silo con losa plana y H/D = 1.5
(Ver figura 7-6)

- Diámetro del silo D = 24 m
- Número de segmentos en perímetro = 48
- Ancho de un segmento de circunferencia = 1.5708 m
- Altura total = 45 m
- Número de segmentos en altura de las paredes = 30
- Longitud de un segmento de altura = 1.5 m
- Espesor de la losa de fondo = 1.7 m
- Espesor de la losa de cimentación = 1.7 m
- 8 columnas de 1.5 m de diámetro
  (ver geometría de elementos finitos de losas y columnas en figura 7-6)

Silo con losa cónica concéntrica y H/D = 3
(Ver figura 7-7)

Se consideraron las mismas propiedades para las paredes de este silo, que para el silo con losa plana y H/D = 3, solamente se incluyeron, para este caso, las propiedades adicionales correspondientes a la losa cónica.

- Diámetro superior de la losa cónica D = 12 m
- Diámetro inferior de la losa cónica D = 1.5 m
- Altura de la losa cónica = 7.5 m
- La distribución de elementos finitos para esta losa cónica se muestra en la figura 7-7 en las que se tienen elementos de 1.831 m en forma diagonal (proyección vertical = 1.5 m) y la división circunferencial fue de 32 segmentos con la que se obtuvieron los siguientes anchos y espesores promedio para las cinco diferentes alturas:

  - Anillo 1 (superior): b prom = 1.074 m y h prom = 0.67 m
  - Anillo 2: b prom = 0.868 m y h prom = 0.61 m
  - Anillo 3: b prom = 0.663 m y h prom = 0.55 m
  - Anillo 4: b prom = 0.455 m y h prom = 0.49 m
  - Anillo 5 (inferior): b prom = 0.249 m y h prom = 0.43 m

Silo con losa cónica excéntrica y $H/D = 3$
(Ver figura 7-8)

Se consideraron las mismas propiedades para las paredes de este silo, que para el silo con losa plana y $H/D = 3$, solamente se incluyeron, para este caso, las propiedades adicionales correspondientes a la losa cónica.

- Diámetro superior de la losa cónica $D = 12$ m
- Diámetro inferior de la losa cónica $D = 1.5$ m
- Excentricidad de la descarga = 3 m
- Altura de la losa cónica = 7.5 m
- La distribución de elementos finitos para esta losa cónica se muestra en la figura 7-8, en donde se ven diferentes longitudes diagonales de elementos, siendo los más grandes de 2.23 m con una proyección típica vertical de 1.5 m y la división circunferencial fue de 32 segmentos con la que se obtuvieron los siguientes anchos y espesores promedio para las cinco diferentes alturas:

  - Anillo 1 (superior): b prom = 1.074 m y $h$prom = 0.67 m
  - Anillo 2: b prom = 0.868 m y $h$prom = 0.61 m
  - Anillo 3: b prom = 0.663 m y $h$prom = 0.55 m
  - Anillo 4: b prom = 0.455 m y $h$prom = 0.49 m
  - Anillo 5 (inferior): b prom = 0.249 m y $h$prom = 0.43 m

7.2.3 Determinación de cargas y presiones

Los datos de cargas que se necesitaron para los modelos estructurales mostrados en las figuras 7-2 y 7-5 a 7-8, se indican en forma resumida en las tablas 7-1 a la 7-5. Las tablas 7-1 a la 7-3 contienen la información para el análisis de los modelos de las figuras 7-2, 7-5 y 7-6 correspondientes a los silos que tienen losa de fondo plana y diámetros de 12, 18 y 24 m, respectivamente. En estas tablas, se proporcionan las cargas para las paredes y la losa de fondo. Por otro lado, la información contenida en las tablas 7-4 y 7-5 corresponde a los modelos estructurales de las figuras 7-7 y 7-8 para silos con losa cónica concéntrica y excéntrica, respectivamente, en las cuales se dan cargas y presiones para la losa cónica solamente, porque los datos que se requirieron para las paredes de los silos fueron los mismos que para el silo de 12 m de diámetro (tabla 7-1 y figura 7-2) debido a que se trata de la misma geometría de las paredes de estos silos, con la única diferencia en la forma de la losa de fondo.

Presiones

Presión estática horizontal (pst): La forma en que se determinaron estas presiones fue igual que para el método I y los datos de cargas se presentan nuevamente en las tablas 7-1 a la 7-5 para los cinco modelos estudiados a diferentes profundidades Y.

Factor de sobrepresión (Cd): El coeficiente (Cd) del ACI 313 se obtuvo de la misma manera que para el método I, por lo que, corresponden a los mismos valores indicados en las tablas 5-1 a la 5-5. En las tablas 7-1 a la 7-5 se incluyen los valores ($Cd\ pst$) que se obtuvieron con método I.

Presión excéntrica ($pecc$): En los casos en que se tomó en cuenta la descarga excéntrica, la determinación de la presión excéntrica ($pecc$), se hizo de la misma manera que el método II (ver sección 6.2.2), pero considerado la distribución de presiones alrededor de la circunferencia del silo, de acuerdo a como se indicó en la sección 3.4.6 y para diferentes profundidades Y. Esta presión excéntrica se calculó con la siguiente fórmula:

$$pecc = pi - pH$$

donde;

$$pH = \frac{\gamma R}{\mu'}\left[1 - e^{-\mu' k H\ R}\right] \text{ (para silo original)}$$

$$pi = \frac{\gamma Ri}{\mu'}\left[1 - e^{-\mu' k H\ Ri}\right] \text{ (para silo imaginario)}$$

$H = 36$ m, $R = D/4$, $Ri = Di/4$ y

Di = diámetro de silo imaginario (ver figura 3-44).

La presión excéntrica alrededor de la circunferencia del silo se obtuvo con:

$$p'ecc = pecc \cos\zeta$$

El cálculo de estas presiones, se resume en las tablas 7-1 a la 7-3 para los silos con losa plana. La tabla 7-1, también contiene la información de estas presiones para el silo con losa cónica excéntrica.

Presión horizontal total ($pdes$): La presión horizontal total se obtuvo, también, con los criterios de Safarian (sección 3.4.6) como sigue:

$$pdes = Cdpst + \frac{Y}{H - D} p'ecc$$

Los datos obtenidos para esta presión total, también se incluyen en las tablas 7-1 a la 7-3.

Presiones en tolvas cónicas: Para el cálculo de la presión en las paredes inclinadas de las tolvas se utilizó la ecuación 3-20:

$$q\alpha,des = pdes\,\mathrm{sen}^2\alpha + qdes\cos^2\alpha$$

Estas presiones se incluyen en las tablas 7-4 y 7-5 para los silos con losa cónica concéntrica y excéntrica, respectivamente.

Cargas verticales

Fuerza de fricción: Esta fuerza de fricción, sobre las paredes de los silos, se determinó de la misma manera que con el método I utilizando la ecuación 3-21:

$$V = R[\gamma Y - 0.8q]$$

En las tablas 7-1 a la 7-3 se resumen los valores de estas fuerzas, sobre las paredes de los silos de 12, 18 y 24 m de diámetro, respectivamente, para diferentes profundidades Y.

Cargas de peso propio y techo: También se consideraron las cargas de peso propio de las paredes de los silos y las cargas provenientes del sistema de techo que se indicaron en el capítulo 4, como datos de carga. En las tablas 8-1 a la 8-5, se resumen los datos de estas cargas, junto con los resultados de las acciones mecánicas para los diferentes métodos de análisis.

7.3 Resultados de los análisis

El análisis de los modelos estructurales se realizó considerando la división de elementos finitos, como se mencionó anteriormente, pero para fines ilustrativos, se seleccionaron los elementos que proporcionan los resultados más críticos (segmentos de pared alineadas con la descarga, eje y) y se resumen solamente para profundidades Y a cada 6 m. Los resultados que se obtuvieron se presentan en las tablas 8-1 a la 8-5 junto con los resultados que se obtuvieron con los métodos I y II. La determinación de las acciones mecánicas y los resultados que se obtuvieron con el método III, se describen a continuación:

Fuerzas circunferenciales:

Estas fuerzas se obtuvieron directamente de los resultados de los análisis utilizando el programa SAP2000, en donde los valores designados como F11 (ver figura 7-1), representan las fuerzas circunferenciales en las paredes de los silos que se muestran en las tablas 8-1(a) a la 8-5(a) para las diferentes presiones actuantes (pst, $pecc$ y $pdes$) y a diferentes profundidades Y.

Fuerzas axiales

También, estas fuerzas se obtuvieron de los análisis de los modelos en los que los valores designados como F22 (ver figura 7-1), por el programa SAP2000, representan las fuerzas axiales en las paredes de los silos y se resumen en las tablas 8-1(b) a la 8-5(b) para diferentes profundidades Y.

Momentos flexionantes verticales

Los momentos flexionantes verticales designados como M22 (ver figura 7-1), también se obtuvieron directamente con el análisis de las estructuras y los resultados de estos valores, para diferentes presiones actuantes y a diferentes profundidades Y, se resumen en las tablas 8-1(c) a la 8-5(c).

Momentos flexionantes horizontales

Al igual que los momentos flexionantes verticales, los momentos horizontales designados como M11 (ver figura 7-1), también se obtuvieron directamente con el análisis de las estructuras y, los resultados de estos valores, para diferentes presiones actuantes y a diferentes profundidades Y, se encuentran en forma resumida en las tablas 8-1(c) a la 8-5(c).

Fuerzas en losa cónica

Las fuerzas en las losas cónicas se obtuvieron directamente con los resultados de los análisis de los modelos estructurales en las que las fuerzas designadas como F11 representan las fuerzas tangenciales y las designadas por F22 representan las fuerza meridionales (ver figura 7-1(c)). Las fuerzas máximas meridionales y tangenciales, que se obtuvieron en la unión con las paredes del silo, fueron las siguientes:

Para losa cónica concéntrica:

Fmu = 187000 Kg.
Ftu = 244084 Kg.

Para losa cónica excéntrica:

Fmu = 287124 Kg.
Ftu = 344296 Kg.

Fuerzas y momentos en losas planas

Las losas planas de fondo y de cimentación se incluyeron en los análisis de los cinco modelos estructurales propuestos. Los valores de los momentos flexionantes alrededor del eje x se representan, por el programa SAP2000, como M22 (ver figura 7-1(b)) y los de los momentos flexionantes alrededor del eje y se representan por M11. Esta tesis, no incluyó la comparación de las acciones mecánicas que se generan en estas losas; pero la influencia de éstas sobre las paredes, sí se tomó en cuenta en los análisis resultantes de este método.