



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería Ingeniería Civil



Análisis de fallas en cimentaciones para silos

TESIS:

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
PRESENTA

Claudia Reyes Martínez

DIRECTOR DE TESIS: M. EN I. GABRIEL MORENO PECERO



JUNIO 2013



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/189/12

Señorita
CLAUDIA REYES MARTÍNEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. GABRIEL MORENO PECERO, y que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted conforme a la opción I. "Titulación mediante tesis o tesina y examen profesional", para obtener su título de INGENIERO CIVIL.

"ANÁLISIS DE FALLAS EN CIMENTACIONES PARA SILOS"

- INTRODUCCIÓN
- I. MECANISMOS DE FALLA EN CIMENTACIONES
- II. SILOS
- III. FALLAS EN SILOS
- IV. ACCIONES DE DISEÑO
- V. CIMENTACIONES DE SILOS
- VI. FALLAS EN CIMENTACIONES DE SILOS
- VII. RECOMENDACIONES
- VIII. CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFÍA

Pecero
VoBo
21-MAYO-2013

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Reyes Martínez
VoBo
21-MAYO-2013
KB

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 17 de mayo del 2013.
EL PRESIDENTE DEL COMITÉ.

JLS
M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ
JTS/MTH.rvth

Vo.Bo.
Rodrigo R. Padilla V.

Reyes
G. Moreno Pecero
21 de Mayo/2013.

VoBo
Yanf

AGRADECIMIENTOS

Por medio del presente quiero agradecer a las personas que me han acompañado durante esta trayectoria:

A mis padres Teresa y Jorge:

Por creer en mí, por brindarme su apoyo incondicional y por transmitirme lo mejor de sí. Espero poder devolverles un poco de lo mucho que me han dado.

A mis hermanos Nayeli, Omar, Jessica y Usiel

Por ser mi inspiración para ser una mejor persona. Deseo verlos realizar todos sus sueños y aspiraciones.

A mis tíos y tías: Paula, Norma, Lorena, Juan y Armando

Gracias por su cariño y apoyo moral.

A mis amigos en TASIJI: Susy, Jessy, Hugo y Alejandra

Gracias por su amistad y apoyo mientras trabajamos juntos. Siempre los recuerdo con mucho cariño.

A don Luis:

Gracias por abrirme las puertas de su casa y de su empresa. Siempre será un amigo para mí.

A mi director de Tesis, M.I Gabriel Moreno Pecero:

Por sus enseñanzas en el aula y por su tiempo y dedicación en la realización de este trabajo.

A mis sinodales :

M.I. Ricardo Rubén Padilla Velázquez

Ing. Sergio Carlos Crail Corzas

Ing. German López Rincón

Ing. Josué Garduño Chávez

Por su tiempo y ayuda en la revisión de ésta tesis.

En General, a todos mis profesores:

Por todo el conocimiento transmitido y por el valioso tiempo dedicado en las aulas.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** y a mi querida **Facultad de Ingeniería** :

Por la formación que me ha dado y por hacerme ver el mundo con otros ojos.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
1. MECANISMOS DE FALLA EN CIMENTACIONES.....	3
1.1 Estados Límite de Falla	
1.2 Estados Límite de Servicio	
1.3 Evaluación de los Estados Límite	
2. SILOS.....	7
2.1 Tipos de silos	
3. FALLAS EN SILOS.....	17
3.1 Fallas por error de diseño	
3.2 Fallas por error de construcción	
3.3 Fallas por mal uso	
4. ACCIONES DE DISEÑO.....	25
4.1 Viento	
4.2 Sismo	
4.3 Llenado y vaciado de silos	
4.4 Explosiones en silos	
5. CIMENTACIONES PARA SILOS.....	34
5.1 Tipos de cimentaciones para silos	
6. FALLAS EN CIMENTACIONES DE SILOS.....	42
6.1 Silo de concreto armado en Transcona Canadá	
6.2 Silo de concreto armado en Portland City, USA	
6.3 Silo metálico multicelular en Lérida, España	
6.4 Silo para almacenamiento de granos en Szolnok, Hungría	
6.5 Otros casos	
7. RECOMENDACIONES.....	80
7.1 Selección del tipo de cimentación	
7.2 Verificación de la seguridad de las cimentaciones	
CONCLUSIONES.....	88
BIBLIOGRAFÍA.....	90
GLOSARIO.....	92

INTRODUCCIÓN

La idea de realizar una tesis sobre cimentaciones para silos surgió de una inquietud presentada durante el inicio del ejercicio profesional, dónde conocí la construcción de cimentaciones en forma de anillos para tanques y silos.

Los silos son estructuras de almacenamiento a granel, los cuales pueden contener diversos tipos de materiales, lo cual es un factor determinante para el análisis de las condiciones de trabajo de estas estructuras. Se encuentran sujetas a diversas condiciones de carga (cargas estáticas y dinámicas), teniendo como resultado diferentes modos de falla. La falla de un silo puede ser devastadora, va desde la pérdida del contenedor, del material almacenado, del daño de estructuras vecinas, hasta la pérdida de vidas humanas.

Un silo puede presentar fallas en su estructura o en su cimentación. Algunas de las fallas en su estructura se deben a: incendios y explosiones, sobrepresiones de llenado y vaciado, corrosión y deterioro. Mientras que las fallas en su cimentación pueden presentarse debido a: condiciones del suelo (suelo inestable, vencimiento de la capacidad de carga, etc.), sismos y errores de construcción.

Por lo anterior se concluye que de las diversas características a cuidar en cuanto a la construcción de un silo y de cualquier estructura en sí, una de las más importantes es la que se refiere a **los cimientos**, por tratarse de la *estructura de apoyo e interacción entre el suelo y la estructura* y porque de ella depende en mayor porcentaje la seguridad de la superestructura.

Los defectos o fallas de una cimentación rara vez son visibles inmediatamente, sino que varias veces son aparentes hasta que la construcción se encuentra en uso, momento en el cual una reparación resulta ser más costosa.

Por otra parte, la falla de una cimentación puede ser de tal naturaleza que una reparación sea imposible, en tal caso la pérdida puede exceder no solo el costo de la cimentación sino de la superestructura.

En su libro “Fallas en Fundaciones”, el Prof. Ing. C. Szechy nos dice que: Cuando una falla es producto de un intento por economizar en el costo de la cimentación, la pérdida, en los casos registrados, ha sido varias veces el ahorro que el proyectista o el constructor trato de efectuar.

Cabe mencionar que el proyecto de Cimentaciones no es una ciencia exacta y que la misma teoría no se puede aplicar a todos los problemas que se puedan presentar debido a la diversa naturaleza de los suelos ya sea en diferentes lugares y aún en un mismo lugar, ya que el suelo es un material de propiedades inciertas y no uniformes.

En el presente trabajo, nos enfocaremos en el estudio de los modos de falla de algunas cimentaciones para éste tipo de estructuras con la finalidad de ofrecer algunas recomendaciones que permitan contrarrestar la ocurrencia de falla, haciendo uso de las consideraciones tanto *Geotécnicas* como *Estructurales* necesarias para realizar el diseño de una cimentación para silos.

Los silos tienen presencia desde las plantas cementeras, plantas de proceso industrial, incluso en los puertos marítimos, donde se utilizan como auxiliares para el manejo de grandes cantidades de materiales que se procesan para crear productos nuevos, como para la comercialización de materias primas que se importan o exportan.

En nuestro país hay pocas empresas que se dedican a la construcción de silos (cuando son de concreto) o suministro (cuando se trata de silos metálicos), por lo cual puede vislumbrarse una oportunidad de desarrollo de la Ingeniería Civil en un campo laboral distinto a las diversas especialidades de la Mecánica de Suelos y la Ingeniería Estructural.

1. MECANISMOS DE FALLA EN CIMENTACIONES

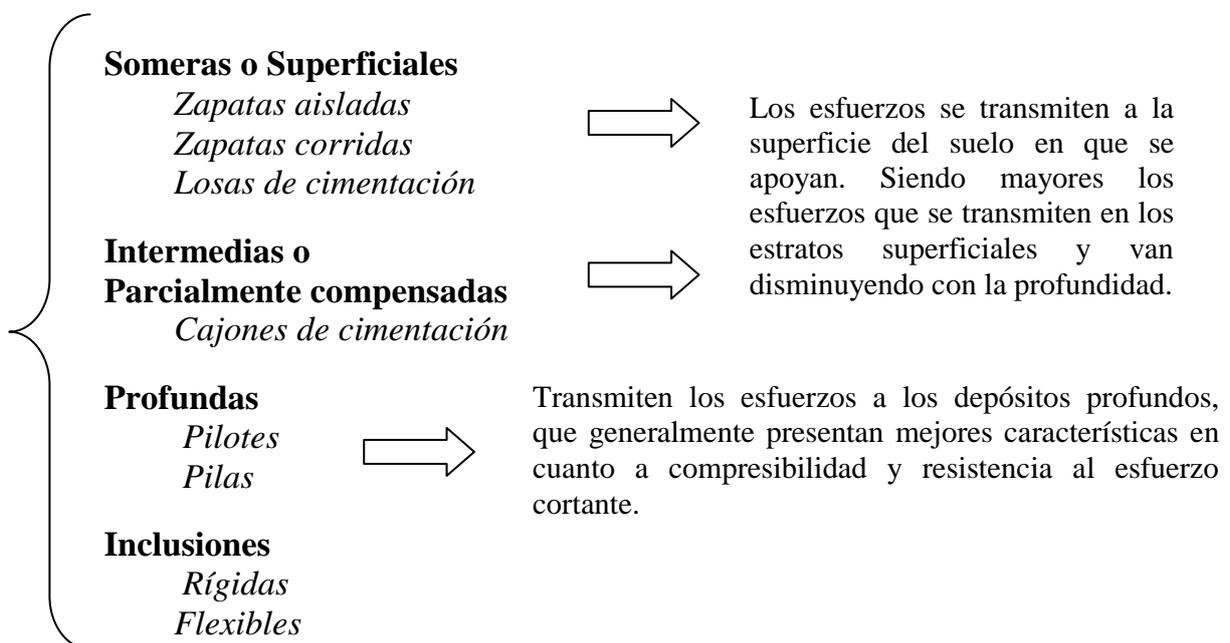
Una parte primordial de toda obra civil son las **Cimentaciones**, elementos que permiten transmitir las cargas al terreno de apoyo, por lo que son elementos importantes en la estabilidad de la superestructura.

Una falla en la cimentación pone en peligro toda superestructura, aunque ésta última sea bien proyectada y bien construida.

Toda cimentación puede fallar porque el suelo o la roca en que se apoya sean incapaces de soportar la carga transmitida, este comportamiento se relaciona con la resistencia del suelo o roca de apoyo y es conocido como *falla por capacidad de carga*.

Por otra parte el suelo o roca de apoyo pueden no fallar, pero el asentamiento diferencial de la estructura puede ser tan grande que la estructura puede agrietarse o dañarse, este tipo de falla se refiere a las características de la relación esfuerzo-deformación del suelo o roca y se conoce como *asentamiento perjudicial*.

Para proseguir con el análisis de los principales mecanismos de falla es importante establecer los tipos de cimentaciones:



El ingeniero utiliza diferentes parámetros para cumplir con las normativas locales vigentes en cuanto a la resistencia y deformabilidad de una estructura. El Reglamento de Construcciones del Distrito Federal los define como *estados límite*.

Los **estados límite** son parámetros que ayudan a determinar el buen comportamiento de una estructura. De acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias Sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones del Distrito Federal, se alcanza un **estado límite de comportamiento** en una construcción *cuando se presenta una combinación de fuerzas, desplazamientos, niveles de fatiga, o varios de ellos, que determinan el inicio o la ocurrencia de un modo de comportamiento inaceptable de dicha construcción.*

1.1 Estados Límite de Falla

De acuerdo al Reglamento de Construcciones del Distrito Federal los Estados Límite de Falla *se refieren a modos de comportamiento que ponen en peligro la estabilidad de la construcción o de una parte de ella, o su capacidad para resistir nuevas aplicaciones de carga.*

Para la verificación de la seguridad de las cimentaciones Las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones se consideran la revisión de los siguientes estados límite de falla

- 1.- Flotación
- 2.- Flujo Plástico Local o General del Suelo bajo la cimentación
- 3.- Falla estructural de Pilotes, Pilas u otros elementos de cimentación

1.2 Estados Límite de Servicio

De acuerdo al RCDF los Estados Límite de Servicio son aquellos que *aún sin comprometer la seguridad de la estructura, incluyen la ocurrencia de daños económicos o la presentación de condiciones que impiden el desarrollo adecuado de*

las funciones para las que se haya diseñado la construcción. En la revisión de los estados límite de servicio se busca que no existan desplazamientos y/o vibraciones excesivas o bien que existan sin comprometer la funcionalidad de la estructura.

Para verificar la seguridad de las cimentaciones las NTC para el Diseño y construcción de Cimentaciones considera la revisión de los siguientes estados límite de servicio.

- 1.- Movimiento vertical medio, asentamiento o emersión de la cimentación, con respecto al nivel del terreno circundante.
- 2.- Inclinación media de la construcción, y
- 3.- Deformación diferencial de la propia estructura y sus vecinas

1.3 Evaluación de los Estados Límite

La Evaluación de los Estados Límite de acuerdo a los tipos de cimentación antes descritos se referirá principalmente a los aspectos siguientes:

TABLA 1.1 LIMITE EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES

CIMENTACIONES SUPERFICIALES	
EVALUACIÓN DE LOS ESTADOS LIMITE DE FALLA	EVALUACIÓN DE LOS ESTADOS LIMITE DE SERVICIO
Falla local o general por cortante del suelo	Asentamientos inmediatos al aplicar las cargas
Falla por volteo	Asentamientos o expansiones diferidos bajo acciones permanentes de larga duración
Falla por extracción	Asentamientos por compactación bajo acciones dinámicas
Falla por existencia de oquedades, grietas o suelos muy heterogéneos	Asentamientos por colapsos de ciertos tipos de suelos por saturación de los mismos
Falla por licuación	

TABLA 1.2 EVALUACIÓN DE LOS ESTADOS LIMITE EN LOSAS DE CIMENTACIÓN

LOSAS DE CIMENTACIÓN	
EVALUACIÓN DE LOS ESTADOS LIMITE DE FALLA	EVALUACIÓN DE LOS ESTADOS LIMITE DE SERVICIO
Falla por cortante	Asentamientos inmediatos al aplicar las cargas
Falla por flotación	Asentamientos o expansiones diferidos bajo acciones permanentes de larga duración
	Asentamientos por compactación bajo acciones dinámicas
	Asentamientos por colapsos de ciertos tipos de suelos por saturación de los mismos

TABLA 1.3 EVALUACIÓN DE LOS ESTADOS LIMITE EN CIMENTACIONES PROFUNDAS

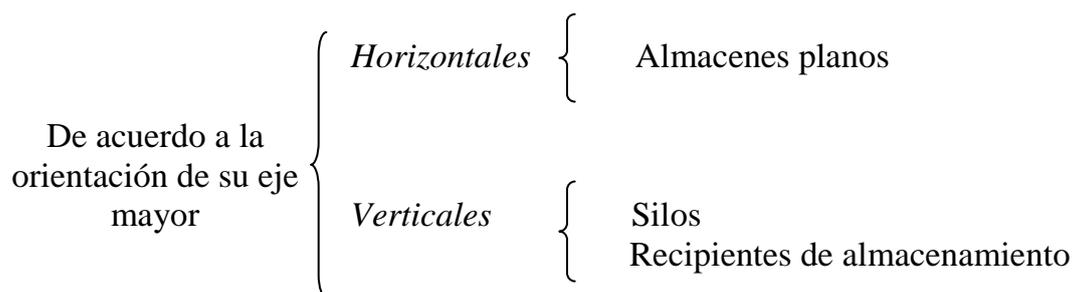
CIMENTACIONES PROFUNDAS (PILOTES O PILAS)	
EVALUACIÓN DE LOS ESTADOS LIMITE DE FALLA	EVALUACIÓN DE LOS ESTADOS LIMITE DE SERVICIO
Capacidad de carga bajo sollicitaciones verticales	Asentamientos inmediatos
Capacidad de carga ante sollicitaciones horizontales	Asentamientos diferidos
Falla por extracción	

2. SILOS

Un silo es una estructura de almacenamiento utilizada para el manejo a granel de diversas sustancias tales como: cereales, carbón, harinas, plásticos, maíz, jabón, azúcar, piensos compuestos, entre otros. Los protege de la humedad externa, del polvo, suciedad u otros contaminantes.

El diseño de los silos es muy variable y depende de varios factores, tales como: cantidad y tipo de sustancia que se desea almacenar, espacio disponible, lugar de la instalación, tipo de descarga, etc., por lo que estas estructuras de almacenamiento se construyen de diversas formas, tamaños y materiales.

Las estructuras de almacenamiento a granel pueden clasificarse como sigue:



2.1 Tipos de Silos

Los silos se clasifican en dos grandes categorías:

- I. Silos agrícolas, Destinados al almacenaje de cereales.
 - a) Silos de granja
 - b) Silos cooperativos
 - c) Silos portuarios

- II. Silos Industriales, Destinados a almacenar materiales pulvulentos.
 - a) Silos de coque
 - b) Silos de carbón
 - c) Silos destinados a almacenar materias diversas: fosfatos, azúcares, etc.



Fig. 2.1 Silo portuario al oeste de St. Louis, Illinois en la orilla del río Mississippi. Tomado de Ref. 24

Almacenamiento Temporal/Trincheras

El almacenamiento a granel más simple es una trinchera. Para hacerla, se apila la tierra de una trinchera amplia y somera en forma de bancales laterales y se la cubre con una membrana a prueba de humedad, como el polietileno. El grano se apila en la cubierta de polietileno en su ángulo de reposo. El grano se cubre con otra membrana de plástico, luego se coloca la tierra retirada sobre el montón y se apisona.

Este tipo de almacenamiento tiene mucho éxito en Australia y en otros países con clima seco o semiárido durante la estación de almacenamiento. Es adecuado para áreas con rendimientos marginales, o para almacenar brevemente durante un punto culminante de la producción, hasta que las instalaciones convencionales estén disponibles.

Silos de malla soldada

Se construye con una manta de malla de alambre (tal como se usa en concreto reforzado), conformada en un cilindro y cubierta con una lámina flexible, puede usarse para almacenar pequeñas cantidades de grano. Los materiales para cubrir incluyen papel de uso rudo, arpilleras o plásticos. Por lo general, tales silos se utilizan en áreas cubiertas, para convertir un edificio existente en un almacén a granel.

Mallas más fuertes con hojas de hule butílico pueden usarse para crear silos más grandes en áreas descubiertas. Este tipo de silos es adecuado para almacenamientos de emergencia.

Silos de tableros

Los tableros de fibra comprimida pueden ser usados para hacer recipientes para granos con una capacidad hasta de 50 Ton. Las hojas flexibles se remachan entre sí para formar cilindros verticales, utilizándose materiales más gruesos en la base. Estos son por lo general adecuados para utilizarse bajo techo. Se requieren tableros con especificaciones a prueba de agua si se utilizan a la intemperie.

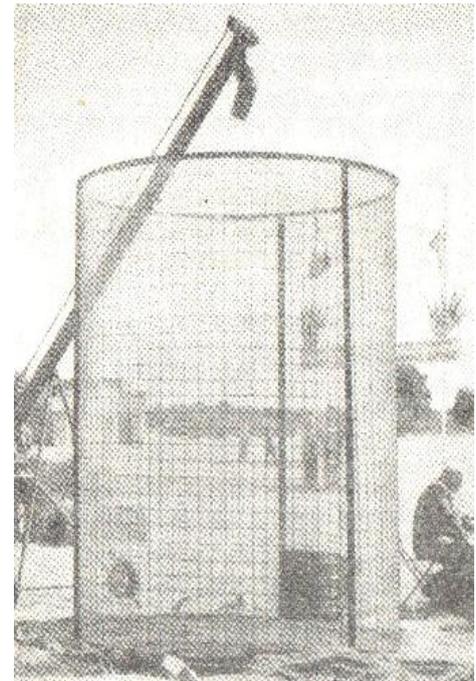


Fig. 2.2 Construcción de un silo de malla. Tomado de Ref. 6 “Construcción de Silos, Teoría y Práctica”

COBERTIZOS

Cobertizos de arcos

Pueden ser de bajo costo, contruidos con láminas de acero galvanizado, encurvadas y formando un arco sobre polines ligeros de acero. Este tipo de cobertizos necesitan cimientos mínimos y son de rápida construcción. Los claros más comunes son de 10.0 a 20.0 m y su longitud de 2 a 4 veces el claro. Las capacidades son de varios cientos de toneladas.

Cobertizos estructurados

Tienen una estructura fuerte de acero o de concreto reforzado. Los techos son portales de claros abiertos o de tipos de estructuras de tirantes. La cubierta es de láminas de acero o de aluminio. Los pisos son de concreto reforzado y algunas veces de asfalto.

La estructura debe ser lo suficientemente fuerte para resistir la presión ejercida por el nivel de grano más alto posible.

Este tipo de estructura puede contener hasta 300,000 Ton. y son adecuadas para una actividad anual baja, donde el vaciado es generalmente lento.

Silos Cortos

Son llamados “cortos” porque su altura es aproximadamente solo la mitad de su diámetro. Las paredes pueden estar formadas por piezas de concreto preconstruidas y postensadas, de paneles doblados de acero sostenidos por una estructura externa de acero. Los techos son de acero tensado o de láminas de aluminio.

Un típico silo corto tiene un diámetro de 48.0 m, paredes de 10.5 m de altura, y la altura en la cúspide llega a 25.0 m. Las capacidades varían de 1,000 a 20,000 Ton.

Silos altos

Los silos altos tienen mayor altura que diámetro. Su altura permite que la mayor parte del contenido fluya por gravedad. Se pueden construir de lámina metálica, de concreto reforzado preconstruido o construido en sitio, de ladrillos de arcilla o de bloques de concreto. Las capacidades varían de 25.0 a más de 2,000 Ton.

Las instalaciones de muy elevadas capacidades de manejo y almacenamiento se construyen generalmente en la forma más económica de concreto inyectado, con silos cilíndricos colindantes y pequeñas celdas en los espacios entre silos. Tales silos pueden ser de 60.0 m de altura, con capacidades superiores a 100,000 Ton.

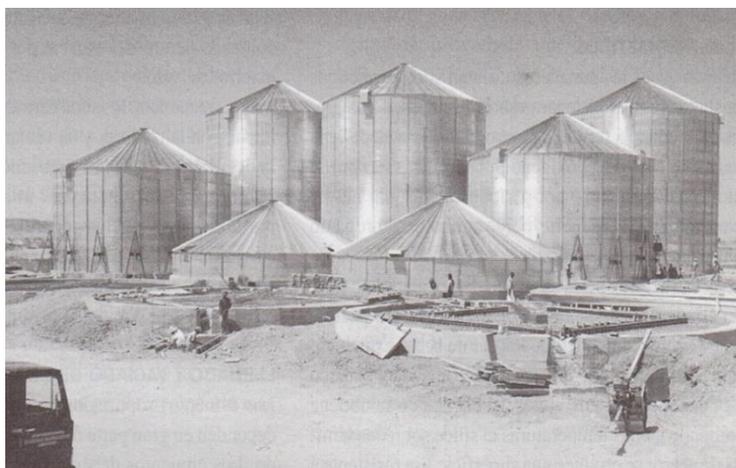


Fig. 2.3 Silos de acero en construcción. Tomado de Ref. 16
“Mantenimiento y funcionamiento de Silos”

SILOS DE CONCRETO

El concreto reforzado es un material efectivo en costos para grandes silos debido a su larga vida útil y a su escasa demanda de mantenimiento. Los silos se hacen tradicionalmente ya sea dándole forma al concreto vertido en el sitio, o ensamblando piezas preconstruídas utilizando losas y cuñas de junta. Otra alternativa consiste en asperjar concreto en una esfera inflada que se desinfla y retira cuando el concreto ha fraguado.

Silos de piezas preconstruídas

Estos se ensamblan colocando losas de concreto de forma adecuada, cada una aproximadamente de 0.5 a 1.0 m², formando un círculo sobre una base de concreto y continuando la construcción hacia arriba. Se utilizan postes o cuñas de juntas que se mantienen en posición con cables de acero externos, varillas o bandas que deben ser protegidas de la corrosión y de daños. Las hendiduras entre las cuñas de juntas se llenan con mortero o con otro material para evitar la infiltración de lluvia. Un techo de concreto o de acero en forma de cúpula se coloca en la parte superior del silo.

El diseño y la tecnología de construcción para silos de piezas preconstruídas son más simples que para silos formados con concreto deslizado, pero las hendiduras entre las cuñas de junta pueden alojar plagas de insectos o impedir el flujo del grano.

Silos formados con concreto deslizado

El método de formación de silos con concreto deslizado, en manos expertas, con frecuencia demuestra ser una solución muy económica para instalaciones grandes, especialmente cuando los sistemas de construcción pueden ser reutilizados; produce superficies interiores y exteriores lisas. Un molde movable verticalmente se coloca sobre cimientos ya preparados, y una cuadrícula de varillas de refuerzo en su interior.

El concreto se vierte en el molde y se sube lentamente con gatos de presión sujetos a las varillas de acero más gruesas (varillas de escalamiento). La secuencia total de vertido,

añadiendo refuerzos de levantamiento, se repite en un proceso continuo hasta que se alcanza la altura final. Estos silos pueden llegar a medir más de 60.0 m de altura.

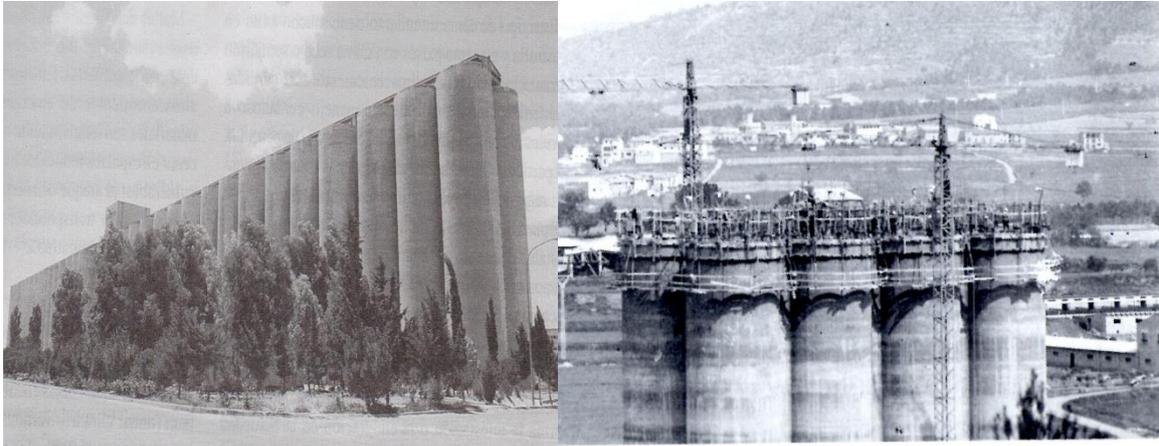


Fig. 2.4 Silos de concreto deslizado. Tomados de Ref. 16 “Mantenimiento y funcionamiento de Silos” (izquierda) y Ref. 4 “Silos” (derecha)

Durabilidad de los silos de concreto

Las estructuras de concreto deben ser correctamente diseñadas, cuidadosamente construidas y diligentemente mantenidas para prevenir su fisuramiento. Las fisuras pueden parecer pequeñas, pero permiten al agua de lluvia penetrar hasta el acero de refuerzo del concreto, el cual en éstas condiciones se corroe, poniendo en riesgo la estructura, la cual podría incluso desplomarse.

Otra causa de falla es la carbonatación del concreto. El bióxido de carbono (CO_2), es ácido. Cuando reacciona con el concreto, que es alcalino, destruye la capacidad del concreto de proteger al acero de refuerzo de la corrosión. Debido a que la respiración del grano produce (CO_2), la atmósfera en un silo contiene ligeramente más CO_2 que en aire ambiental. Tal nivel de CO_2 carbonata completamente el concreto hasta espesores de 200 mm en 50 años.

Si una atmósfera rica en CO_2 se utiliza para control de insectos, la carbonatación se acelera. El CO_2 podría causar daños por carbonatación a una profundidad de 20.0 a 30.0 mm en 4 semanas.

Los silos colocados en zonas industriales o que les llega el viento de estas zonas son también relativamente susceptibles a carbonataciones rápidas.

La pintura puede hacer más lento el proceso de degradación del concreto, especialmente en zonas industriales. La pintura provee no solo una capa sacrificable contra el ataque de lluvia ácida, sino también una membrana a prueba de agua contra la absorción de humedad por el grano almacenado.

Silos cilíndricos de chapa lisa

Este tipo de silos son comúnmente unicelulares, el material de construcción puede ser aluminio o acero al carbón, y su construcción puede ser soldada o atornillada a partir de los años 60's, el diámetro de éstos silos no rebasa los 6.0 m ni las 500 ton, éstos pueden estar apoyados sobre pilares y provistos de una tolva metálica suspendida.



Fig. 2.5 Silos metálicos atornillables de chapa lisa
“cortesía de TASIJP”

Silos de acero corrugado

Los silos de acero corrugado se construyen de láminas de acero corrugado y galvanizado que han sido encurvados, las láminas se unen con pernos para formar un cilindro vertical. Este se ancla a un anillo a nivel de piso que está fijo a una plancha de concreto. Un techo cónico de láminas de acero se sujeta en la parte superior del cilindro.

Los perfiles corrugados son relativamente poco profundos. Están especialmente diseñados para contener granos sin imponer cargas verticales excesivas a la estructura.

El cilindro de láminas se sostiene a sí mismo y a su contenido, se le añaden aros para aumentar la rigidez en la base, en los niveles de los aleros y alrededor de cualquier compuerta de acceso. Las láminas tienen espesores grandes en el nivel del suelo y progresivamente menores en los niveles más altos. Desarrollos tecnológicos recientes han permitido que las láminas de los silos tengan el mismo o similar espesor en todas las alturas.

Debido a las limitaciones de resistencia que tienen los silos de acero corrugado por tratarse de estructuras de peso ligero debe prestarse especial atención a la manera en que deben llenarse y vaciarse. Para asegurarse que las cargas en la pared perimetral estén distribuidas en forma homogénea, deben descargarse centralmente ya que un vaciado asimétrico crearía tensiones localizadas y la falla de la estructura metálica (la velocidad de llenado y vaciado debe ser controlada para mantener las cargas vivas dentro de los límites del diseño).

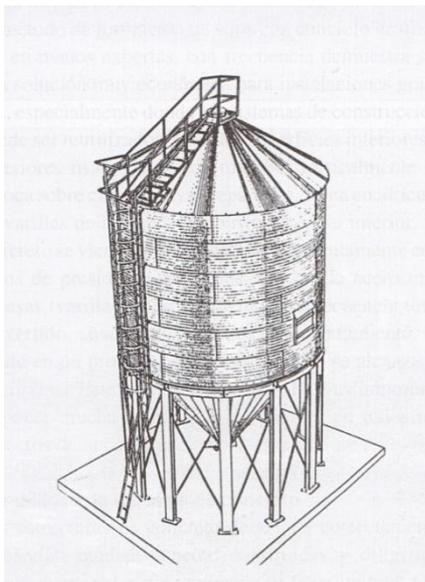


Fig. 2.6 Silos de acero corrugado apoyado en pilares. Tomado de Ref. 16 “Mantenimiento y funcionamiento de Silos”



Fig. 2.7 Silo portuario moderno de acero corrugado y fondo plano

Silos cuadrados de acero

Los depósitos o silos cuadrados o rectangulares son hechos de acero de mayor espesor que los silos circulares y por lo tanto de costo más elevado, son pintados o galvanizados con la finalidad de prevenir oxidaciones. Las paredes están formadas por perfiles trapezoidales, lo cual los hace más resistentes que los silos circulares de acero, además de estar sujetos a pilares pesados por medio de pernos en las esquinas. Las láminas de las paredes se sujetan entre ellas en secciones mediante pernos o con soldadura para formar grandes paneles.

Ya que son estructuras rígidas, es común agrupar varios depósitos en un bloque, esta formación puede contener maquinaria fija de manejo.

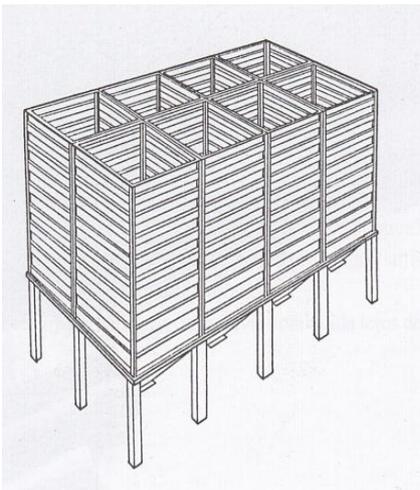


Fig. 2.8 Silo cuadrangular. Tomado de Ref. 16 “Mantenimiento y funcionamiento de Silos”



Fig. 2.9 Silos metálicos de sección cuadrada

Silos metálicos mixtos

Este tipo de silos fueron concebidos para el uso en granjas, pueden ser cilíndricos o poligonales (cuadrados, hexagonales u octagonales). En base a lo anterior se han estudiado modos de agrupación de las celdas con la finalidad de reducir el acero necesario para la construcción

Silos autoportantes

La característica esencial de este tipo de silos es que está compuesto de celdas en forma de embudo. Cada celda está comprendida entre dos embudos. Una instalación de este tipo tiene la ventaja de ocupar un espacio mínimo. Las cimentaciones normalmente utilizadas son losas circulares continuas para garantizar una descarga uniforme al terreno.

Silos Herméticos

Algunas veces los ganaderos usan silos herméticos o aislados para almacenar granos húmedos. Tales granos comienzan a fermentar, pero se detiene el proceso cuando se termina el oxígeno del silo. El grano se puede almacenar por periodos largos generando olores desagradables, por lo que el empleo de estos granos solo es apropiado como alimento para animales.

Las estructuras herméticas de almacenamiento pueden construirse de cualquier material que sea posible aislar herméticamente, puede ser: de acero esmaltado (el más común), concreto, acero galvanizado y plástico reforzado de fibra de vidrio. El esmaltado se obtiene fundiendo a altas temperaturas el sílice sobre las láminas de acero; se produce una superficie lisa resistente a la corrosión.

3. FALLAS EN SILOS

Los silos son estructuras especiales sujetas a diferentes e inconventionales condiciones de cargas, lo que provoca diversas fallas. La falla de un silo puede resultar en la pérdida del contenedor, la contaminación y/o pérdida del material contenido, daños al medio ambiente y posibles pérdidas humanas. A continuación se muestran algunos ejemplos de fallas en silos de diversas capacidades, tamaños y materiales.

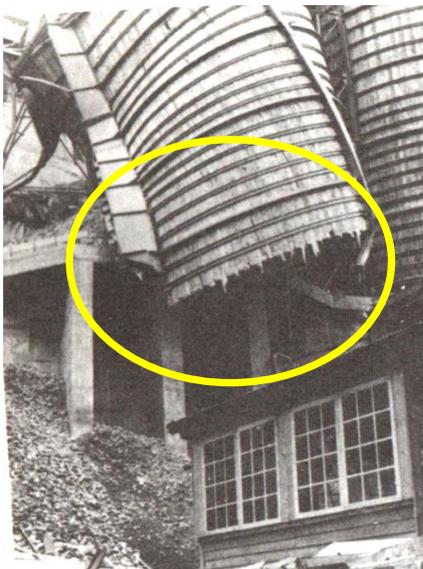


Fig. 3.1 Falla de silo de almacenamiento de piedra por sobrepresiones de rozamiento en las paredes. Blava, Suiza en Octubre de 1953. Tomado de Ref. 5 “SILOS”



Fig. 3.2 Falla de silo metálico por problemas de flujo en carga y descarga. Tomado de Ref.2 “Causas de Daños y fallas en silos”



Fig. 3.3 Colapso de silo por fuerza sísmica en 1964, Lima Perú. Tomado de Ref. 2 “Causas de Daños y fallas en silos”

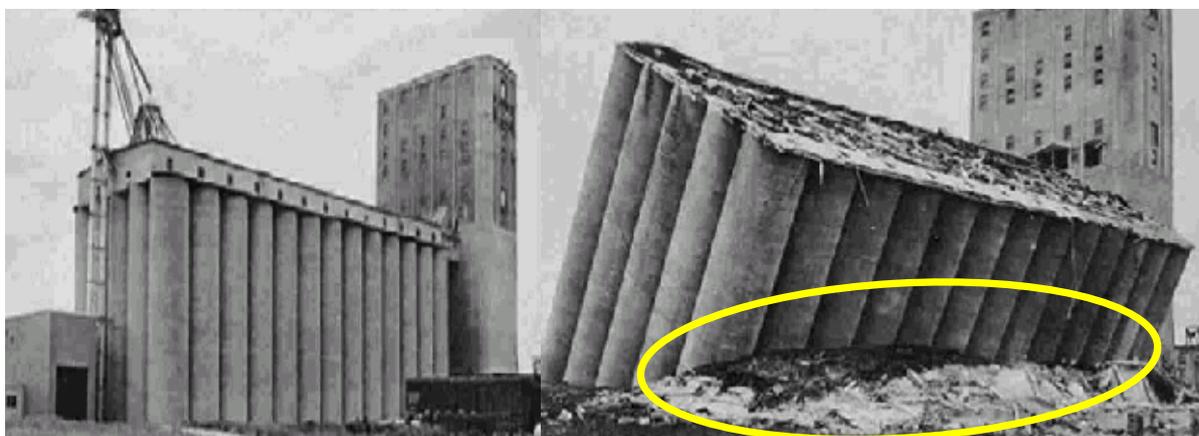


Fig. 3.4 Falla en la cimentación de silo de almacenamiento de cereales en Transcona Canadá. Tomado de Ref. 5 “Silos”

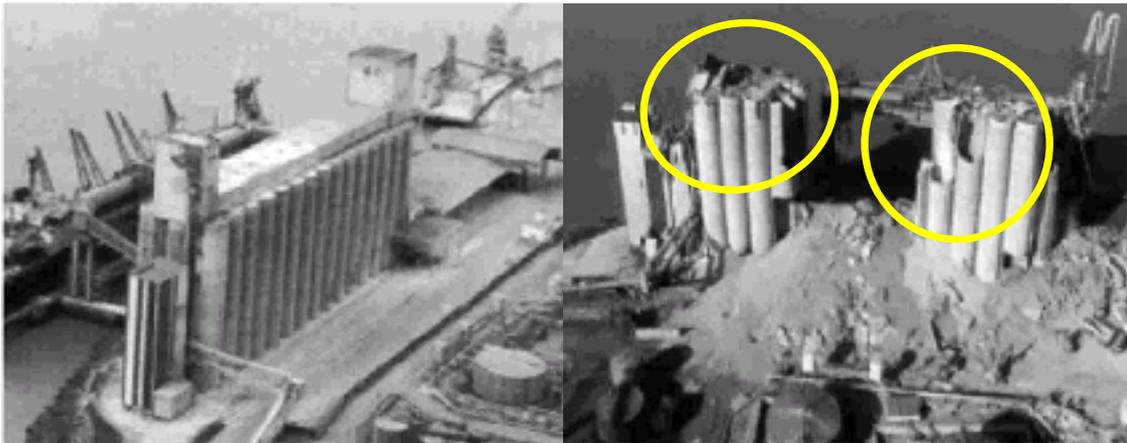


Fig. 3.5 Antes y después de explosión en un silo de concreto en Canadá. Tomado de Ref. 2 “Cause of damage and failures in silo structures”

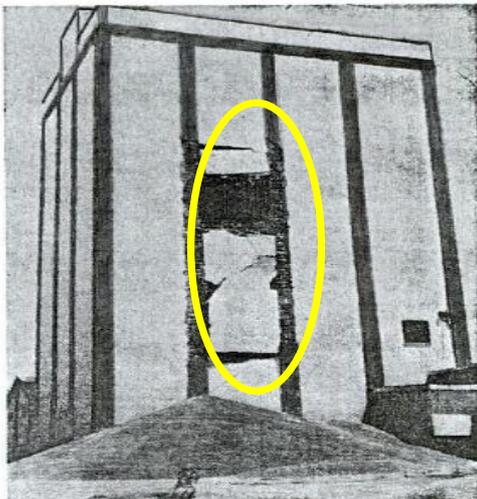


Fig. 3.6 Rotura de la pared de un silo de concreto por mala ejecución y mala calidad de los materiales. Tomado de Ref.5 “Silos”



Fig. 3.7 Explosión en silo para harinas en Memphis, Tennessee (USA). Tomado de Ref. 5 “Silos”

En el libro “SILOS: Teoría, Investigación y Construcción” (Ref. 4) se enlistan las siguientes causas más frecuentes de fallas en silos:

TABLA 3.1 CAUSAS MÁS FRECUENTES DE FALLAS EN SILOS

- ❖ En cimientos por concentración de altas cargas en superficies relativamente pequeñas.
- ❖ Gran esbeltez de las estructuras con influencia de fuerzas por viento y la aplicación de cargas asimétricas.
- ❖ Conocimiento dudoso de las presiones internas reales que aparecen en las paredes del silo durante el llenado y vaciado.

Las condiciones necesarias para que un silo falle pueden ser causadas por uno o más errores en el diseño, la construcción y/o el mal uso de la estructura.

Los errores de diseño pueden ser:

- ◆ Insuficiente resistencia para soportar las presiones internas por el material almacenado (el silo revienta cuando estas fuerzas son excesivas) cuando se encuentra en estado estático y cargado.
- ◆ Resistencia vertical inadecuada para soportar las fuerzas dinámicas durante el vaciado, o durante la agitación provocada por los transportadores helicoidales (el silo se dobla o se desploma).
- ◆ Cimientos apoyados en terreno débil o inestable por falta de información o especificación de necesidades para el diseño de silo a construir.

Los errores de construcción incluyen:

- ◆ Localización equivocada.
- ◆ Refuerzos de acero insuficientes en los cimientos.
- ◆ Calidad pobre en el concreto.
- ◆ Descuidos en el trabajo (pernos sueltos, faltantes en la banda de mástique).

Los errores del usuario pueden ser:

- ◆ Utilizar los silos para el almacenaje de materiales para los que no fue diseñado (almacenar materiales inadecuados puede causar cargas excesivas produciendo abombamientos y desplomes).
- ◆ Modificaciones no autorizadas, especialmente en los arreglos de vaciado.

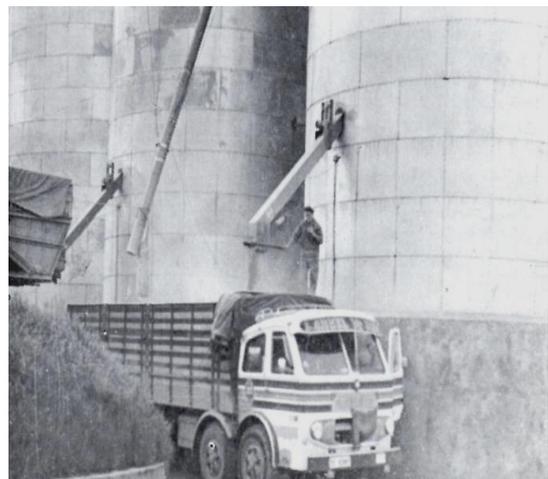


Fig. 3.8 Ejemplo de descarga excéntrica en silo metálico de chapa lisa. Ref. 4 “Silos”

3.1 Fallas por error de diseño

Una de las causas de los errores de diseño de los silos consiste en la aplicación de teorías erróneas o inadecuadas en el diseño. Todos los países industrializados se han enfrentado a los problemas de deformaciones, grietas, fallas, hundimientos y explosiones aparecidas en muchas de estas instalaciones; razón por la cual se han desarrollado teorías respecto al comportamiento de estas estructuras.

A continuación se enlistan algunas teorías de los más importantes especialistas.

Presiones Laterales. Vaciado Centrado

Presiones Hidrostáticas
Isaac Roberts (Inglaterra) 1882
Janssen y Pleizner (Alemania) 1895
Airy (Inglaterra) 1897
Jamieson (Canadá) 1903
Marcel Reimbert (Francia) 1943
Teoria de Caughey, tooles, Scheer (Civil
Engineerring, USA) 1951
Alexander M. Turitzin (USA) 1963
D. Lenczner (Inglaterra) 1963
Laforge, R.M y Boruff
Normas Alemanas DIN 1055 1964
Rudolf Kvapil 1965
Handley, M.F Año 1967
Teoría de Jenike y Johanson (1968)
Theimer. Ingeniero Consultor (Munich,
Alemania)
Garg, R. M (India) 1972

Presiones Laterales. Vaciado Excéntrico

Jamieson (Canadá) 1904
Reimbert (Francia) 1943
Normas Alemanas DIN 1055 1964
Jenike, A. W. 1967
Sergis Safarian (EE. UU) 1969
Theimer (Alemania) 1969
Klaus Pieper (Alemania) 1969
Lumbroso, A. (Francia) 1970
Garg, R. M (India) 1972

De acuerdo al Dr. Ing. Industrial Juan Ravenet Catalán, los primeros grandes silos para almacenamiento de cereales se construyeron de concreto armado y se aplicaron presiones hidrostáticas

$$P = \gamma h$$

Dónde:

P = Presión vertical en Kg/cm²

H = Altura desde el borde superior a la sección considerada en m

γ = Peso específico del material ensilado en Kg/m³

Según esta teoría la presión sobre un punto es constante e independiente de la dirección, por lo que aplicando presiones hidrostáticas, los espesores de las paredes resultaban muy elevados y no se preveían los esfuerzos de rozamiento que aparecen en las paredes.

Los pioneros en el diseño de silos se dieron cuenta de que la diferencia más importante entre un fluido y un producto pulvurento era el rozamiento interno entre sus partículas, el cual hace que aparezca un rozamiento grano-pared y un caudal de vaciado prácticamente constante e independiente de la altura del producto ensilado. Esta es la característica que distingue fundamentalmente aun fluido de un material pulvurento y hace que un depósito diseñado especialmente para almacenamiento de fluidos no sea apto para almacenamiento de productos pulvurentos (debido a los esfuerzos de rozamiento) y que un depósito diseñado especialmente para almacenamiento de productos pulvurentos no sea apto para almacenamiento de fluidos (debido a las presiones horizontales).

3.2 Fallas por error de Construcción

En cuanto al proceso de construcción, los cimientos es uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta a la hora de realizar el diseño y ejecución de un silo para almacenamiento de productos sólidos ya que de ella depende la seguridad de toda la superestructura. Todo intento de economizar en esta parte de la obra, ya sea en la

investigación preliminar, en el proyecto, en los materiales o en la mano de obra podrá poner en peligro la superestructura, aunque haya sido bien proyectada y construida.

Debido a que los silos son estructuras relativamente delgadas y ocupan una superficie pequeña en comparación con su altura, se producen grandes esfuerzos axiales en la base de la estructura debido al peso del material a granel y de la propia estructura.

El suelo de soporte se somete normalmente a una presión uniforme de compresión debido a las cargas verticales; sin embargo, la colocación no uniforme de material a granel durante el llenado puede dar como resultado la distribución no uniforme de las presiones en la base, lo que causará que la distribución de la presión bajo el silo se vea distorsionada. Cargas laterales debidas a terremotos o vientos fuertes pueden producir efectos similares.

En conclusión, la sobrecarga local del suelo bajo la cimentación puede causar asentamientos, inclinación e incluso colapso. En la Ref. 2 se menciona que la mayoría de los fallos de cimentación en suelos arcillosos se producen cuando un silo es rápidamente cargado por primera vez.

Para la construcción de silos, se realizan sondeos del terreno para determinar:

- a) La capacidad de carga admisible del suelo.
- b) Descripción y clasificación de los estratos que son necesarios para diseñar los cimientos.
- c) Comprobar el tipo de concreto a utilizar para cumplir con la rigidez en las paredes de acuerdo a la altura proyectada en la superestructura.

El estudio de mecánica de suelos nos dará información del terreno donde se pretende desplantar una cimentación para silo, podríamos saber si el terreno es soluble contra el agua y si hay presencia de aguas selenitosas (con presencia de yeso) que puedan atacar al concreto.

Cuando ocurre una falla de construcción en la cimentación es debido a un descuido o accidente. El Prof. Ing. C. Szechy (Ref. 9) anota: *Aunque las cimentaciones se hallan ocultas debajo del terreo, si han sido erróneamente proyectadas o mal construidas, el daño en la superestructura, tarde o temprano hará recordar al ingeniero y/o al contratista su error.*

La falla de una cimentación puede ser de tal naturaleza que sea imposible repararla a un costo económico. En otros casos al costo de las medidas de reparación hay que agregar las pérdidas debidas a las dificultades o interrupciones que puede sufrir la estructura.

Por otra parte, la adopción de una cimentación aparentemente económica y simple puede dar como resultado una cimentación con mayores dificultades y más costosa que la proyectada en un comienzo.

Los factores que afectan la estabilidad de las cimentaciones se deben a:

1. No haber efectuado una correcta investigación del lugar o a una errónea interpretación de los resultados de tal investigación
2. A errores del proyecto en la cimentación
3. A mano de obra defectuosa en la construcción de la cimentación
4. Previsión insuficiente de los fenómenos naturales excepcionales, tales como: condiciones térmicas y biológicas, lluvias, inundaciones, etc.

3.3 Fallas por mal uso

Los errores del usuario se centran básicamente en el almacenamiento de materiales para los cuales el silo no fue diseñado. Como se mencionó anteriormente, el diseño de los silos depende de las propiedades físicas del producto a almacenar (cohesión, granulometría, contenido de humedad, etc.) ya que estas determinan las presiones que se ejercen en las paredes del silo, así como su comportamiento en las operaciones de llenado y vaciado.



Fig. 3.9 Presiones sobre las paredes de un silo de concreto armado durante el llenado y vaciado. Tomado de Ref.4 “SILOS”

El almacenamiento de materiales inadecuados en un silo puede causar cargas excesivas que a su vez provoquen abombamientos e incluso desplomes. Por ejemplo, si el silo fue diseñado para trigo seco puede manejar cebada, avena, centeno o arroz; pero no estos cereales cuando están húmedos, ni oleaginosas, leguminosas o harinas ya que estas sustancias presentan diferentes problemas en su almacenaje.

4. ACCIONES DE DISEÑO

La seguridad de una estructura debe verificarse estudiando el efecto de la combinación de todas las acciones que tengan una probabilidad no despreciable de ocurrir simultáneamente. Las Normas Técnicas Complementarias Sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las edificaciones del Distrito Federal consideran tres categorías de acciones, de acuerdo con la duración en que obran sobre las estructuras con su intensidad máxima.

- a) *Las acciones permanentes* son las que obran en forma continua sobre la estructura y cuya intensidad varía poco en el tiempo. Las acciones que pertenecen a esta categoría son: la carga muerta; el empuje estático de suelos y de líquidos y las deformaciones y desplazamientos impuestos a la estructura que varían poco con el tiempo, como los debidos a presfuerzo o a movimientos diferenciales
- b) *Las acciones variables* son las que obran sobre la estructura con una intensidad que varía significativamente con el tiempo. Las principales acciones que se encuentran en esta categoría son: la carga viva; los efectos de temperatura; las deformaciones impuestas y los hundimientos diferenciales que tengan una intensidad variable con el tiempo, y las acciones debidas al funcionamiento de maquinaria y equipo, incluyendo los efectos dinámicos que pueden presentarse debido a vibraciones, impacto o frenado.
- c) *Las acciones accidentales* son las que no se deben al funcionamiento normal de la edificación y que pueden alcanzar intensidades significativas sólo durante lapsos breves. Pertenecen a esta categoría: las acciones sísmicas; los efectos del viento; las cargas de granizo; los efectos de explosiones, incendios y otros fenómenos que pueden presentarse en casos extraordinarios. Será necesario tomar precauciones en las estructuras, en su cimentación y en los detalles constructivos de la edificación para evitar un comportamiento catastrófico de la estructura para el caso de que ocurran estas acciones.

TABLA 4.1 TIPOS DE ACCIONES QUE PUEDEN PRESENTARSE EN UN SILO		
<i>permanentes</i>	<i>variables</i>	<i>accidentales</i>
Peso propio	Cambios de uso	Sismo
Peso de material almacenado	Llenado y vaciado	Viento
Equipo	Vibraciones de maquinaria	Explosiones
Otras	Otras	Otras

Se considera que las acciones más importantes a considerar en el diseño de la cimentación de un silo son: el peso propio de la estructura, el peso del material almacenado, la fuerza sísmica y la fuerza del viento como se muestra en el siguiente esquema:

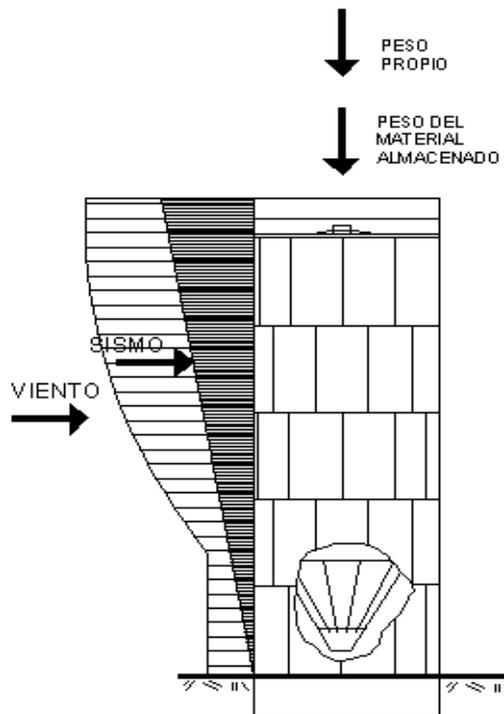


Fig. 4.1 Acciones de diseño en silo. Puede observarse la distribución de presiones debido a Sismo y Viento

Entre una de las acciones más importantes a tomar en cuenta se encuentran la ocurrencia de sismo o viento debido a la altura que pueden llegar a tener los silos y por lo tanto habrá de considerarse en el diseño que éstos resistan el momento de volteo que puede producirse.

4.1 Viento

Los efectos del viento se determinan de acuerdo a las especificaciones de cada proyecto y reglamento local, podemos aplicar el Manual de Diseño de Obras Civiles de Comisión Federal de Electricidad o Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento para determinar las velocidades de diseño por viento aplicables en la República Mexicana y las fuerzas por viento que deben emplearse en el diseño de diferentes tipos de estructuras.

La velocidad del viento varía con la altura, es decir, a mayor altura se presenta mayor velocidad y como consecuencia mayor magnitud en las fuerzas actuantes que generan mayores momentos de volteo debido a tales fuerzas. Cuanto más alto es un silo (puede llegar a medir más de 60 m de altura), más importante es tomar en cuenta esta acción no solo en el diseño de la cimentación sino del silo mismo, por lo que se divide en secciones para su análisis.

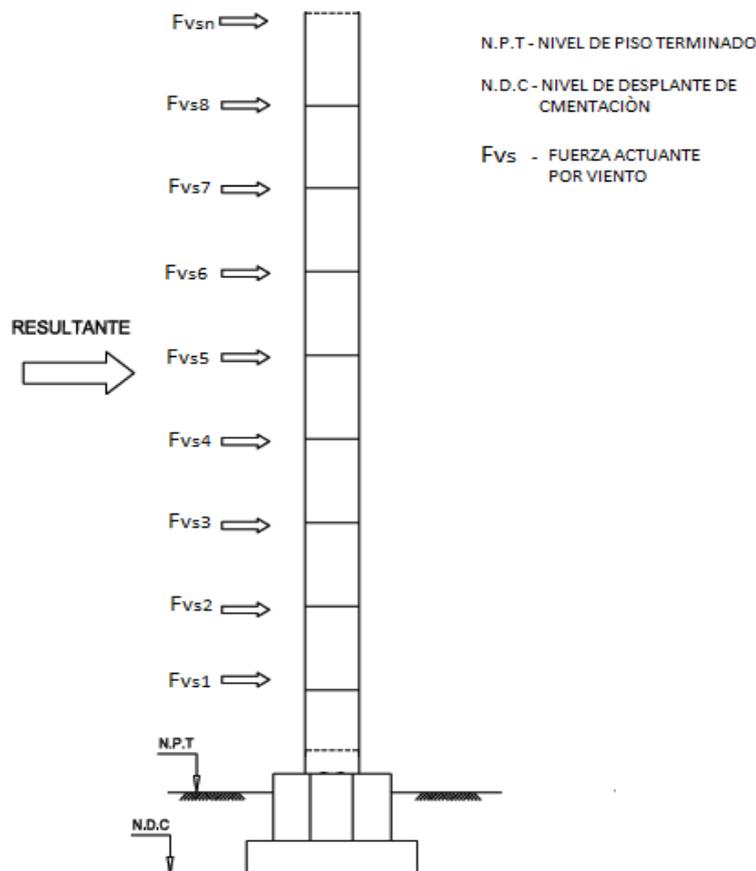


Fig. 4.2 Esquema de análisis para diseño por viento

4.2 Sismo

La ocurrencia de los sismos se describe con términos probabilísticos, por lo que en la práctica es imposible diseñar con la máxima intensidad sísmica que puede ocurrir en algún lugar ya que se tendría como resultado estructuras muy robustas que encarecerían su construcción, como consecuencia, en la elección del sismo de diseño debe considerarse la probabilidad de que su intensidad sea excedida por la fuerza sísmica de ocurrencia cuando menos una vez durante la vida útil de la estructura.

El diseño de estructuras ante sollicitaciones sísmicas depende de las características probables de los temblores que pueden ocurrir en el sitio de interés así como del grado de seguridad recomendado para la estructura en cuestión, otros factores son los del diseño estructural los elementos y la calidad de los materiales de la estructura.

En resumen:

Los efectos sísmicos dependen de:

- Movimiento Sísmico
- Propiedades del suelo
- Propiedades de la estructura

Como ayuda en el análisis de estructuras por sismo, se tienen zonificaciones que determinan la probabilidad de ocurrencia de los mismos. Estas zonas son un reflejo de que tan frecuentes son los sismos en las diversas regiones y la máxima aceleración del suelo a esperar durante un siglo.

La **zona A** es una zona donde no se han reportado sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores. Las **zonas B y C** son zonas intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo y la **zona D** es una zona, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad.



Fig. 4.3 Zonificación sísmica de la República Mexicana. Tomado del Manual de diseño de Obras Civiles (Diseño por Sismo) de Comisión Federal de Electricidad

Los sismos crean vibraciones en las estructuras, lo cual requiere de un análisis dinámico. Básicamente se trata de determinar la fuerza horizontal (cortante de base) a partir de la fuerza de inercia que se induce en un sistema equivalente.

La importancia de considerar los sismos como acción de diseño en las cimentaciones para silos no solo radica en la posibilidad de que éste se encuentre en una zona de alto riesgo por sismo, sino por la altura que el silo pueda llegar a tener, ya que básicamente se considera que la distribución de aceleraciones crece proporcionalmente con la altura si se hace uso del Análisis Estático. Por otra parte, haciendo uso del Análisis Dinámico la altura influye en los modos de vibración de la estructura.

En un edificio podemos suponer las masas concentradas al nivel de cada entrepiso. Si las masas y los segmentos no varían y estamos dentro de los límites de la elasticidad, en todos los niveles se tendrá la misma velocidad angular y el mismo periodo. A este periodo de oscilación se le llama “periodo fundamental de vibración” o “primer modo

de vibración”. Al disminuir el periodo del terreno aparecen otros modos de vibrar en forma consecutiva.

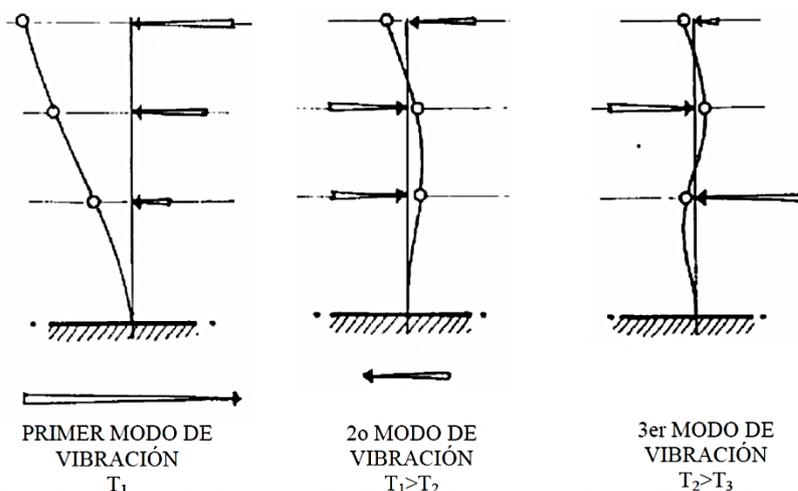


Fig. 4.4 Esquema en el que muestran los modos de vibración. Tomado de Apuntes Diseño Estructural

En los terrenos sucede algo semejante, vibran según sus características y localización. Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por sismo del Distrito Federal presentan varios valores de periodos predominantes del suelo. Mientras más concuerden el periodo de vibración del edificio con el del terreno, habrá mayor probabilidad de que se presente el fenómeno de resonancia, el cual amplifica el desplazamiento de la estructura.

4.3 Llenado y Vaciado de Silos

Los esfuerzos soportados por la estructura de un silo dependen en gran parte del método de llenado y vaciado. *Los cimientos deben diseñarse y construirse para soportar cargas dinámicas considerables* generadas particularmente cuando se está vaciando.

Generalmente, a los silos se les coloca una tolva cónica en el fondo que entrega por gravedad y en un punto único los contenidos del silo. El ángulo de esta tolva depende del material almacenado y es:

- ◆ de 40° a 50° sobre la horizontal para cereales secos.
- ◆ de 60° a 70° producen un flujo en el que “lo que entra primero sale primero”.
- ◆ de 30° a 40° es probable que se establezca un flujo entubado o embudo.
- ◆ Si la tolva se coloca para dirigir el grano a un lado del silo, todo el silo debe ser diseñado para descargas asimétricas.

El vaciado excéntrico es uno de los casos que con mayor frecuencia se presenta en un silo por exigencias del diseño, y que no siempre es tenido en cuenta a la hora de determinar las presiones laterales en las paredes de un silo.

Se ha comprobado que los silos metálicos cilíndricos son más sensibles a un vaciado excéntrico por falta de rigidez en sus paredes que un silo de concreto armado, aunque ambos son afectados por las presiones a que se ven sometidos por causa de la excentricidad.

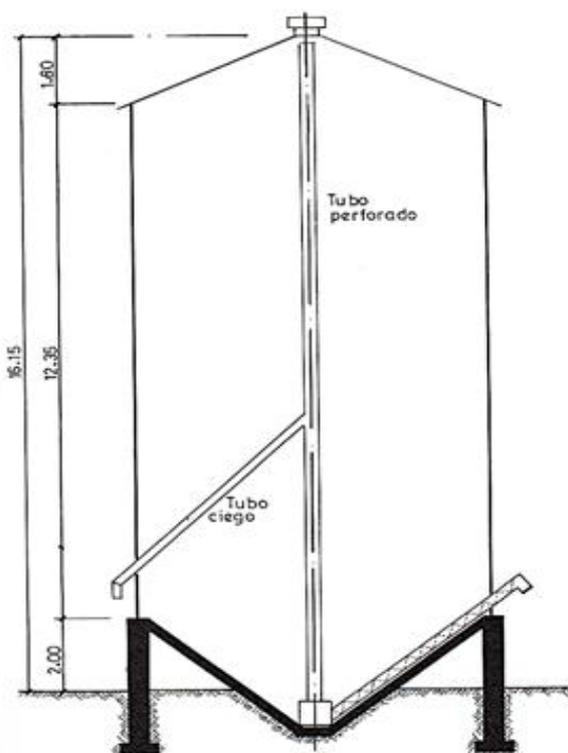


Fig. 4.5 Alzado de Silo metálico cilíndrico de 8.45 m de diámetro apoyado sobre tolva con descarga excéntrica. Tomado de Ref.4 “SILOS”

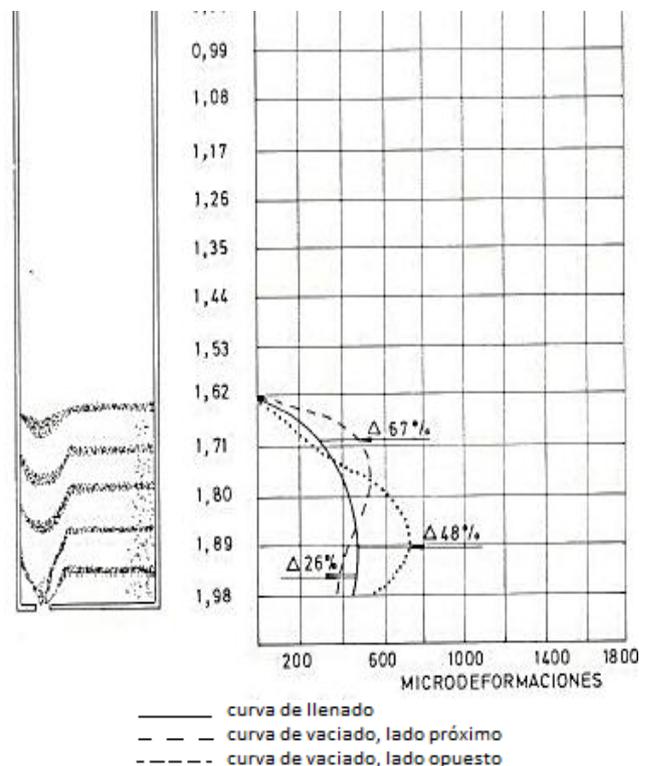


Fig. 4.6 Presiones sobre las paredes de un silo metálico con descarga excéntrica. Tomado de Ref.4 “SILOS”

4.4 Explosiones en silos

Desde 1900 la Nacional Fire Protection Association (N.F.P.A) ha registrado explosiones de polvos combustibles en silos y desde 1922 estableció un comité de Riesgo con la finalidad de poder prevenir estas explosiones.

Investigaciones realizadas en explosiones ocurridas en diferentes partes del mundo indican que el polvo en suspensión en el aire es altamente explosivo y que no todos los polvos son igualmente peligrosos.

Existen tres grupos donde son frecuentes las explosiones de este tipo:

1. Polvos de materiales metálicos
2. Polvos de materiales plásticos
3. Polvos de productos agrícolas

A continuación se enlistan en orden de peligrosidad, los silos con mayor ocurrencia de explosiones de acuerdo a los registros realizados por la N.F.P.A.

1. Silos para cereales
2. Silos para carbón
3. Silos para harinas
4. Silos para plásticos
5. Silos para madera
6. Silos para soja
7. Silos para maíz
8. Fábrica de piensos compuestos
9. Silos de madera para harina
10. Silos par algodón
11. Silos para almidón
12. Silos para Aluminio, corcho, ferromagnesio, laca, lignito, avena,

papel, rayón, caucho, jabón, azúcar de remolacha en pulpa, etc.

En la *Ref. 2 "CAUSE OF DAMAGE AND FAILURES IN SILO STRUCTURES"* se enlistan las siguientes condiciones para que se produzca una explosión:

- ◆ El polvo es combustible
- ◆ El polvo se suspende en una atmósfera que contiene suficiente oxígeno para alimentar la combustión
- ◆ El polvo tiene una distribución de tamaño de partícula capaz de propagar las llamas
- ◆ La concentración de polvo se encuentra en el rango explosivo
- ◆ Esté presente una fuente de incendio de energía suficiente.

Si se reúnen las condiciones enlistadas, la fuerza de la explosión depende las propiedades del polvo, el volumen y las características del contenedor de la suspensión en polvo, la concentración de la nube de polvo y el grado de turbulencia del contenedor.

5. CIMENTACIONES PARA SILOS

De acuerdo con el Dr. Roberto Meli Piralla “La cimentación o subestructura, constituye un elemento de transición entre la estructura propiamente dicha, o superestructura, y el terreno en que se apoya. Su función es lograr que las fuerzas que se presentan en la base de la estructura se transmitan adecuadamente al suelo en que ésta se apoya”. Reconoce además que el diseño de cimentaciones es una actividad en que se intervienen especialmente las especialidades de Mecánica de Suelos y Estructuras.

El diseño de cimentaciones consiste en definir:

- Los estratos de suelo más adecuados para aceptar las cargas transmitidas por la estructura. (*determinación de las fuerzas internas y deformaciones*)
- La forma de la subestructura que mejor se presta a realizar la transmisión de cargas. (*revisión de la capacidad del carga del suelo y de los hundimientos que se producen por las cargas sobre el suelo*)
- El procedimiento de construcción más apropiado. (*dimensionamiento de la cimentación y la consideración de las solicitaciones debidas a los movimientos de los apoyos*)

5.1 Tipos de cimentaciones para silos

Cimentaciones de fondo plano: Se trata de cimentaciones a base de macizos enterrados de concreto armado, se adaptan a la geometría del silo, teniéndose como resultado: cimentaciones circulares y losas de cimentación.

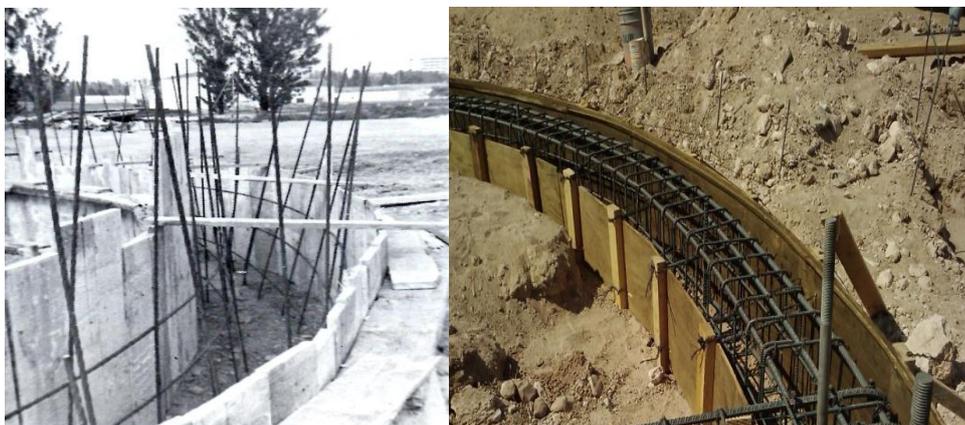


Fig. 5.1 Ejemplos de Armado de acero para cimentación circular. Tomado de Ref. 4. “SILOS”(izquierda), Cortesía TASIJI (derecha)



Fig. 5.2 Interior de un silo metálico apoyado en cimentación circular, cortesía TASIJI

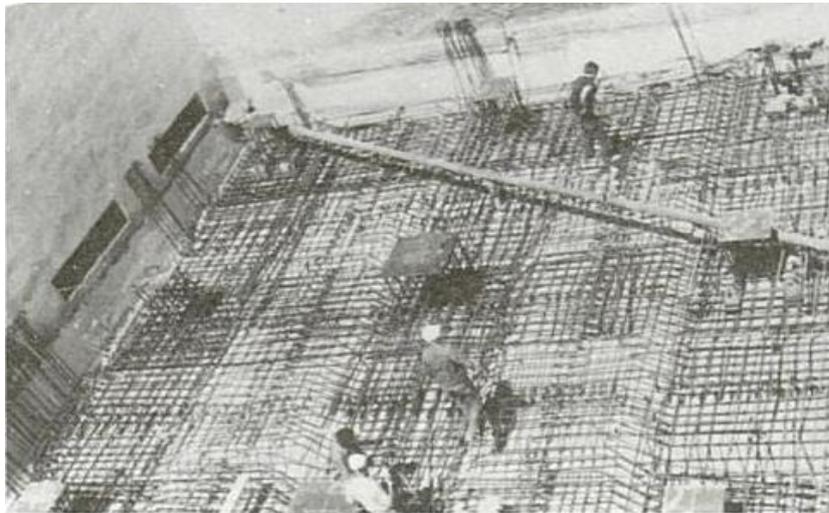


Fig. 5.3 Detalle de armado de losa de cimentación, en proceso de construcción. Tomado de Ref. 4 "SILOS"

Las losas de cimentación constituyen un tipo de cimentación somera que cubre toda el área bajo la estructura. Se emplean cuando la resistencia del suelo es baja o cuando es necesario limitar en forma muy estricta los asentamientos diferenciales en construcciones particularmente sensibles a éstos. Se clasifican en dos tipos:

- a) Losa plana: en la que las columnas apoyan sobre la losa de cimentación, directamente o por un intermedio de capiteles, pero sin que existan vigas de unión en los ejes de columna. La losa plana puede aligerarse con diversos procedimientos y tiene como ventaja la sencillez constructiva, pero con mayores volúmenes de concreto.

- b) Losa con contratraves (vigas de cimentación): se emplean cuando hay claros y cargas elevadas, frecuentemente se convierten en un cajón con losa.

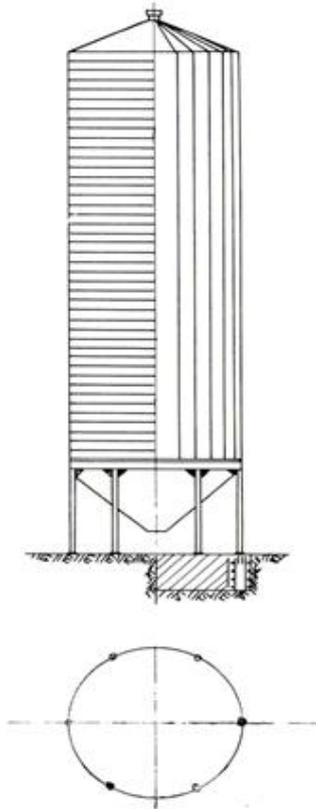


Fig. 5.4 Planta y alzado de un silo cilíndrico de chapa ondulada elevado sobre pilares. Tomado de Ref.4 “SILOS”



Fig. 5.5 Ejemplo de Losa de Cimentación para recibir batería de silos metálicos apoyados en columnas de concreto hidráulico. Tomado de Ref.4 “SILOS”

Los pilares sobre los que se apoyan las celdas de los silos y sus tolvas trabajan a flexión compuesta bajo el efecto de las cargas verticales debidas al peso propio de la construcción, al peso de la materia ensilada y a las reacciones verticales originadas por la acción del viento, y bajo el efecto del momento de volteo de la construcción debido a la presión horizontal del viento.

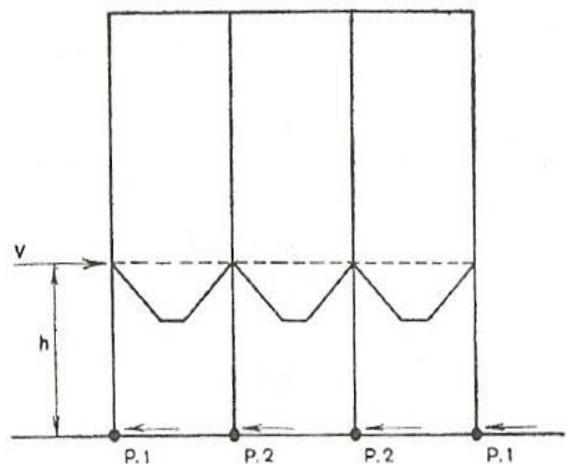


Fig. 5.6 Fuerzas actuantes en un silo apoyado sobre pilares. Tomado de Ref. 6 “Construcción de Silos, Teoría y Práctica”

Cimentaciones de fondo inclinado con galería: Se construyen como las de fondo plano, pero tienen además una galería subterránea utilizada para contener un tornillo o cinta transportadora.

La galería debe ser de dimensiones suficientes para permitir la fácil inspección a lo largo del sistema de transporte y la profundidad adecuada para que el grano caiga por gravedad desde el interior de las celdas hasta el tornillo de transporte

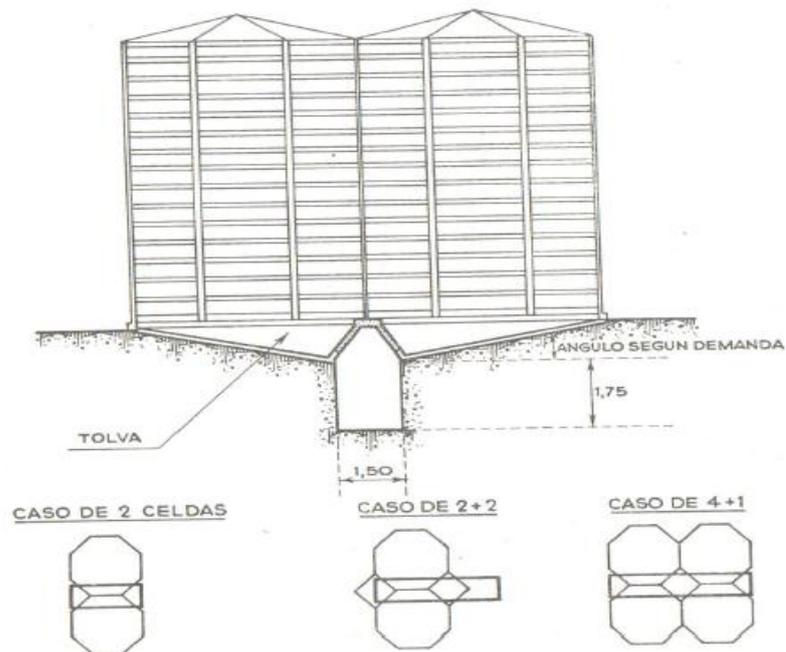


Fig. 5.7 Silo apoyado sobre galería subterránea, tomado de Ref.6 “Construcción de silos, Teoría y Práctica”

Cimentaciones sobre tolvas: Un tipo de ellas se construye por pilares de concreto armado que se prolongan y ensanchan, en forma de embudo, formando las tolvas. Las celdas se apoyan directamente sobre ésta estructura.

Las tolvas de celdas octogonales se prolongan mediante pilares de concreto armado que reciben las cargas superiores y las transmiten al terreno por medio de losas de concreto armado.

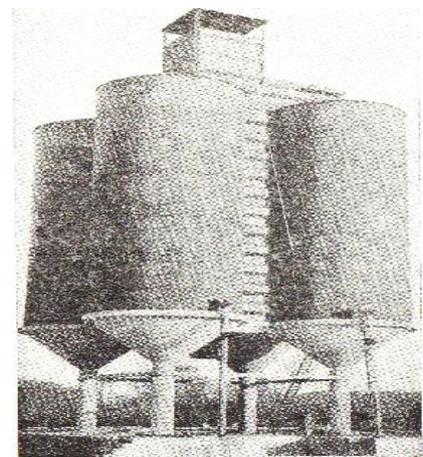


Fig. 5.8 Silo en construcción (el almacén bajo el silo no se ha construido todavía) Tomado de Ref.6 “Construcción de Silos, Teoría y Práctica”

Cuando las celdas cuadradas son pequeñas, la prolongación no se hace mediante pilares. Por otra parte, cuando el número de celdas justifica el uso de tornillo o cinta transportadora se prevé en las cimentaciones una galería para alojar dicho equipo.

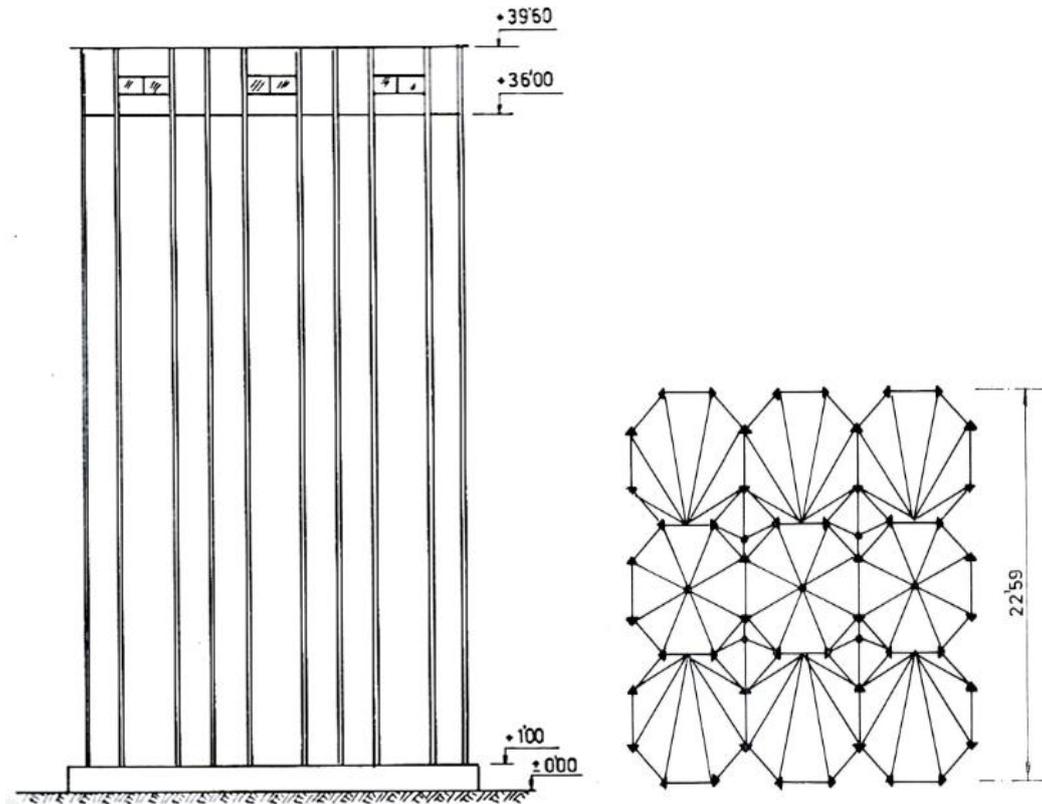


Fig. 5.9 Planta y alzado de silo octogonal multicelular. Tomado de Ref.4 “SILOS”

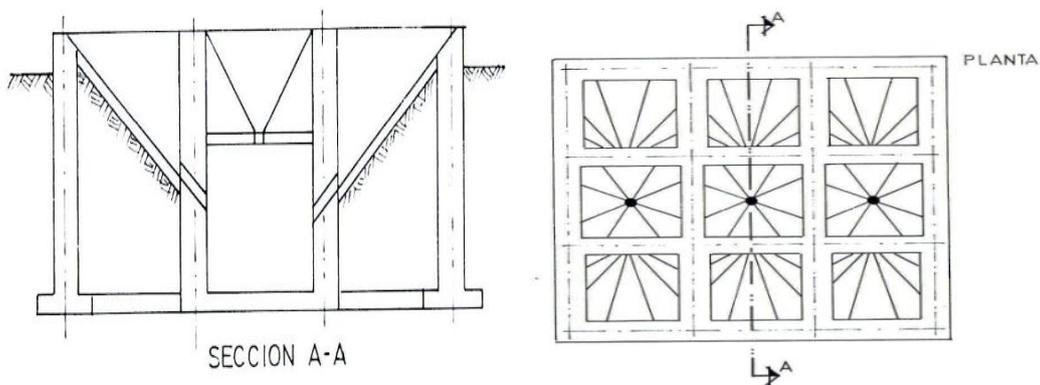


Fig. 5.10 Cimentación sobre tolva de silo octogonal multicelular. Tomado de Ref. 4 “SILOS”

Otra configuración de cimentaciones sobre tolvas se muestra en la imagen siguiente, para el diseño de este tipo de cimentación se requiere determinar las presiones en el fondo para obtener los esfuerzos en la tolva de concreto armado. Se distinguen dos elementos perfectamente diferenciados: *Anillo periférico prolongación del cuerpo del cilindro y tolva interior*.

El proceso constructivo a seguir es: realización de excavación a nivel de desplante de la cimentación, en este caso -4.50 m y construir anillo exterior de concreto armado, se procede al relleno de la tolva, utilizando para ello en material adecuado para conseguir una buena compactación. Finalmente se realiza armado de acero y colado de concreto de la tolva.

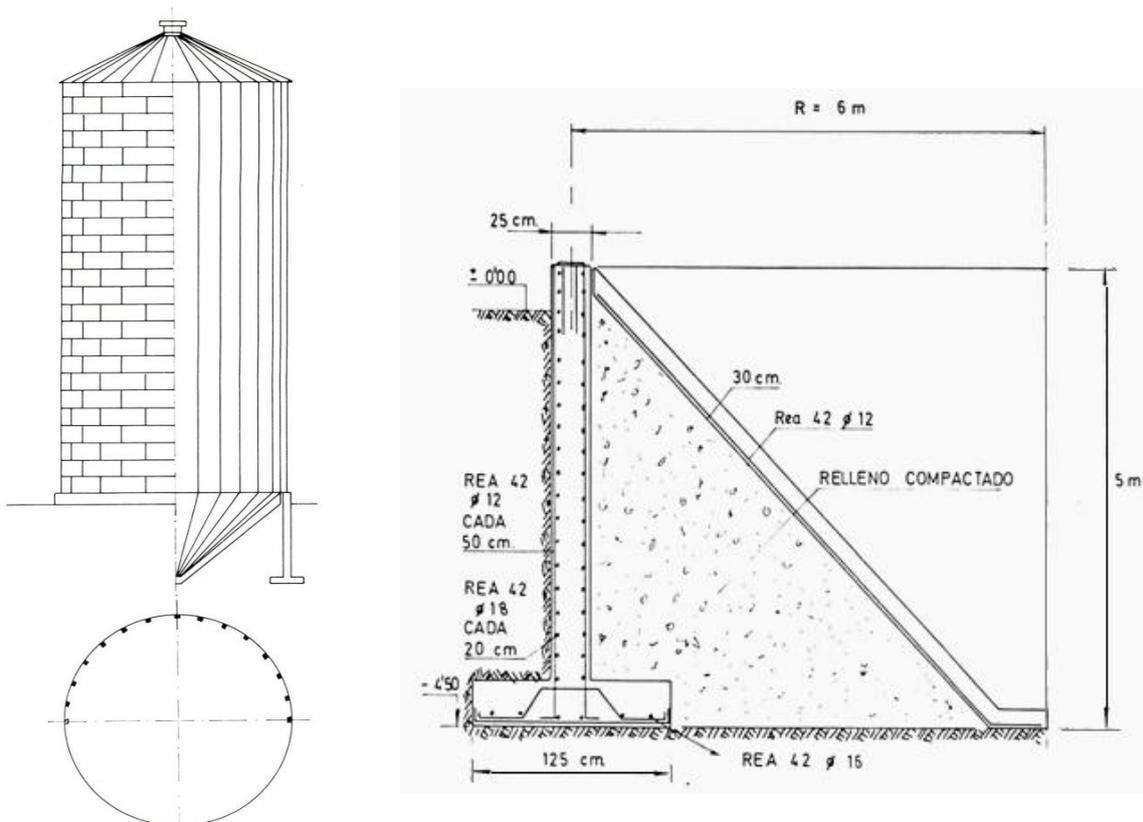


Fig. 5.11 Ejemplo de cimentación sobre tolva. Tomado de Ref. 4 “SILOS”

Cimentaciones sobre pilas o pilotes: Los silos se construyen sobre pilotes para transmitir las cargas de la cimentación a los estratos más resistentes, es decir, cuando el terreno superficial tiene baja capacidad de carga. También se usan cuando se quieren evitar cimentaciones muy voluminosas y cuando se tienen requisitos muy estrictos en asentamientos admisibles.

El Dr. Roberto Meli Piralla (Ref. 7) menciona las siguientes características principales para cimentaciones a base de pilotes.

- *La función más común de los pilotes es la de transmitir cargas de compresión a los estratos resistentes del suelo.*
- *Los pilotes son elementos estructurales aptos para resistir cargas esencialmente axiales; su capacidad está regida por la carga que puede aceptar el suelo sin que ocurra penetración del pilote y por la carga que es capaz de resistir el pilote mismo sin presentar una falla estructural.*
- *Los pilotes pueden verse sujetos a cargas laterales importantes por efectos de sismo o viento y en zonas marítimas por fuerzas de oleaje.*
- *Los pilotes verticales no son elementos eficientes para resistir cargas laterales, de manera que cuando tienen una magnitud apreciable es recomendable resistirlas de otra forma. Esto se logra, por ejemplo, enterrando la estructura a cierta profundidad para que el empuje pasivo del suelo sobre la parte enterrada equilibre las fuerzas laterales o mediante pilotes inclinados en los que la componente horizontal de la fuerza axial a ellos aplicada equilibra la carga lateral.*

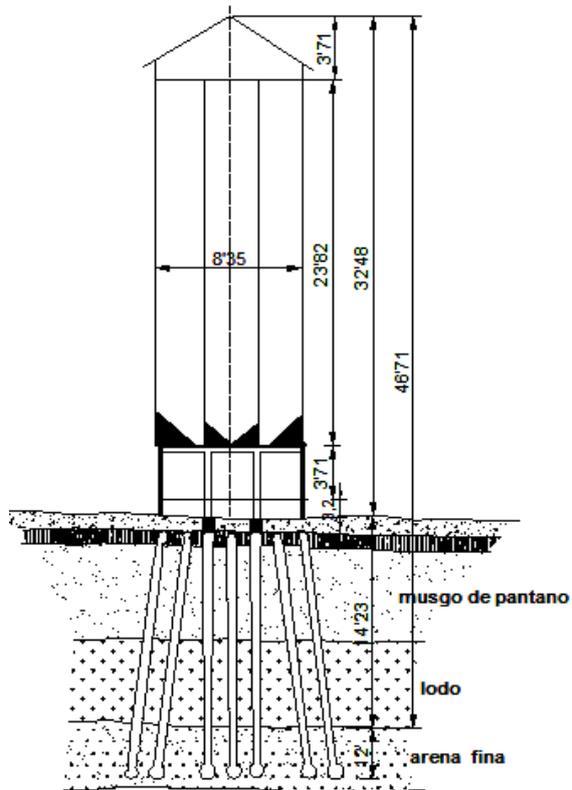


Fig. 5.12 Silo apoyado sobre pilotes. Tomado de Re. 5 "SILOS"

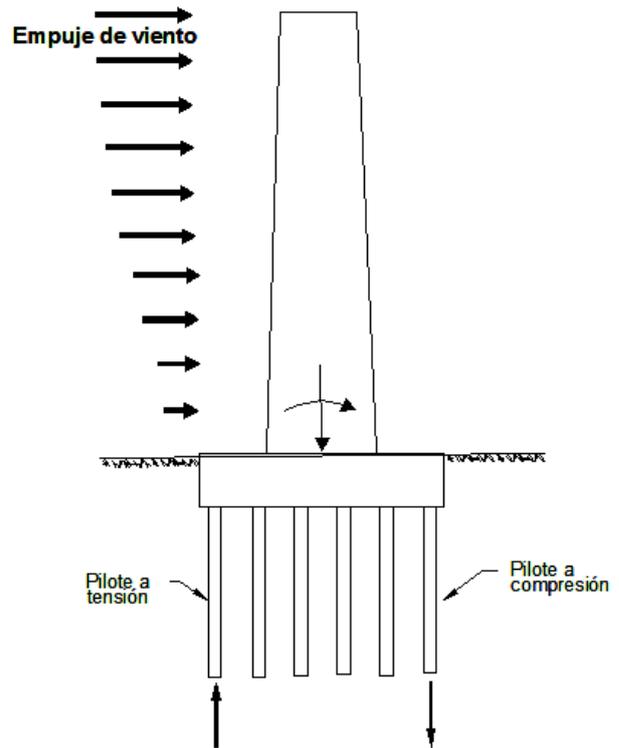


Fig. 5.13 Tensión en pilotes por momento de vuelte. Tomado de Ref. 7 "Diseño estructural"

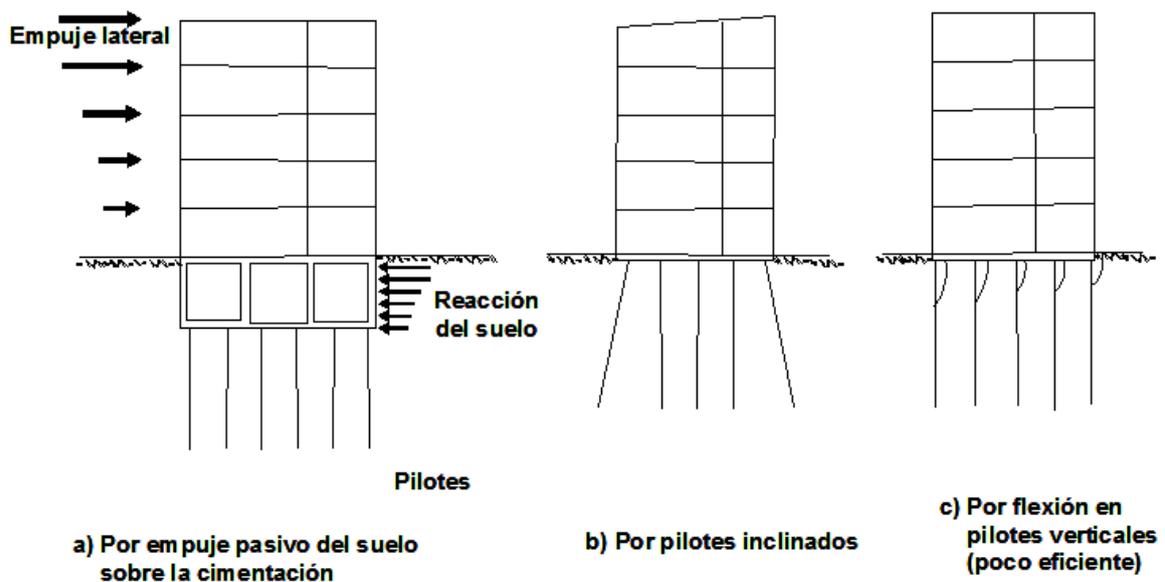


Fig. 5.14 Mecanismos para resistir cargas laterales importantes en cimentaciones piloteadas. Tomado de Ref. 7 "Diseño estructural"

6. FALLAS EN CIMENTACIONES PARA SILOS

Generalmente la falla de una cimentación es debida:

- a) A no haberse efectuado una correcta investigación del lugar, o a una incorrecta interpretación de los resultados.
- b) A errores de proyecto en la cimentación.
- c) A mano de obra defectuosa en la construcción de la cimentación
- d) A previsión insuficiente de los fenómenos naturales como: lluvias, inundaciones, condiciones térmicas, entre otras.
- e) También puede ocurrir cuando se busca tener un grado excesivo de seguridad cuando se considera en el análisis solo uno de los factores que intervienen.

A continuación se enlistan algunos casos históricos de fallas en cimentaciones para silos, describiéndose brevemente el tipo de falla y las causas que llevaron a su ocurrencia, posteriormente se hace una descripción más amplia describiendo a detalle los casos más representativos y de los cuales existe mayor información por haber sido motivo de estudio debido a sus características.

En las referencias No.3, 5, 9,10, 17 y 19 pueden consultarse los datos de los documentos consultados para la descripción de los casos de falla que se describen en el presente capítulo.

TABLA 6.1 FALLAS HISTORICAS EN CIMENTACIONES PARA SILOS

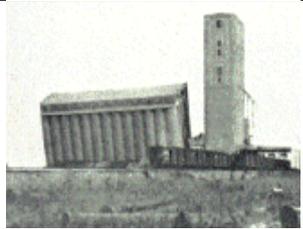
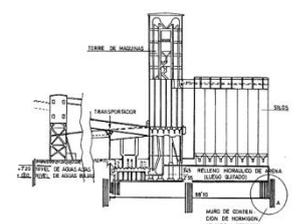
IMAGEN	SILO	FALLA	CAUSAS
	Silo de concreto armado para almacenamiento de cereales en Transcona Canadá, 1913	Hundimiento	Debido a alcanzarse a resistencia límite de apoyo en una capa subyacente de arcilla plástica y que condujo a una falla al corte.
	Silo de concreto armado en Portland City, U.S.A	Asentamiento	Se hincaron un número mayor de pilotes creyendo que si la capacidad de soporte de algunos era deficiente, el agregado de un mayor número de ellos daría la capacidad soporte requerida.

TABLA 6.1 FALLAS HISTORICAS EN CIMENTACIONES PARA SILOS

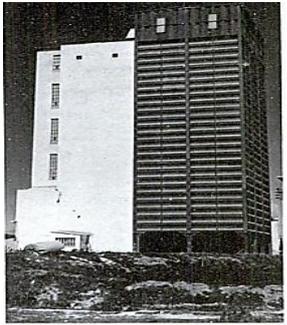
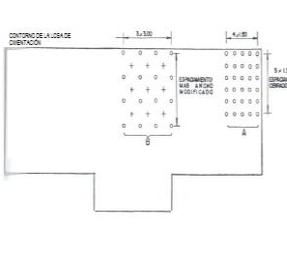
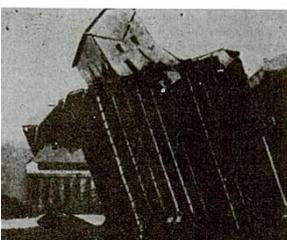
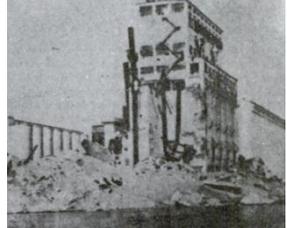
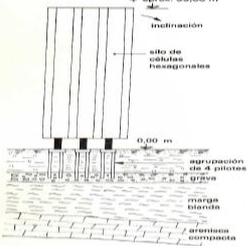
IMAGEN	SILO	FALLA	CAUSAS
	<p style="text-align: center;">Silo metálico multicelular para almacenamiento de cereales en la provincia de Llerida España, 1970</p>	<p style="text-align: center;">Asentamiento</p>	<p>Este es un caso típico en el que no se tomó un coeficiente de seguridad suficiente, por lo que estuvo a punto de alcanzarse la resistencia límite de apoyo, producirse la rotura del terreno y como consiguiente el hundimiento de la instalación.</p>
	<p style="text-align: center;">Silo de concreto armado para almacenamiento de granos en Szolnok, Hungría</p>	<p style="text-align: center;">Asentamiento</p>	<p>En la búsqueda por reducir los asentamientos se proyectó una losa de concreto sostenida por pilotes. Las vibraciones debidas al hincado, combinadas con el efecto del agua que fue expulsada, produjo la licuación de la arcilla.</p>
	<p style="text-align: center;">Silos Torre con forma de bala, en Red River Valley en Canadá</p>	<p style="text-align: center;">Asentamiento</p>	<p>La construcción de los silos se hizo demasiado cerca que los bulbos de presión en el suelo se superpusieron, lo que provoco grandes tensiones y asentamientos en la cercanía de las cimentaciones</p>
	<p style="text-align: center;">Silo metálico para almacenamiento de cereales en Ogilvie Fort William, Canadá</p>	<p style="text-align: center;">Hundimiento</p>	<p>Debido a la existencia de un suelo de condiciones portantes pobres.</p>
	<p style="text-align: center;">Silo de concreto armado para almacenamiento de cereales en Fargo Dakota del Norte, U.S.A, 1955</p>	<p style="text-align: center;">Hundimiento</p>	<p>La pantalla de pilotes que rodeaba el silo fue incapaz de soportar los esfuerzos tangenciales (horizontales) producidos por las arcillas al ser sometidas a las cargas verticales a través de la losa.</p>
	<p style="text-align: center;">Silo de concreto armado para almacenamiento de cereales en Puerto Artur, Winnipeg Canadá, 1959</p>	<p style="text-align: center;">Hundimiento</p>	<p>En una colisión de barcos varios pilotes habían quedado dañados</p>

TABLA 6.1 FALLAS HISTORICAS EN CIMENTACIONES PARA SILOS

IMAGEN	SILO	FALLA	CAUSAS
	<p style="text-align: center;">Silo de concreto armado para almacenamiento de cereales en Burg, Alemania, 1967</p>	<p style="text-align: center;">Hundimiento</p>	<p>Los pilotes de la cimentación de 18.23m de longitud y 40 cm de diámetro se debilitaron en toda la longitud por agresividad del agua del terreno, causando la inclinación del silo hasta caerse y partirse en dos.</p>
	<p style="text-align: center;">Silo de concreto armado de una cooperativa agrícola, Norte de Francia</p>	<p style="text-align: center;">Asentamiento</p>	<p>Debido a la falta de conocimientos previos y el desconocimiento de la acción de los pilotes agrupados.</p>
	<p style="text-align: center;">Silo para cereales al sudoeste del Macizo Central</p>	<p style="text-align: center;">Hundimiento</p>	<p style="text-align: center;">Elección de un tipo de cimentación inadecuada</p>

6.1 Silo de concreto armado para almacenamiento de cereales en Transcona Canadá, 1913

Es famosa la falla de cimentación ocurrida en los silos para cereales de Transcona, Canadá. Su construcción se inició en 1911 y culminó en otoño de 1913, el proyecto se realizó con la finalidad de dar alivio a la congestión en los patios de ferrocarril de Winnipeg durante los periodos pico de movimientos de grano.

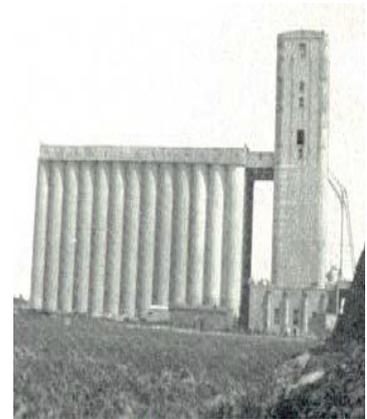


Fig. 6.1 Silos de Transcona, Canadá recién terminados en 1913

A continuación se muestra el proyecto en planta para la construcción del complejo consistente en tres secciones:

Una casa de secado de 18 x 30 x 60 pies de altura (5.48 x 9.14 x 18.29 m), una casa de trabajo de 70 x 96 x 180 pies de altura (21.34 x 29.26 x 54.86 m) y la casa de silos de 77 x 195 x 102 pies de altura (23.50 x 59.44 x 31.09 m) con una capacidad de 35,240 m³. Esta última constaba de 65 celdas circulares y 48 interceldas romboides.

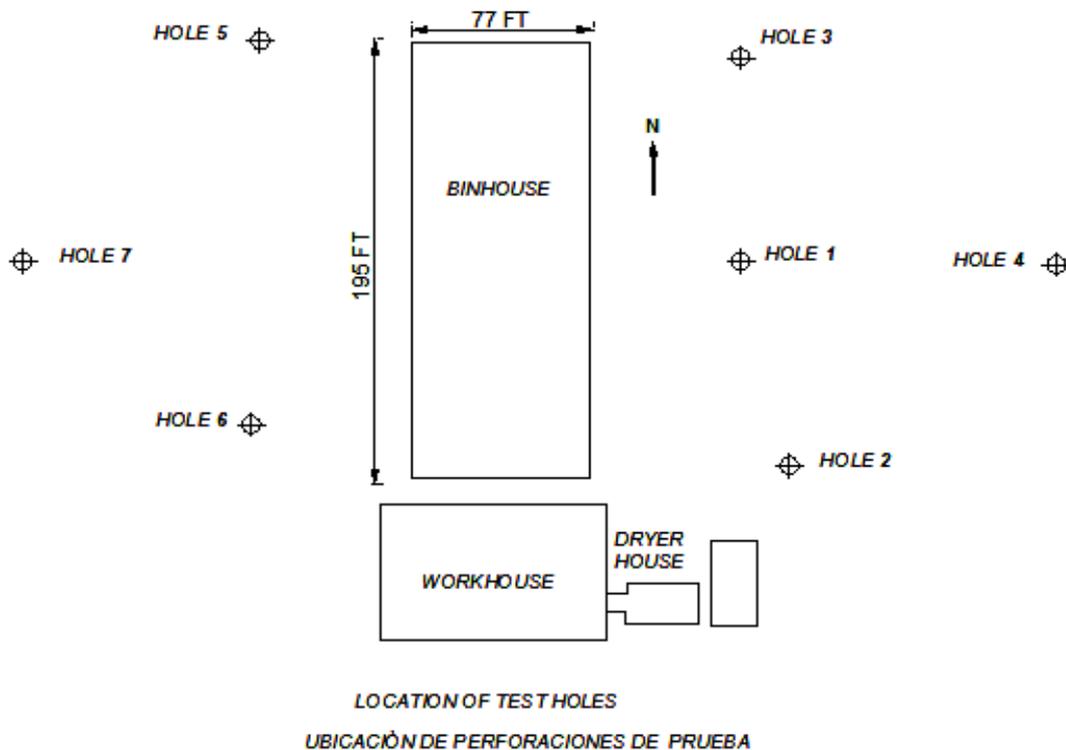


Fig. 6.2 Planta de construcción de silos de Transcona. Tomado de Ref.3 “THE FOUNDATION FAILURE OF THE TRANSCONA GRAIN ELEVATOR”

La cimentación consistió en una losa de concreto armado de 60 cm de espesor situada en la cota -4.20 m. Para su diseño no se realizó investigación preliminar del subsuelo, se utilizó un coeficiente de trabajo admisible del terreno que había sido utilizado en estructuras vecinas y que fue obtenido de realizar ensayos superficiales en la cota -3.60 m resultando un valor de 3 kg/cm² mediante una prueba de placa.

La carga muerta de la casa de silos era de casi 20,000 Ton. En septiembre de 1913 se inició el llenado de manera uniforme, en octubre del mismo año mientras el silo almacenaba 31,500 m³. Se presentó un brusco asentamiento vertical que ya era de 30cm al cabo de media hora produciendo los conocidos levantamientos a ambos lados de la construcción, posteriormente la estructura empezó a inclinarse hacia el oeste y a las 24 horas ya formaba un ángulo de 28°33' con la vertical quedando los costados oeste y este en las cotas -13.50 m y -3.38 m respectivamente tal y como a continuación se muestra.

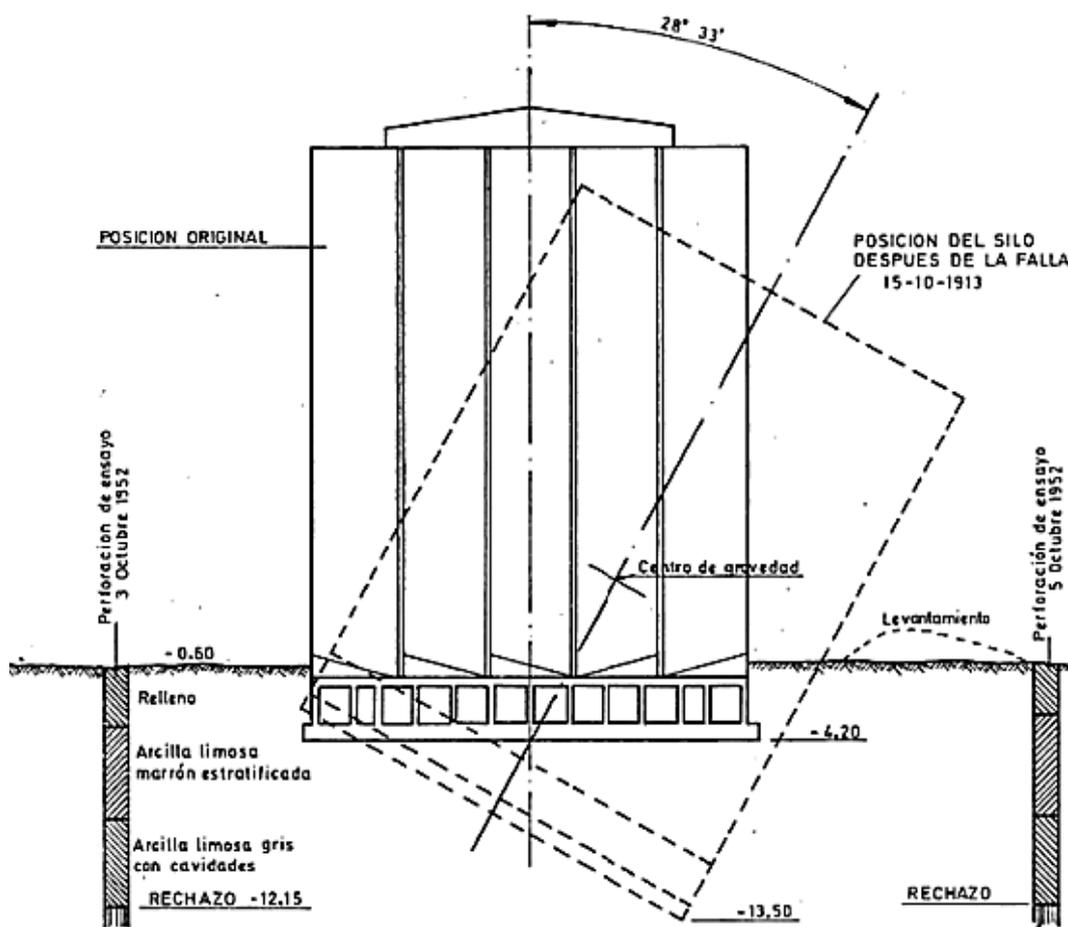


Fig. 6.3 Posición en que quedó el silo de Transcona después de la falla del terreno. Tomado de Ref.5 “SILOS”

Cuando se iniciaron los asentamientos la carga uniformemente distribuida sobre el terreno era de 2.82 kg/cm^2 menos 0.65 kg/cm^2 debido a la profundidad de las excavaciones, es decir, por lo tanto la presión real sobre el terreno era de 2.17 kg/cm^2 .

Los silos fueron recimentados colocando mediante gatos hidráulicos nuevas pilas apoyadas sobre la roca que se encontraba en la cota -12.15 m .

Las obras de reparación fueron ejecutadas mediante galerías por debajo del sótano de la casa de silos. La instalación se puso nuevamente en marcha en 1916.

En 1952 la división de Building Research de la Canadian National Research Council de la Universidad de Manitoba y el profesor Peck realizaron perforaciones a unos 18.00 m de los silos.

La estratificación obtenida fue:

- 1) arcilla orgánica y marrón entre cotas 0.00 m y -1.00 m
- 2) arcilla limosa marrón entre cotas -1.00 m y -1.50 m
- 3) arena fina entre cotas -1.5 m y -2.00 m
- 4) arcilla limosa marrón estratificada entre cotas -2.00 m y -6.00 m
- 5) arcilla limosa gris con cavidades calcáreas y limo estratificado entre cotas -6.00 m y -10.00 m
- 6) grava caliza dispersa entre -10.00 m y -10.50 m
- 7) limo, arena y cavidades de grava entre cotas -10.50 m y -11.25 m
- 8) limo, arena, grava y polvo de roca entre cotas -11.25 m y -12.00 m

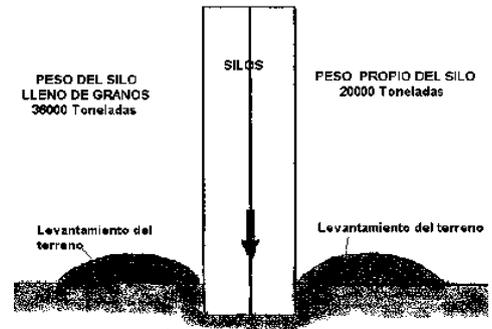


Fig. 6.4 Levantamientos producidos en ambos lados por hundimiento de silos.

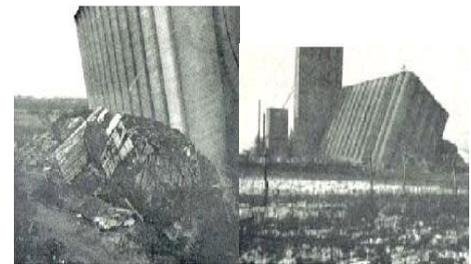


Fig. 6.5 Estado de los silos después de producirse falla en cimentación

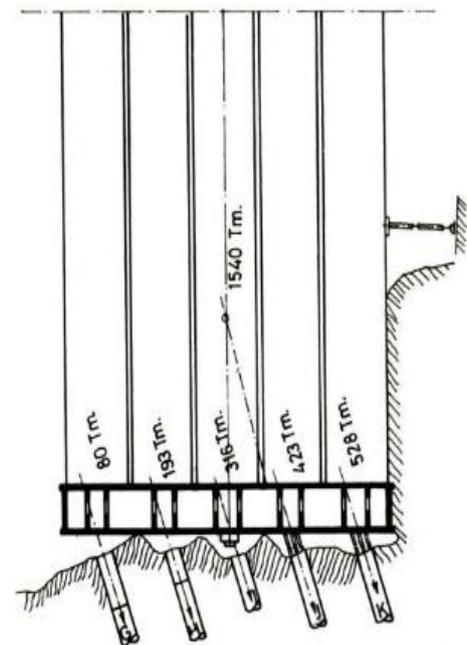


Fig. 6.6 Sistema utilizado para colocar la casa de silos a su posición original. Tomado de Ref.5 "SILOS"

9) roca en cota -12.00 m

De las pruebas realizadas a las muestras inalteradas de arcilla se obtuvieron los siguientes resultados: que el contenido de agua aumentaba con la profundadas llegando a un máximo de 60% y que la resistencia a la compresión qu decrecía de 1.0 kg/cm² a 0.60 kg/cm².

El límite líquido medio era del 105% y el límite plástico del 35%; por lo que el índice plástico era del 70%. La sensibilidad (la relación de resistencia en compresión simple en estado natural y en estado remoldeado) fue de 2. De lo anterior se concluyó que la arcilla era altamente plástica.

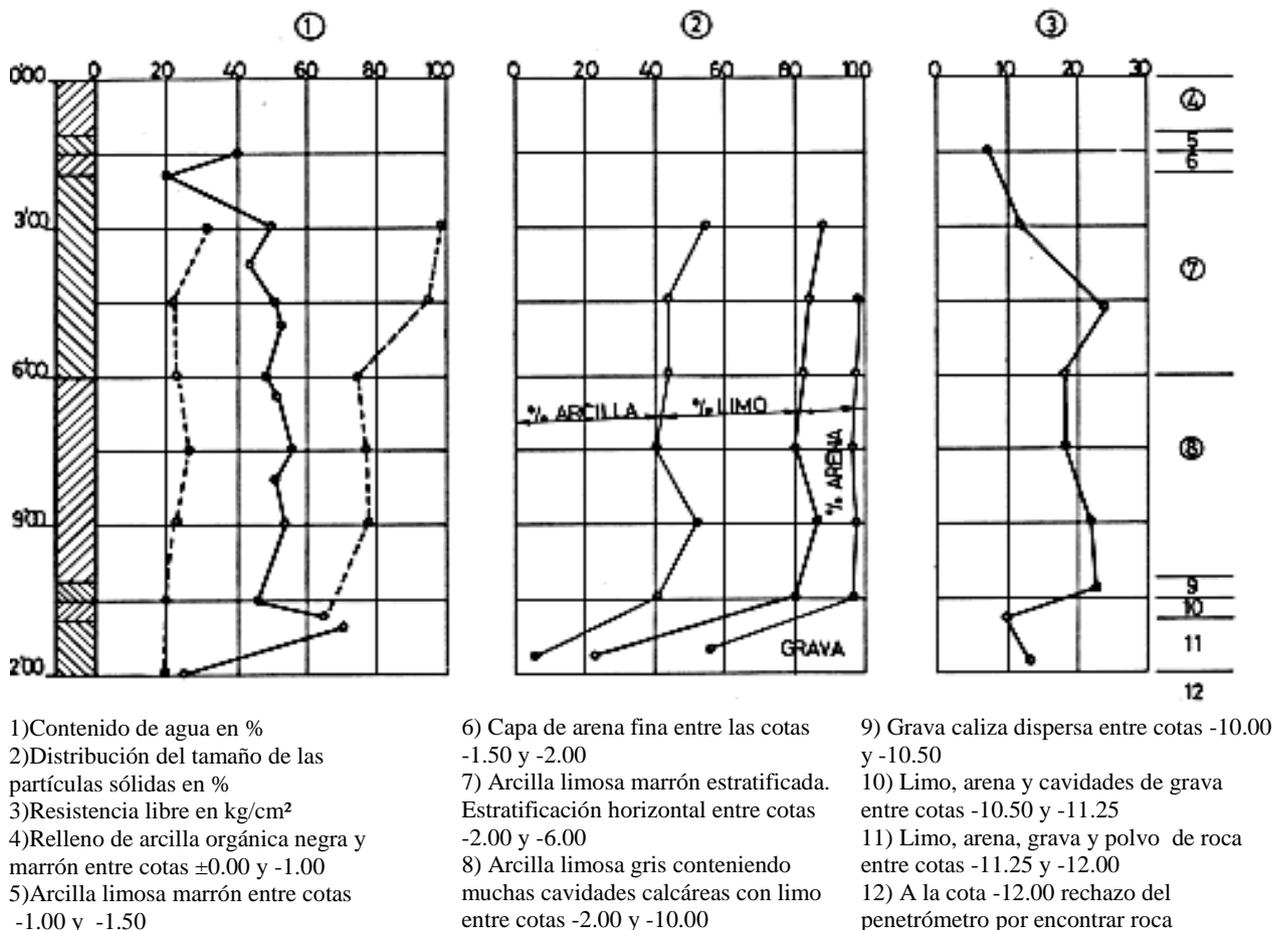


Fig. 6.7 Resultado de los ensayos realizados por PECK en 1952 mediante sondeos del terreno. Tomado de Ref. 5 "SILOS"

Haciendo uso de la fórmula para determinar la capacidad de carga del profesor Terzagui se tiene:

$$q_n = C N_c = \frac{1}{2} q_u N_c$$

Dónde:

q_n = Capacidad límite teórica de soporte en kg/cm^2

q_u = Resistencia a la compresión sobre muestras sin soporte lateral en kg/cm^2

El valor de N_c se obtiene de la siguiente expresión de acuerdo con el profesor A.W. SKEMTON:

$$N_c = 5 (1 + B/5L) (1 + D/5B)$$

Dónde:

B = Ancho de la cimentación en metros

L = Largo de la cimentación en metros

D = Profundidad de la cimentación en metros

Sustituyendo valores se tiene:

$$N_c = 5 (1 + 23.5/5 * 59) (1 + 3.60/5*23.50) = 5.56$$

$$q_u = 0.85 \text{ kg/ cm}^2 \text{ (promedio de los datos obtenidos)}$$

$$q_n = (1/2) (0.85) (5.56) = \mathbf{2.36 \text{ kg/cm}^2}$$

Cuando la falla ocurrió en el terreno se ejercía una presión de 2.17 kg/ cm^2 , valor que es inferior a la capacidad límite teórica calculada. Sin embargo, tomando en cuenta el valor de 0.6 kg/ cm^2 obtenido en la parte más profunda se tiene:

$$q_n = (1/2) (0.6) (5.56) = \mathbf{1.67 \text{ kg/cm}^2}$$

De estos resultados se puede concluir que es más seguro utilizar los valores mínimos para el cálculo de la capacidad límite de carga.

L. KARIAF indica en uno de sus cálculos que la velocidad de carga del terreno pudo haber contribuido al accidente, ya que la resistencia límite de la capacidad de carga de un suelo es menor cuando la carga es aplicada en forma instantánea que cuando la carga

y la consolidación son aplicadas en forma gradual. Dicho fenómeno es aplicado en el caso de suelos cohesivos, ya que se requiere de un periodo muy largo antes de hallarse completamente consolidados.

Basándose en los datos del profesor PECK, se calculó que la resistencia al corte se desarrolla por consolidación aproximadamente en un año, mientras que la carga del grano fue aplicada en 45 días, lo cual es equivalente a una aplicación instantánea de la carga.

Por otra parte, de acuerdo a la teoría del esfuerzo crítico de borde de FRÖHLICH-MAAG, la presión límite de soporte en el borde de una cimentación está dada por:

Para una carga de aplicación instantánea

$$\Pi * D * \gamma * \text{sen } \varphi$$

Para una carga progresiva de consolidación

$$\frac{\Pi * D * \gamma}{\text{cotg } \varphi - (\pi/2 - \varphi)}$$

Siendo:

φ = Angulo de rozamiento interno del terreno

γ = Densidad de la arcilla

Resultados:

$$1.70 \text{ kg/cm}^2$$

Resultados:

$$2.05 \text{ kg/cm}^2$$

De los resultados antes descritos es que puede explicarse el que se haya producido la falla al corte con hundimiento de los silos.

6.2 Silo de concreto armado en Portland City, USA

Se trata de un ejemplo que refleja el error que se comete al creer que una cimentación con pilotes es necesariamente segura.

La estructura comprendía silos de almacenamiento, un cobertizo de las vías de dos pisos y una casa de operaciones con 79 celdas de 54 m de altura. Los silos cubrían un área de 41 x 32 m y una altura de 30 m, comprendían 99 células con una capacidad total de 37,300 m³.

La estructura estaba apoyada sobre una losa de concreto armado de 0.90 m de espesor soportada por aproximadamente 4,300 pilotes de madera, a cada uno de los cuales se le atribuyó una carga de 25 toneladas para cuando el silo estuviera totalmente cargado.

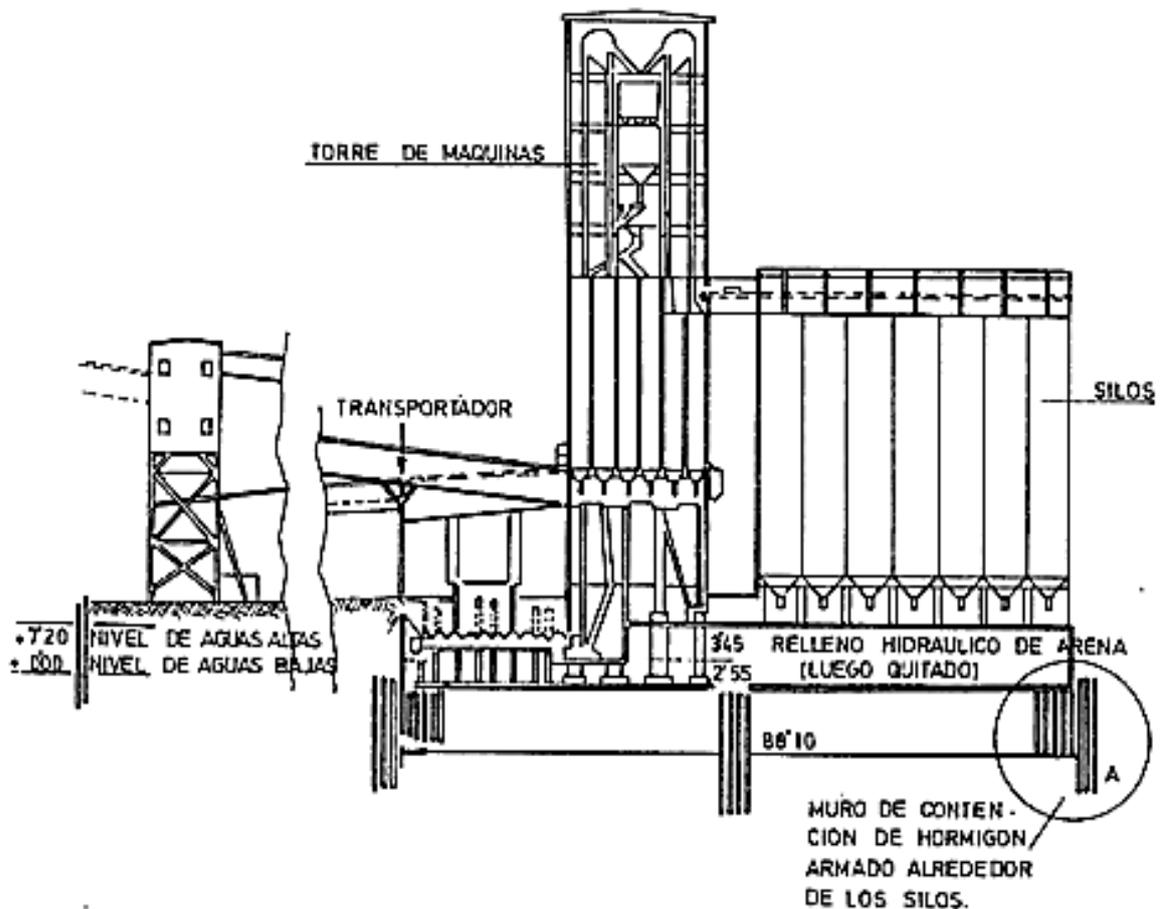


Fig. 6.8 Sección transversal de Silos de concreto armado en Portland City (USA). Tomado de Ref.9 "Fallas en Fundaciones"

Se desplantó la estructura sobre una ribera baja de un río con un nivel medio de 3m sobre las aguas bajas y a una distancia de 90 m del río, adyacente a un nuevo embarcadero. El nivel del terreno fue elevado hasta 9.60 m sobre el nivel de la superficie libre del agua.

Cuando comenzó la construcción, la ribera original fue excavada hasta 1.35m por encima de las aguas bajas y los pilotes de 12.0 a 13.5 m de longitud fueron hincados a distancias de 0.75 m entre centros en toda el área. Las cabezas de los pilotes quedaron con 15.0 cm dentro de la losa superior de concreto.

Para soportar la estructura se construyeron pedestales de varias alturas sobre la losa. Debajo de los silos la altura de los pedestales era de 4.80 m y el espacio formado entre la losa y los pisos se relleno con arena imitando la construcción de edificios de varios pisos sobre arena en África del Norte, donde se provee un sótano donde se almacena arena, la cual es trasladada hacia el lugar lo suficientemente elevado como para contrarrestar asentamientos mediante el peso extra colocado sobre dicho lado elevado.

Cuando los silos estaban contruidos a aproximadamente dos tercios de su altura y la casa de operaciones a una altura de entre 3.60 m y 4.50 m sobre el nivel de terreno se observó un asentamiento. Este asentamiento comenzó cuando el relleno de arena se colocaba sobre la losa, sin embargo la colocación de concreto de la superestructura no se suspendió hasta que se presentó un asentamiento de casi 60 cm bajo los silos de almacenamiento, mientras que bajo la casa de operaciones el asentamiento fue de entre 19 cm y 52 cm y bajo el cobertizo de las vías de entre 6 cm y 8 cm.

Antes de que la obra comenzara se ensayaron pilotes de prueba de 15 m a 30 m de longitud, algunos con cargas de hasta 40 toneladas. Durante el asentamiento la carga sobre cada pilote no excedía las 15 toneladas en los silos y de 9 toneladas en la casa de operaciones.

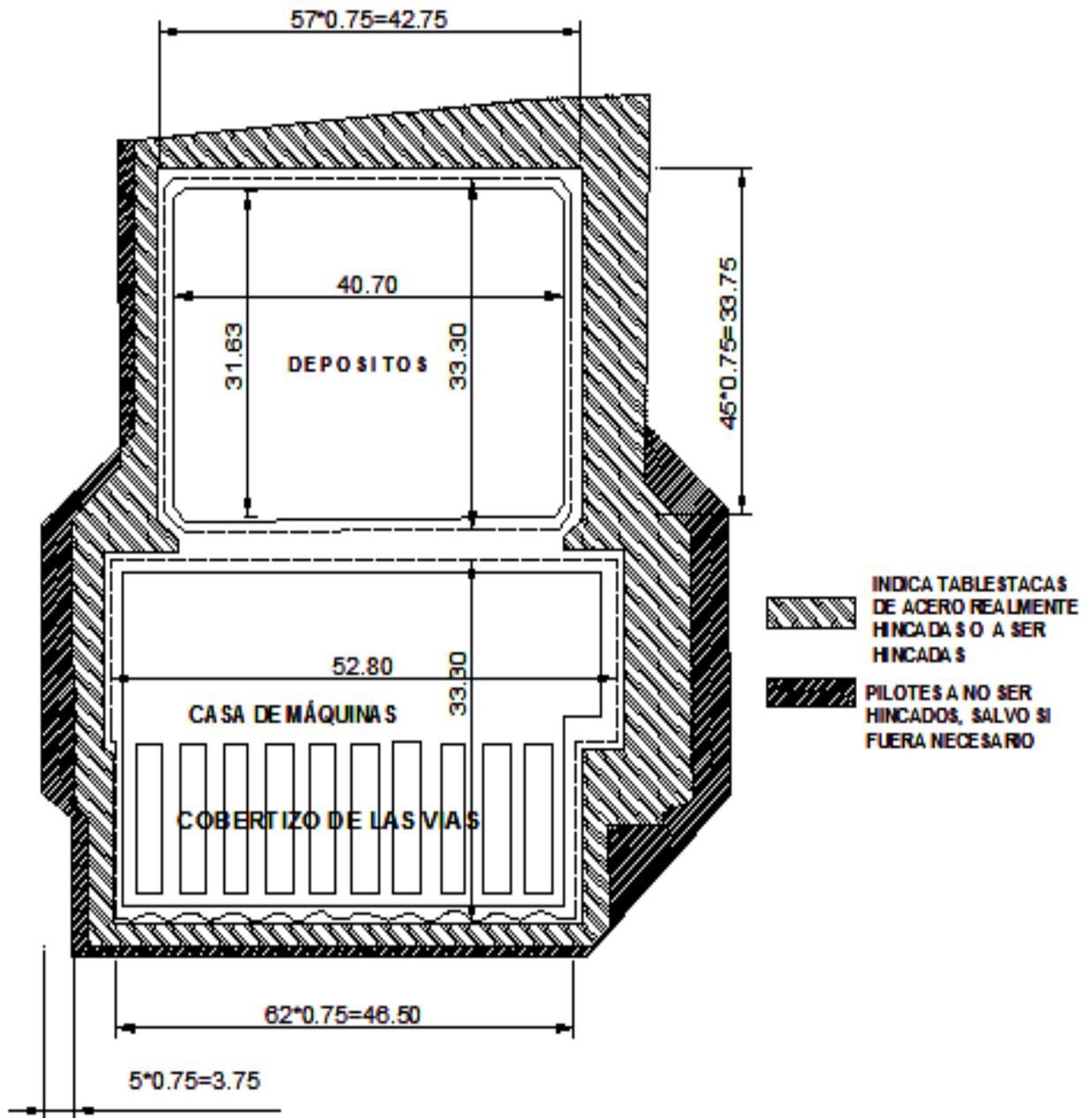
Como el asentamiento final de muchos de los pilotes fue excesivo, se hincaron un mayor número de ellos con la creencia de que si la capacidad de soporte de algunos pilotes era deficiente, el agregado de un mayor número de ellos daría la capacidad de soporte total requerida. En este caso este concepto fue incorrecto debido a la poca distancia entre pilotes y a que la longitud de los pilotes era mucho menor que el ancho de la estructura.

Ya que los pilotes por fricción no podían transmitir las cargas a una capa inferior con una capacidad de carga mayor, la cimentación actuaba como una losa de cimentación, encontrándose el plano efectivo de la cimentación al nivel de las puntas de los pilotes, donde la capacidad de soporte de la arena limosa semifluida era incapaz de soportar la presión de proyecto de 3.5 kg/cm^2 , además el poco espacio entre los pilotes incrementó la licuación del suelo blando y luego redujo su capacidad de soporte. Por otra parte la deducción del ensayo de carga también fue errónea, ya que en estas circunstancias el grupo de pilotes no podía soportar la carga de seguridad sobre un pilote aislado ya que un grupo de pilotes cortos no actúan por fricción colocados a poca distancia.

La primera medida de reparación fue construir una especie de ataguía construida por 2,684 pilotes en varias filas alrededor de la cimentación con la finalidad de que actuaran como un tablestacado para prevenir el movimiento lateral de la arena licuada. La primera fila fue hincada a aproximadamente 7.5 m de la estructura y las filas sucesivas se hincaron entre la primera fila y la estructura, la distancia entre estos pilotes era de 75 cm pero fueron hincados de 4.5 m a 6.0 m más profundos que los pilotes de la cimentación.

La segunda medida de reparación fue retirar el relleno de arena, con lo que se logró una reducción del 20% al 23% de la carga total. Con estas medidas se previnieron futuros asentamientos y pudo ponerse en funcionamiento sin más problemas.

PLANTA



Dimensiones en metros

Fig. 6.9 Atagüía de pilotes, alrededor de la losa de concreto armado. Tomado de Ref.9 “Fallas en fundaciones”

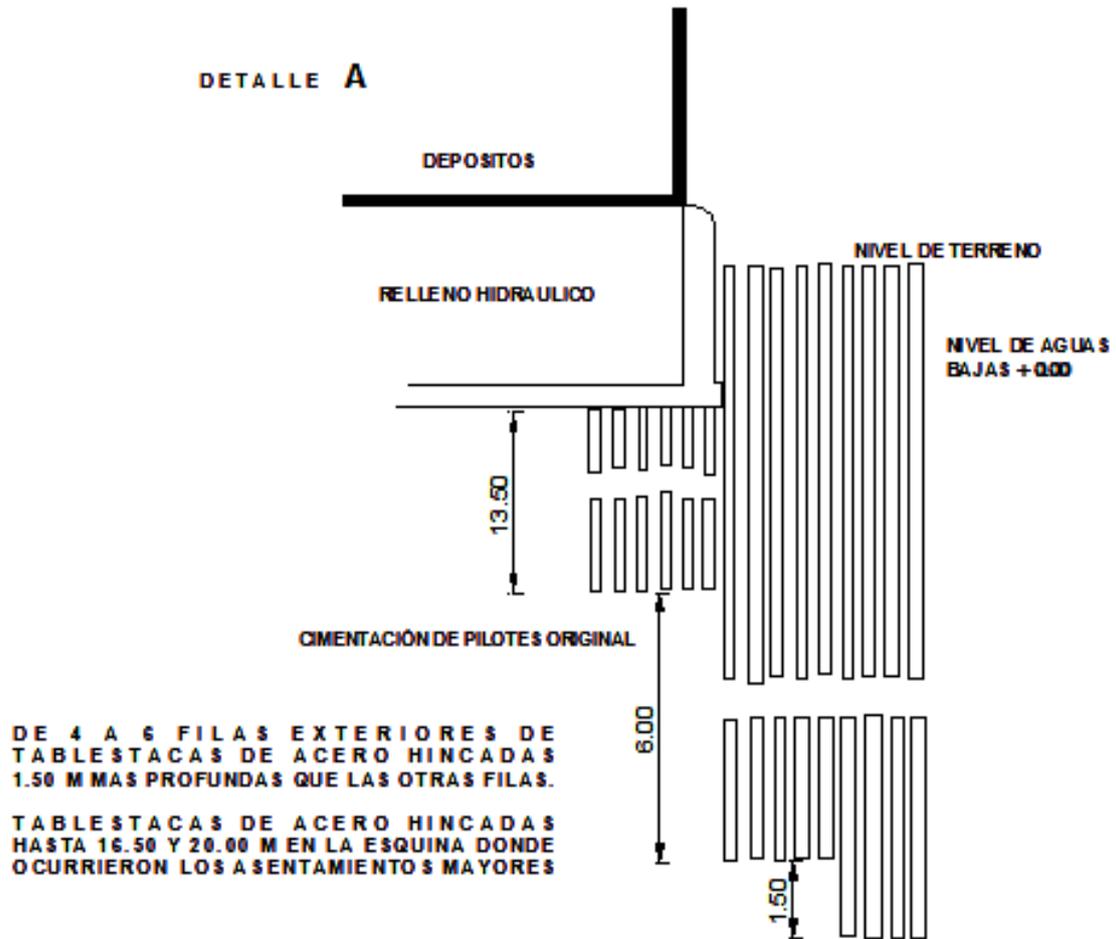


Fig. 6.10 Detalle de la colocación de los pilotes alrededor de la losa, con las profundidades alcanzadas. Tomado de Ref. 9 “Fallas en fundaciones”

6.3 Silo metálico multicelular para cereales en Lérida, España

Este es un caso, en el que no se tomó un coeficiente de seguridad adecuado, ya que no se realizaron ensayos de penetración para determinar los estratos del terreno y su capacidad de carga. Por lo que estuvo a punto de alcanzarse la resistencia límite de apoyo.

El silo constaba de seis celdas, se proyectó para una capacidad de 1,950 toneladas de trigo. Las dimensiones en planta eran de 8.46 m por 12.69 m y una altura total de 30.10 m, siendo la altura de las celdas de 23.4 m.

Se realizaron unas pruebas sobre la superficie mediante un penetrómetro de bolsillo. Para una resistencia del terreno de 2 kg/cm² apareció un asentamiento de 20 mm. Se cargó el aparato de nuevo hasta llegar a los 2 kg/cm² y el asentamiento fue de 80 mm. Al continuar con las pruebas a mayor profundidad se observó que a mayor profundidad de excavación el terreno se volvía más plástico y húmedo, por lo que se proyectó una losa de concreto armado de 14.91 m por 10.50 m y cimentada en la cota -1.30 m.

En el proyecto de cimentación se consideró una carga real sobre el terreno de 1.52kg/cm², considerando como cargas permanentes el peso de la cimentación y el peso del silo metálico y como sobrecarga el peso del grano ensilado, además cabe mencionar que en los cálculos no se

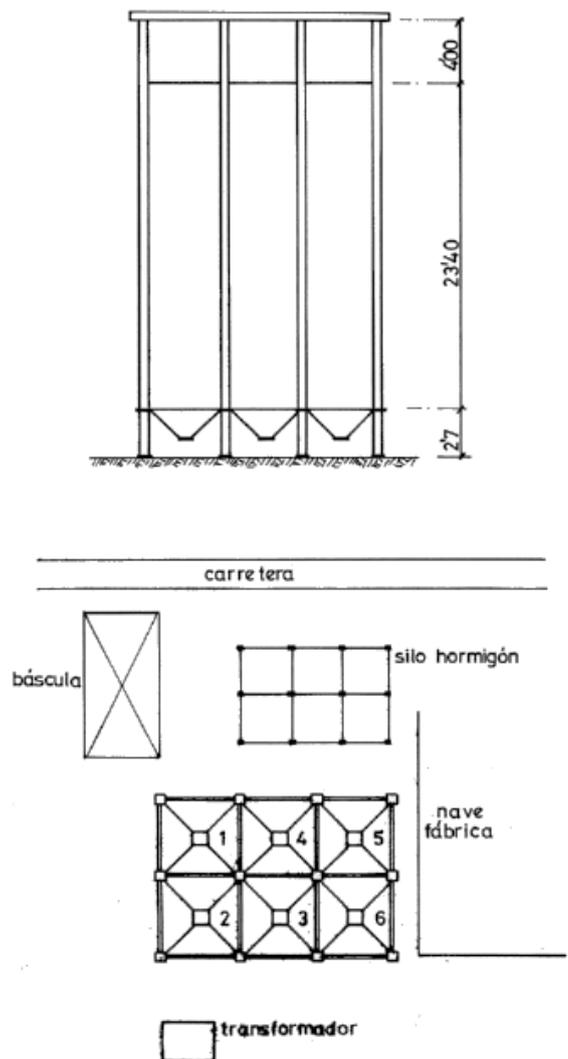


Fig. 6.11 Planta y alzado de la instalación. Tomado de Ref.5 "SILOS"

tuvieron en cuenta los efectos del viento.

La construcción de la losa de cimentación terminó en agosto de 1969 y el montaje del silo en noviembre del mismo año, para comenzar el llenado uniforme en enero de 1970, por lo que para el 5 de febrero habían 665 toneladas de cereal almacenadas, por lo que la carga que se transmitía al terreno era de 0.70 kg/cm^2 . Ya para el 27 de Febrero de 1970 el silo se había llenado de manera no uniforme con 940 toneladas de cereal, ya que solo se llenaron las celdas 2 y 3.

Pensando en la posibilidad de que se presentaran asentamientos diferenciales, se colocaron en el silo testigos que permitían determinar los desplazamientos verticales y horizontales en la instalación. El 1 de marzo de 1970 en forma súbita, apareció un primer asentamiento diferencial de 20 mm cuando la carga que se transmitía al terreno era de 0.89 kg/cm^2 . La báscula que se muestra al lado del silo (Fig. 6.11) quedó fuera de servicio y en la nave que se encuentra al este aparecieron serias grietas. En tres días, sin que se incrementara la carga el asentamiento ya era de 35mm y en la zona sur del silo apareció un desplome de 120 mm.

A finales de marzo el silo contenía 1,087 toneladas y la carga transmitida al terreno era de 0.967 kg/cm^2 y el asentamiento en este momento era de 52 mm. Debido a la inclinación del silo se continuó con el llenado de las celdas 4 y 5, con lo cual se logró parcialmente la verticalidad, de tal manera que el desplome llegó a ser de 80 mm.

Para abril la carga permanecía prácticamente constante, mientras que el asentamiento aumento a 65 mm.

A continuación se muestra la variación de cotas de la superficie de la losa de cimentación, la cual sufrió deformaciones elásticas, así como la variación de toneladas almacenadas en el silo y los asentamientos producidos por las mismas durante los meses de febrero, marzo, abril y mayo de 1970.

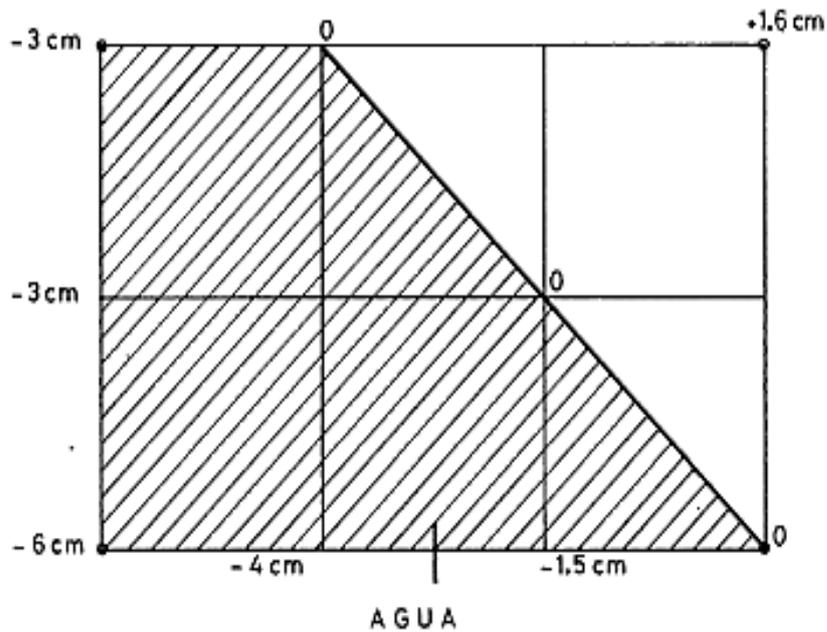


Fig. 6.12 Asentamientos que se presentaron en la losa de cimentación. Tomado de Ref.5 “SILOS”

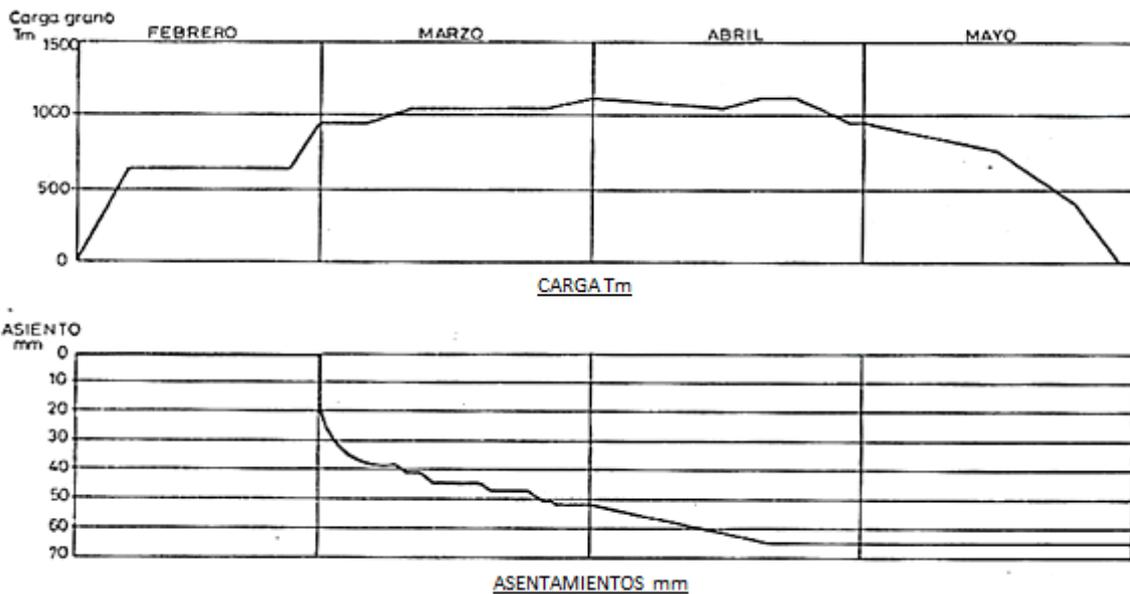


Fig. 6.13 Variación de asentamientos en la losa de cimentación en función de las toneladas de cereal almacenadas. Tomado de Ref.5 “SILOS”

A finales del mes de abril y en vista de los continuos asentamientos que presentaba la instalación se procedió al vaciado de la misma y a la realización de sondeos necesarios para estudiar el subsuelo mediante ensayos de penetración, obteniendo: el número de golpes N necesarios para penetrar en el suelo 30 cm dejando caer una masa de 75 kg desde una altura de 60 cm, así mismo se obtuvieron los Límites líquido y plástico definidos por Atterberg (contenido de agua en % de peso seco).

La estratigrafía obtenida fue la siguiente:

Capa de relleno entre las cotas 0.00 m y -0.90 m

Arcillas de plasticidad media color marrón, limos arcillosos inorgánicos y arcillas inorgánicas de alta plasticidad entre las cotas -0.90 m y -3.50 m.

Limos arenosos inorgánicos entre las cotas -3.50 m y -3.90m

Arcillas de alta plasticidad entre las cotas -3.90 m y -4.50m

Arcillas de alta plasticidad muy consolidadas entre las cotas -4.50 m y -6.00 m

A partir de la cota -6.00 m se tuvo rechazo por encontrar roca

El nivel freático se encontró en la cota -2.60 m

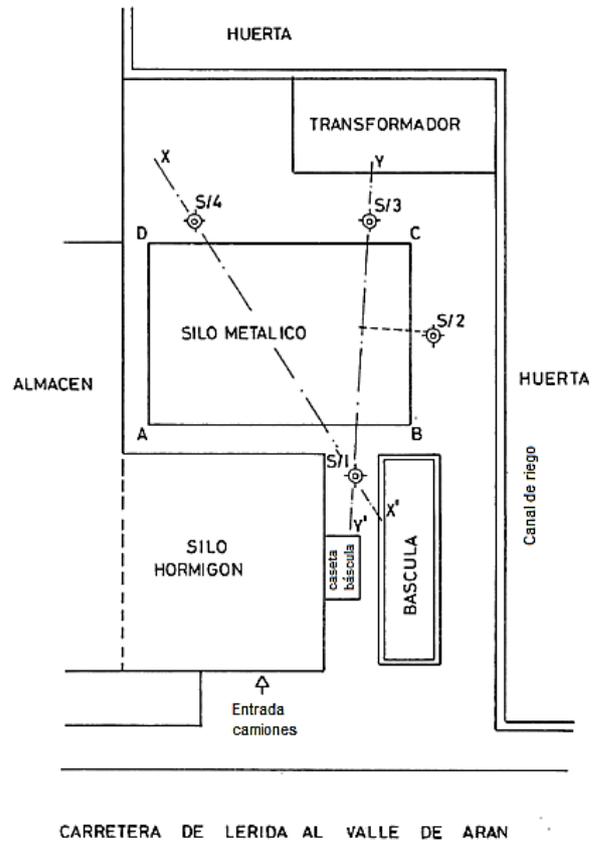


Fig. 6.14 Detalle en planta de la posición de los sondeos realizados. Tomado de Ref.5 "SILOS"

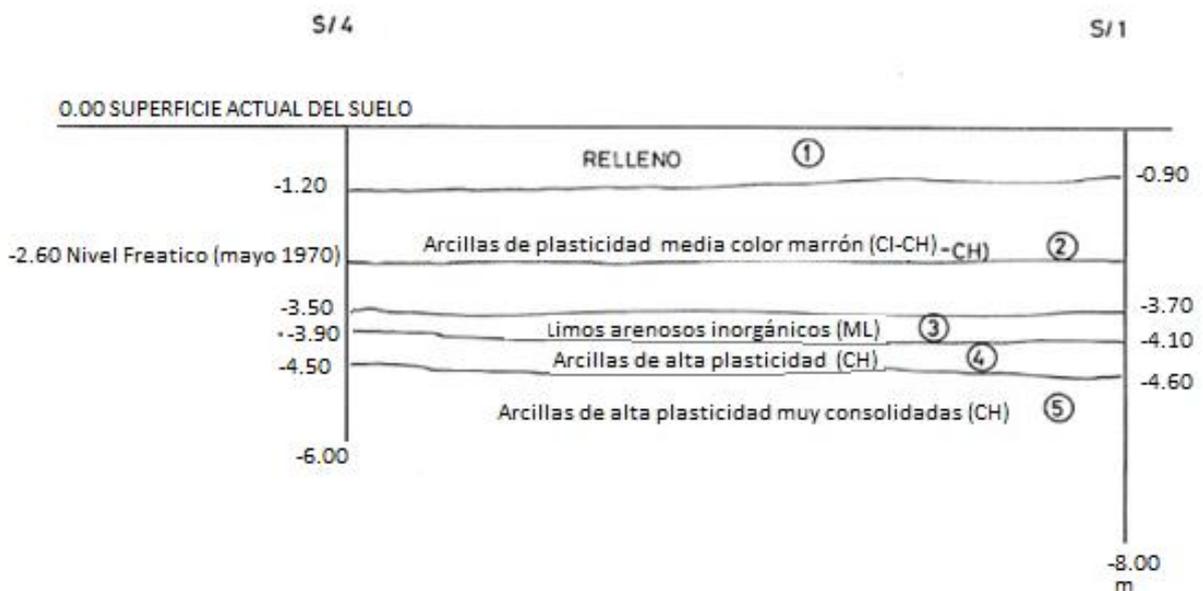


Fig. 6.15 Perfil Estratigráfico X-X'. Tomado de Ref.5 "SILOS"

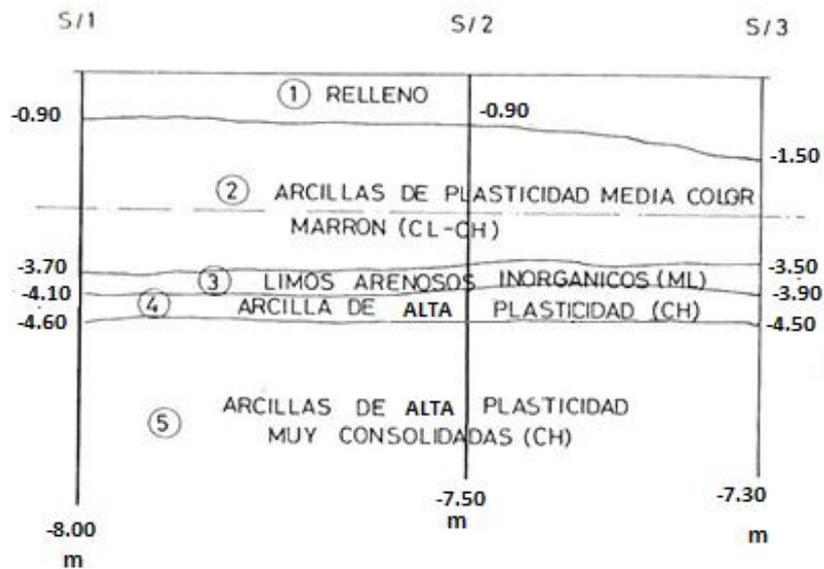


Fig. 6.16 Perfil Estratigráfico Y-Y'. Tomado de Ref.5 "SILOS"

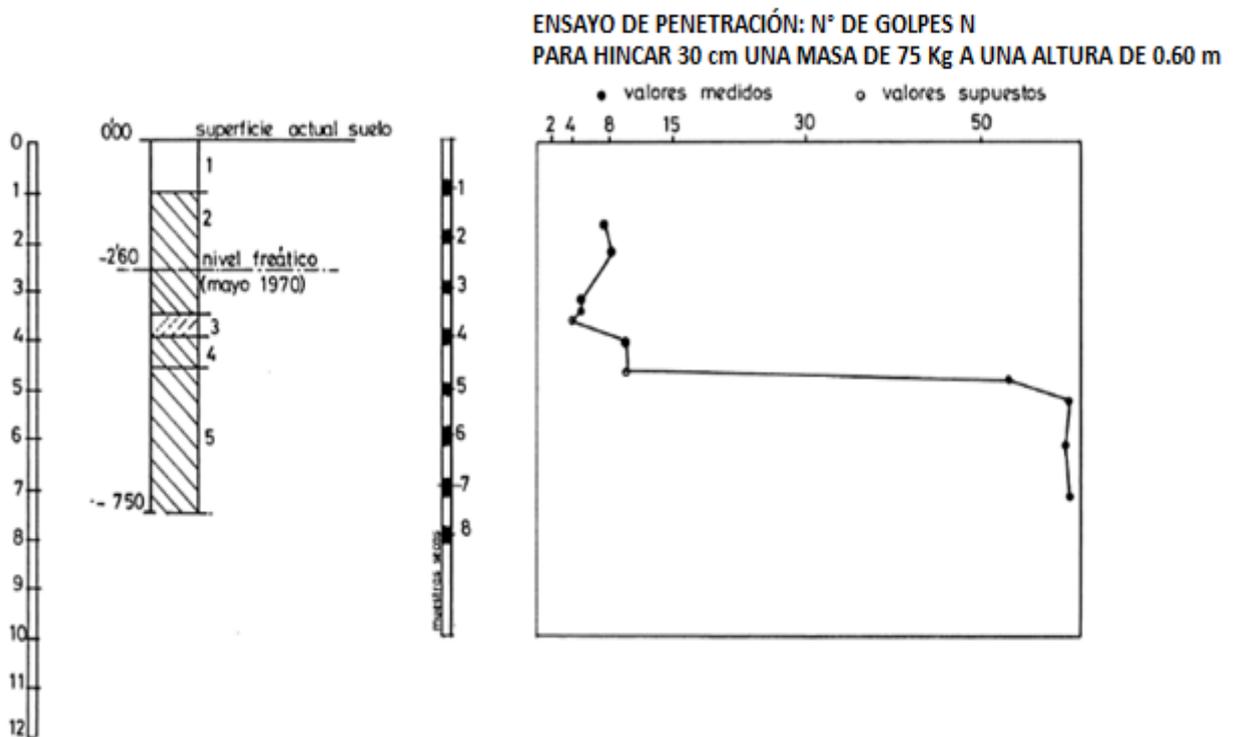


Fig. 6.17 Resultado de los ensayos de penetración. Tomado de Ref.5 "SILOS"

Del examen de muestras inalteradas de arcilla se comprobó que el contenido de agua crece con la profundidad desde el 22% hasta el 27%.

La resistencia a la compresión simple disminuye desde $q_u=1.70 \text{ kg/cm}^2$ a la altura de la cimentación, hasta llegar a $q_u=0.60 \text{ kg/cm}^2$ en la cota -3.90 m.

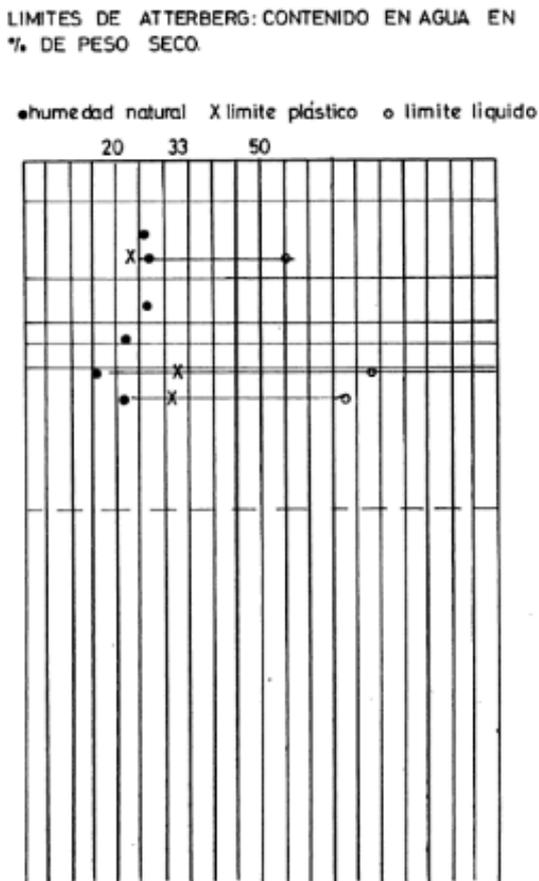


Fig. 6.18 Resultados de los ensayos de penetración

Por otra parte, la sensibilidad aumenta con la profundidad desde S=2 a S=4, lo que indica que se trata de una arcilla bastante alterable cuando se rompe su estructura.

Haciendo uso de la fórmula para determinar la capacidad de carga del profesor Terzaghi se tiene:

$$q_n = C N_c = \frac{1}{2} q_u N_c$$

El valor de N_c se obtiene de la siguiente expresión de acuerdo con el profesor A.W. SKEMTON:

$$N_c = 5 \left(1 + \frac{B}{5L} \right) \left(1 + \frac{D}{5B} \right)$$

Dónde:

q_n = Capacidad límite teórica de soporte en kg/cm^2

q_u = Resistencia a la compresión sobre muestras sin soporte lateral en kg/cm^2

B = Ancho de la cimentación en metros

L = Largo de la cimentación en metros

D = Profundidad de la cimentación en metros

Sustituyendo valores, se tiene:

$$N_c = 5 \left(1 + \frac{10.50}{5} \cdot \frac{14.91}{10.50} \right) \left(1 + \frac{1.30}{5} \cdot \frac{10.50}{10.50} \right) = 5.85$$

$$q_u = 0.60 \text{ kg/cm}^2$$

$$q_n = \left(\frac{1}{2} \right) (0.60) (5.85) = 1.75 \text{ kg/cm}^2$$

La carga máxima de operación admisible teniendo en cuenta la sensibilidad $S=4$ y un factor de seguridad $F_s=3$ es:

$$q_a = q_u / F_s = 1.75 / 3 = 0.58 \text{ kg/cm}^2$$

El valor de diseño utilizado para la carga del terreno fue de 1.52 kg/cm^2 y el valor de 0.967 kg/cm^2 para cuando el silo estuviera lleno, por lo que el factor de seguridad utilizado fue:

$$F_s = q_u / q_a = 1.52 / 0.967 = 1.57$$

Lo cual demuestra que se consideró un factor de seguridad por debajo del rango de valores recomendables: $2 \leq F_s \leq 4$

Se obtuvieron los asentamientos máximos teóricos en función de los datos arrojados por las muestras de suelo según los sondeos realizados, llegando a los siguientes resultados: El asentamiento de la cimentación se supone causado por la compresión de la serie de estratos encontrados, determinándose los siguientes módulos isométricos o de compresibilidad.

$$m_v(2) = 0.0120 \text{ cm}^2/\text{kg}$$

$$m_v(2') = 0.0180 \text{ cm}^2/\text{kg}$$

El módulo m_v representa el asentamiento total de una capa de suelo de espesor unitario, bajo una presión media unitaria. El uso de este módulo fue propuesto por el profesor Gregory P. Tshebotarioff en 1936 para el estudio de asentamientos en edificios; permite la comparación directa de los valores de la compresibilidad obtenidos por ensayos de laboratorio con los valores medios deducidos de los asentamientos observados. El uso de este coeficiente tiene, además, la ventaja de poder calcular en cualquier fase del ensayo de consolidación, sin tener que esperar a determinar el contenido de agua y la relación de vacíos al final del ensayo.

El cambio de espesor S_i originado por la compresión P_{vi} de la sobrecarga del silo se expresa por:

$$S = H_i * m_{vi} * P_{vi}$$

Dónde:

S_i =Asentamiento medio del terreno arcilloso compresible, en cm.

m_{vi} =Coeficiente medio de compresión volumétrica (o módulo edométrico), para una variación de presión que va desde p_o a $p_o+\Delta p$. Se da a partir del determinado en el laboratorio en muestras inalteradas. Se expresa en cm^2/kg .

P_{vi} =El cambio de presión $\Delta p=P_v$ a la profundidad media de dos series de estratos arcillosos compresibles, contando a partir de la cota de cimentación.

Calculando el asentamiento máximo en el centro de la losa, la distribución del esfuerzo normal vertical a una profundidad de 3.00m es de 0.99 kg/cm^2 , la cual es igual a la carga máxima presente en el terreno.

$$\text{Por lo tanto } S_{m\acute{a}x}=300*0.015*0.99=4.5 \text{ cm}$$

Vemos que el resultado del asentamiento máximo calculado es menor al máximo ocurrido. Revisando los hechos resulta que más de la mitad de la carga de los silos originó una deformación tangencial que indujo el desplazamiento lateral y hacia abajo en el borde de la losa. La velocidad constante del asentamiento también indica que el desplazamiento fue plástico. Este desplazamiento tangencial, tan importante como el asentamiento de las arcillas, pudo haber producido el volteo de la instalación de haberse continuado con el llenado del silo.

El 25 de mayo de 1970 se iniciaron los trabajos de reparación una vez conocida la estratigrafía, los cuales consistieron en apoyar la losa mediante pilares sobre la capa de arcilla de alta plasticidad muy consolidada, situada en la cota -6.00 m. Se inició con la excavación debajo de la losa y en la zona de cada pilar (entrando por la lateral) para después ser llenada la perforación con concreto hidráulico.

El estrato de apoyo situado en la cota -6.00 m era de gran resistencia, ya que ya que la sonda fue rechazada. Se consideró un coeficiente de trabajo admisible del terreno de 7.0 kg/cm^2 en el caso de que la losa no trabajara y fuera soportada por los pilotes. Con estas consideraciones, las dimensiones de las perforaciones a excavar variaban desde 2.5 m x

2.5 m hasta 1.7 m x 1.7 m. Por otra parte, las excavaciones se realizaron de una en una para evitar el descalce de la losa y agravar más el problema.

El riesgo fue constante durante los trabajos de excavación, ya que entre las cotas -4.50 m y -6.00 m el limo fluía constantemente y las arcillas superiores se desmoronaban y resultaba del todo imposible alcanzar la cota -6.0 m. La solución que se dio fue colocar tubos de fibrocemento de alta presión hincados en la capa de limos de espesor variable entre -1.5 m y 2.0 m para proseguir con la limpieza interior de los tubos y su posterior relleno con concreto hidráulico.

El último problema que se presentó fue en la excavación de cinco perforaciones centrales con acceso peligroso desde los laterales. Su excavación se realizó perforando la losa de cimentación.

En julio de 1970 finalizaron los trabajos de recalce de la cimentación y a finales del mes el silo se había llenado con 1,309 toneladas, las cuales representan el 67% de su capacidad. Durante este mes se apreciaron nuevos movimientos de desplome de 55 mm en dirección sur, el cual se debió a no poderse efectuar una buena limpieza en la cota -6.0 m dadas las dificultades de excavación. Para el mes de agosto el silo quedó completamente lleno y cesaron los desplazamientos.

Las deformaciones elastoplásticas de la losa de cimentación produjeron asentamientos diferenciales en la estructura metálica del silo que fueron absorbidos por éste sin ninguna deformación aparente. Sin embargo, estos asentamientos que fueron absorbidos por la estructura metálica aumentaron su coeficiente de trabajo reduciendo por lo tanto su coeficiente de seguridad.

Años más tarde, en 1975, se presentaron deformaciones en algunas paredes de los silos, lo cual confirma la repercusión que un problema grave de cimientos puede tener sobre toda la estructura.

6.4 Silo para granos en Szolnok, Hungría

A partir de este caso histórico vemos que también pueden ocurrir fallas cuando se busca tener un grado excesivo de seguridad. La cimentación de este silo se construyó a base de un pilotaje innecesario.

Algunos años antes se había construido otro silo en la proximidad sobre una losa de cimentación apoyada sobre un depósito de aluvión del río Tisza.

Debido a la presencia de un estrato grueso de arcilla verde, fue natural que la estructura tuviera asentamientos del orden de 35 cm a 50 cm luego de un largo periodo de consolidación. La rigidez de la losa de cimentación permitió que los asentamientos fueran uniformes, que no aparecieran fisuras, ni que se viera interrumpido el funcionamiento de la estructura.

En el caso del segundo silo, se hizo un intento para reducir considerablemente el asentamiento mediante pilotes debajo de la losa de cimentación. Se proyectaron pilotes elaborados en sitio e hincados a martinete de 40 cm de diámetro y 12 m de longitud separados a una distancia de 1.50 m entre centros. Los pilotes se colocaron en 10 filas paralelas y el hincado se realizó a partir de la cota -4.50 m y de 1.20 m a 1.50 m sobre el nivel de aguas freáticas.

Durante el hincado de pilotes se observó que mientras más pilotes se hincaban, los pilotes hincados previamente se desplazaban hacia arriba.

Los pilotes eran hincados a través de varias capas de arcillas marrones, verdes y grises y transmitían la carga a una capa de limo marrón tal y como se muestra en el perfil estratigráfico del terreno.

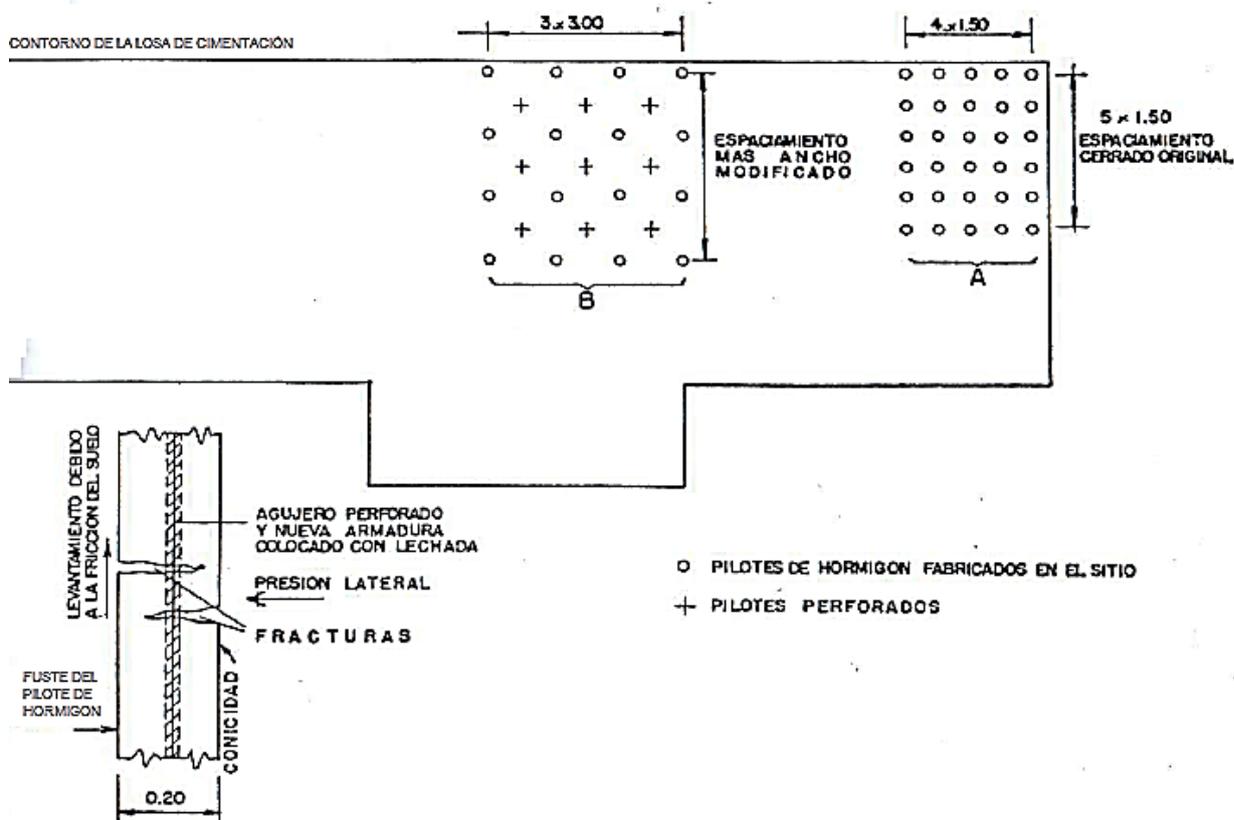


Fig. 6.19 Vista en planta de la distribución de pilotes los silos en Szolnok, Hungría. Tomado de Ref.10 “Patología de las cimentaciones”

La penetración en las capas intermedias de arcilla causó una considerable compresión de esos suelos altamente plásticos, cuyo contenido natural de agua estaba en su mayor parte por encima del límite plástico.

En la Referencia No.9 “Fallas en fundaciones”, el ing. C. Szechy menciona que las vibraciones debidas al hincado, combinadas con el agua de los poros que fue expulsada produjo la licuación de la arcilla.

La permeabilidad relativamente baja de la arcilla fue un factor importante en la licuación, debido a que las altas presiones aparecieron en la arcilla porque el pilote tendía a expulsar el agua de los poros, pero debido a la baja permeabilidad el agua no podía circular entre las partículas y por esa razón se acumulaba junto al pilote incrementando el contenido de agua hasta el grado de causar la licuación.

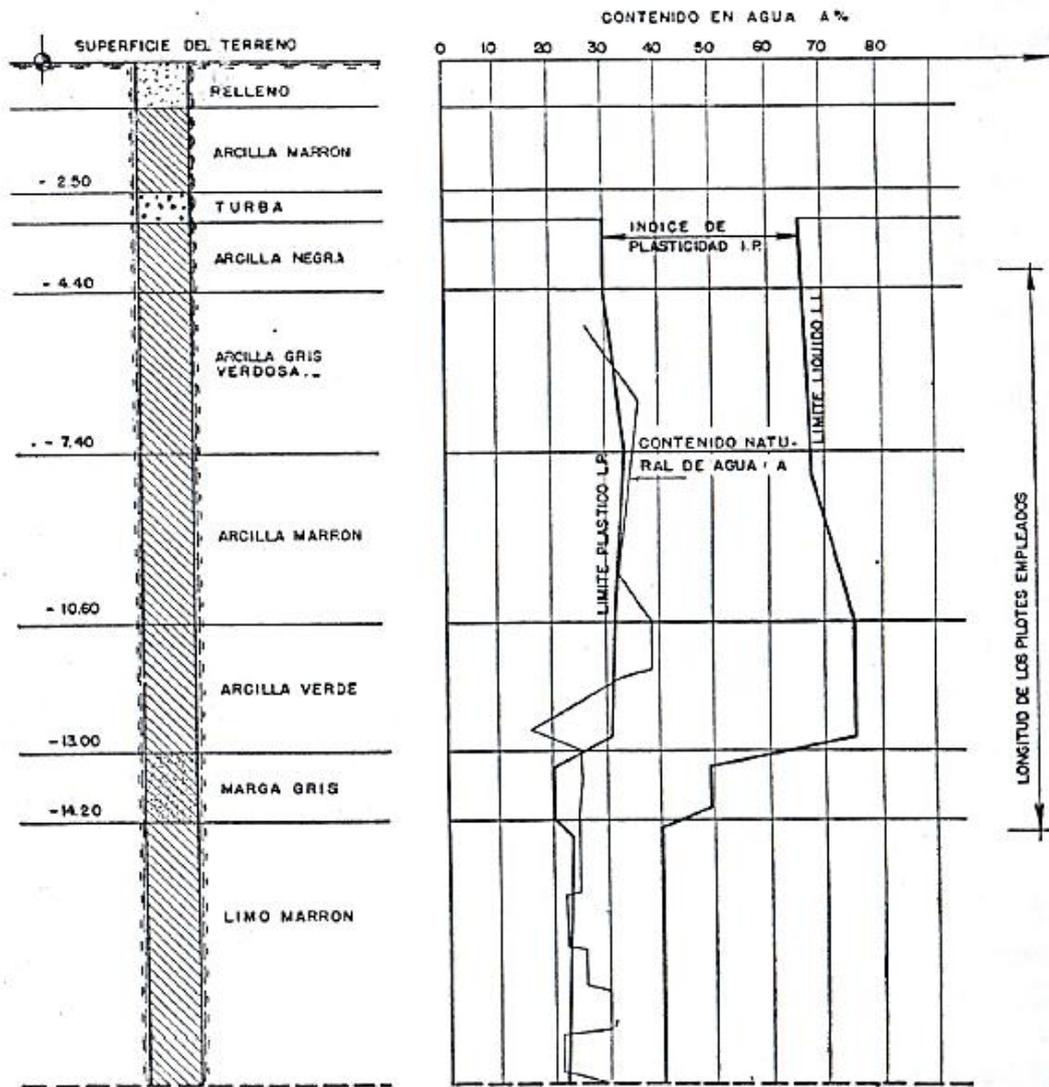


Fig. 6.20 Perfil estratigráfico del terreno en el que se desplantaron los silos de Szolnok, Hungría. Tomado de Ref.10 "Patología de las cimentaciones"

La presión lateral provocó un levantamiento de la superficie y este desplazamiento causó la fractura de los pilotes antes hincados. La separación de los pilotes hincados con martinete se incrementó a 3.0 m y fueron colocados entre ellos otros pilotes de 30 cm de diámetro. Por otra parte, se realizaron perforaciones en el centro de los pilotes fracturados para inyectarles lechada de cemento para sellar las grietas. Esta serie de modificaciones en la cimentación tuvo éxito y la obra prosiguió sin dificultad.

El asentamiento que se presentó en el segundo silo fue de entre 15 cm a 20 cm, pero a un costo adicional e innecesario, debido a que un mejor, pero uniforme asentamiento no ofrecía peligro para el primer silo.

6.5 Otros casos

A continuación se describen brevemente algunos otros ejemplos de fallas históricas en cimentaciones para silos y de las cuales la información disponible es menor por lo que no es posible dar demasiados detalles de su ocurrencia como en los casos descritos anteriormente y que pueden consultarse en las referencias antes mencionadas.

Silos Torre con forma de bala, en Red River Valley en Canadá

Esta fue una falla ocurrida en unos silos torre gemelos en River Valley en Canadá. cuando los silos se encontraban llenos, parte de la carga era transmitida a través de las paredes cilíndricas de las zapatas y el resto directamente a suelo por medio del suelo dentro de la base del anillo.

Los silos torre en forma de bala se utilizan para almacenar los cultivos forrajeros para la alimentación de ganado, cada silo estaba apoyado en una cimentación anular de concreto armado.

Los estratos del suelo se comprimen por el peso de la estructura de tal manera que las cargas aplicadas se distribuyen uniformemente en el suelo sobre la zona delimitada por la base circular, esta presión uniforme se distribuye en forma de bombilla de presión, su tamaño y forma, determinada por la teoría elástica están relacionados directamente con el diámetro de la zona de carga como a continuación se muestra.

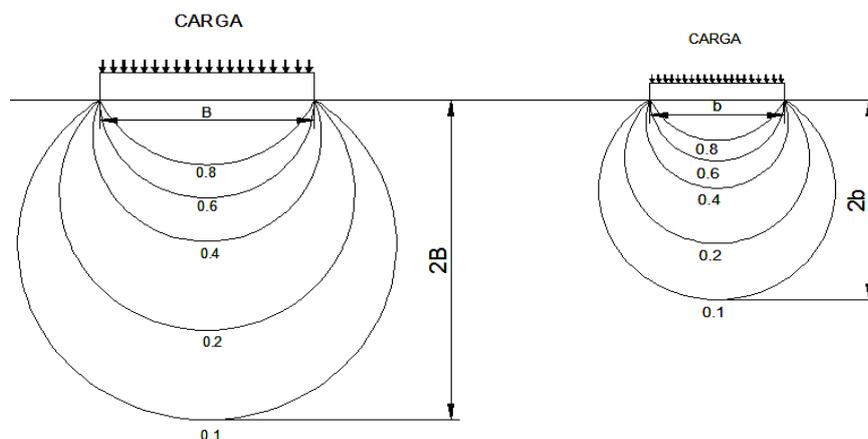


Fig. 6.21 Bulbo de presión bajo el anillo de cimentación. Tomado de Ref. 19 “TOWER SILO FOUNDATIONS”

Si los esfuerzos aplicados en el bulbo no exceden la resistencia cortante del suelo la estructura será estable.

En este caso, la colocación no uniforme del material a lamacenaar causo que el bulbo de presión que se generó en el suelo se distorcionara como se muestra en la siguiente imagen. Este mismo efecto puede ser causado por vientos muy fuertes actuando en un silo alto.

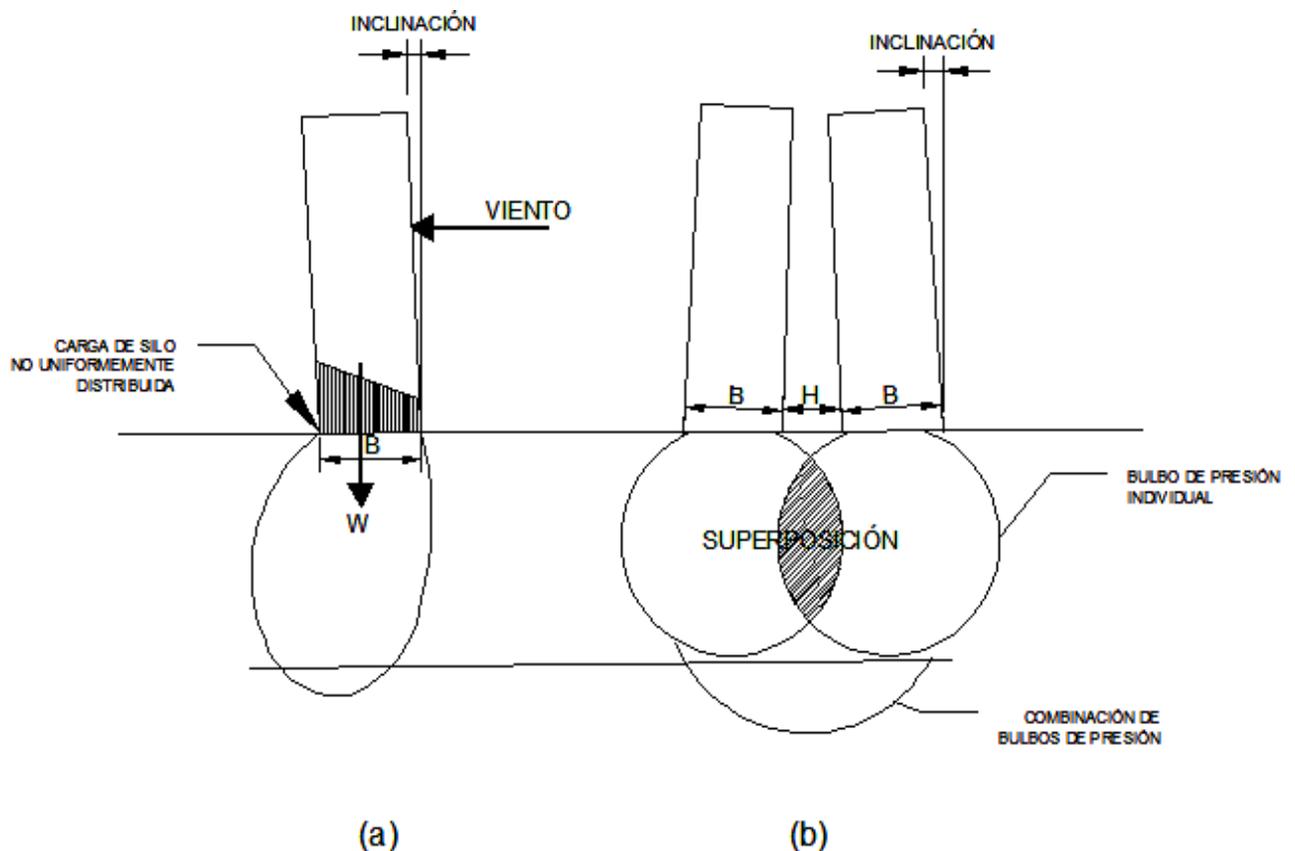


Fig. 6.22 Bulbo de presión no uniforme (izquierda) y superposición de bulbos de presión. Tomado de Ref. 19 “TOWER SILO FOUNDATIONS”

Los bulbos de presión se superpusieron y debido a que las presiones son aditivas, el bulbo resultante resultó mayor y a una profundidad superior a la considerada en el diseño. El suelo en esta zona se sometió a altas tensiones produciéndose asentamientos que a su vez provocaron la inclinación de los silos.



Fig. 6.23 Silos gemelos con presencia de asentamientos en la zona de superposición de presiones. Tomado de Ref. 19 “TOWER SILO FOUNDATIONS”

En la Ref. 19 se anota que: la mayoría de las fallas en cimentaciones en suelos arcillosos ocurre cuando las cargas aplicadas a la estructura son realizadas rápidamente por primera vez, así las cargas aplicadas a la estructura se transmiten al suelo aumentando la presión de poro. Las presiones generadas en el agua tienden a reducir la fricción entre las partículas sólidas del suelo y por lo tanto a disminuir su resistencia al corte. Si al final de la carga la resistencia al corte disponible es mayor que los esfuerzos aplicados, la estructura será estable; con el tiempo las presiones de exceso de agua se disiparán y los suelos se consolidarán adquiriendo resistencia y por lo tanto la estructura será más estable para cargas posteriores.

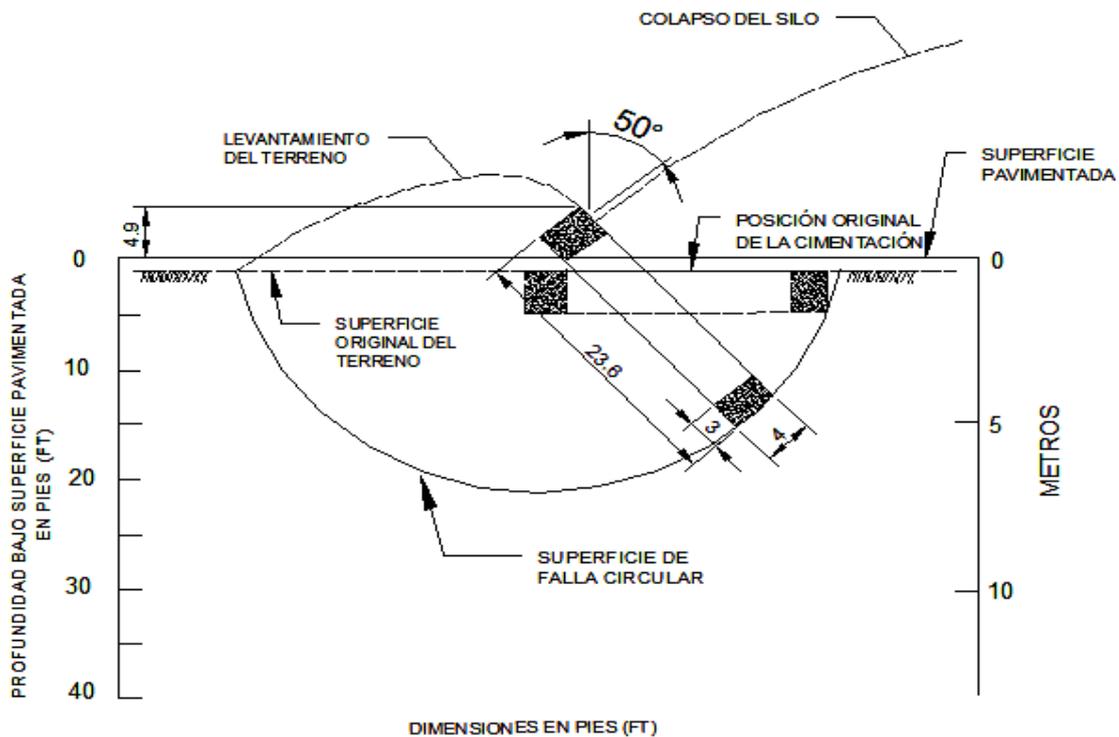


Fig. 6.24 Configuración de la falla en la cimentación del silo. Tomado de Ref. 19 “TOWER SILO FOUNDATIONS”

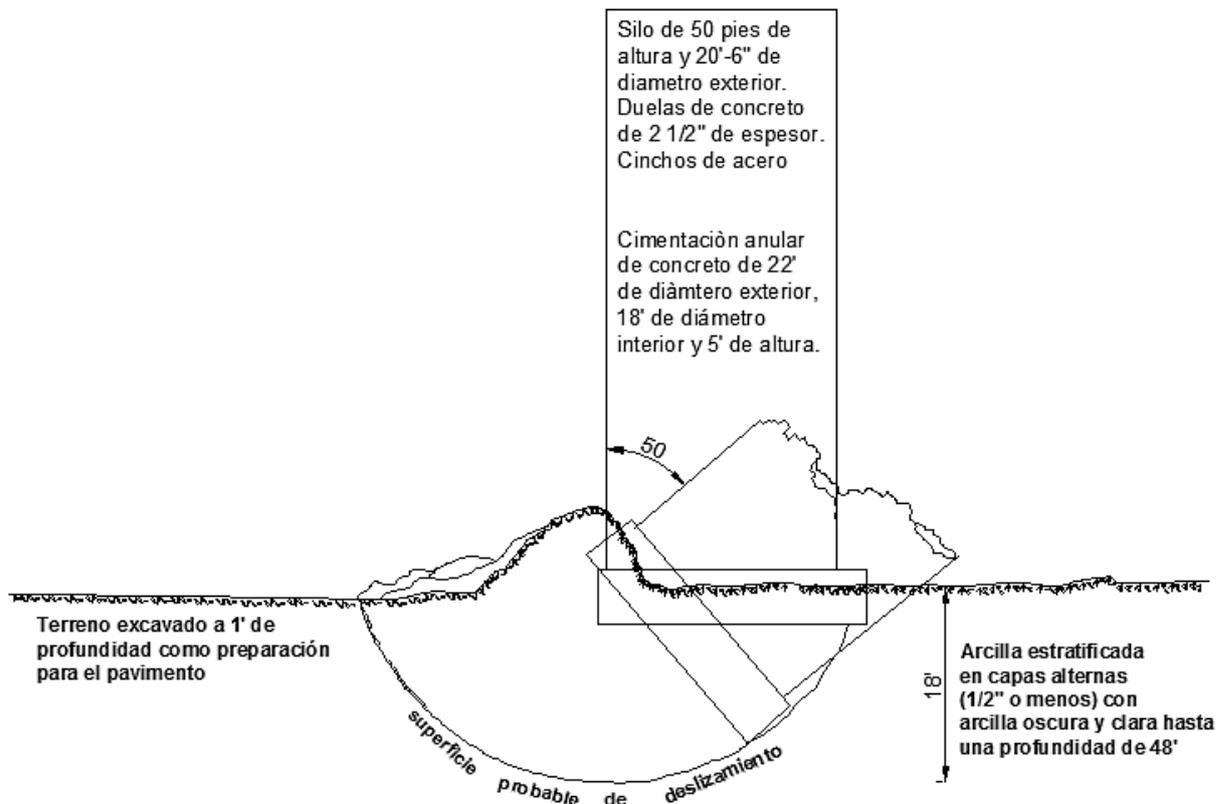


Fig. 6.25 Falla de silo. Tomado de Ref. 20“FALLAS TÉCNICAS EN LA CONSTRUCCIÓN”

Silo metálico para cereales en Ogilvie Fort William, Canadá

Se trata de la presencia de hundimientos en un silo, ocasionado por una falla en las pilas de cimentación.

En este caso, el suelo tenía una capacidad de carga muy baja, razón por la cual se eligió un silo con celdas metálicas, ya que el peso de este tipo de estructuras representa solo el 5% del peso del material a ensilar.

La cimentación consistía en una losa de concreto armado apoyada sobre pilotes de madera cubiertos con una capa de concreto armado. Unos meses después de que la estructura se pusiera en funcionamiento, comenzaron a verse grietas en la losa de cimentación. Al cumplirse dos años de su puesta en marcha la estructura comenzó a inclinarse hasta que finalmente cayó en el lecho del río Kaminonistiquia.

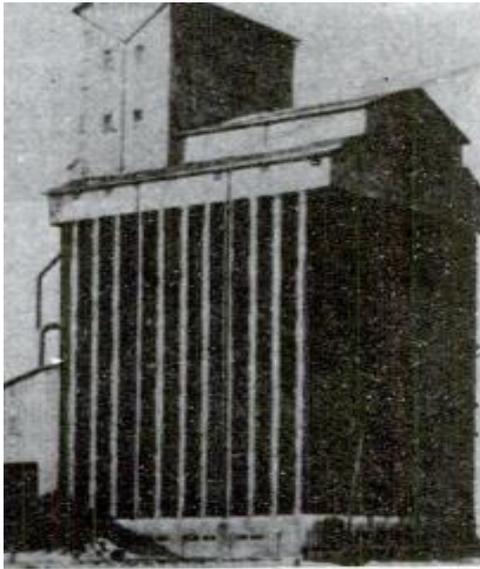


Fig. 6.26 Silo metálico una vez terminada su construcción y en plena fase de funcionamiento. Tomado de Ref.5 "Silos"

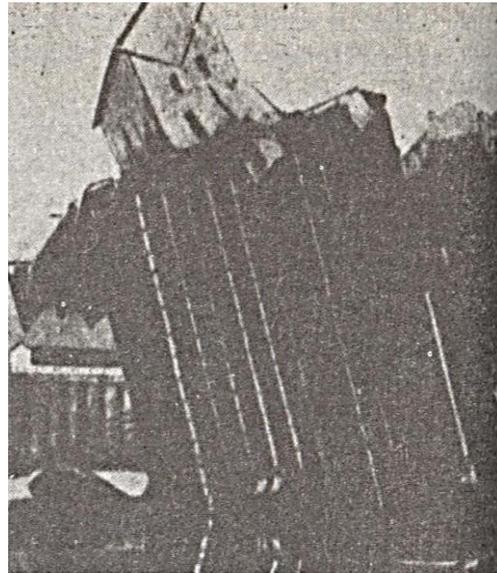


Fig. 6.27 Estado en que quedó la instalación al cabo de dos años una vez que fallaron los pilotes de cimentación. Tomado de Ref.5 "Silos"

Silo de concreto armado para almacenamiento de cereales en Fargo Dakota del Norte

Silo formado por 20 celdas circulares de 5.80 m de diámetro y 34.6m de altura, ocupando una superficie en planta de 15.90 m x 66 m.

Debido a la baja capacidad portante del suelo se proyectó una losa de cimentación de 75 cm de espesor apoyada en una base de pilotes.

El silo se puso en marcha en 1954 y conforme este se llenaba se observaron asentamientos, los cuales se fueron corrigiendo transvasando el grano de una celda a otra. En la media noche del 12 de junio de 1955 (antes de que se cumpliera un año de su puesta en servicio). El silo colapso destrozándose completamente.

El hundimiento se debió a que los pilotes en que se apoyaba el silo no fueron capaces de soportar los esfuerzos tangenciales (horizontales) producidos en las arcillas al ser sometidas a las cargas verticales a través de la losa.

A continuación se muestra el estado final de la estructura una vez ocurrida la falla de la cimentación.



Fig. 6.28 Estado en que quedó el silo de Fargo, Dakota del Norte al fallar la cimentación. Tomado de Ref. 5 “Silos”

Silo de concreto armado para almacenamiento de cereales en Puerto Artur, Ontario Canadá

La United Grain Growers (U.G.G) construyó en Puerto Artur, junto al lago Superior, un silo para granos en 1929.

Todos los silos en el lago superior están contruidos en la zona de muelle dentro del lago, ya que así permiten, por un lado, la conexión con los vagones, y por otro lado con barcos de carga.

El 23 de septiembre de 1959 y hacia el anochecer, cuando todo el personal había abandonado la instalación, el silo se hundió en el lago superior, con grano valorado en 100 millones de pesetas produciendo una ola de 4 m de altura.

En su informe del 13 de agosto el Dr. Peck, estableció que la causa del colapso fue el daño que presentaban los pilotes de cimentación después de una colisión de varios barcos. El silo fue reconstruido y ampliado ganando espacio dentro del lago.

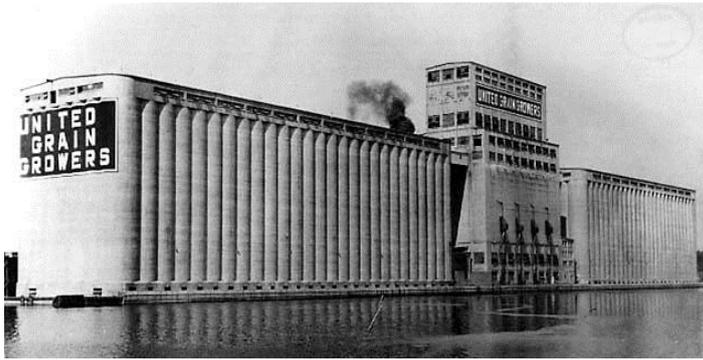


Fig. 6.29 Silo de la U.G.G en Ontario, Canadá. Tomado de Ref. 5 "Silos"

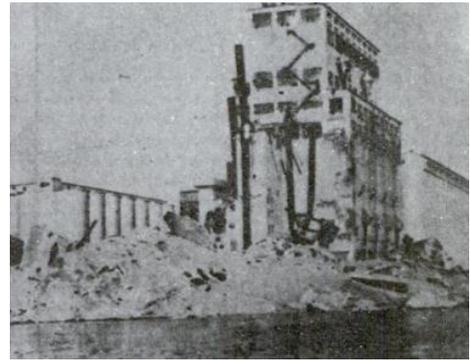


Fig. 6.30 Hundimiento del silo la U.G.G. Tomado de Ref. 5 "Silos"

Silo de concreto armado para almacenamiento de cereales en Burg, Alemania

El silo tenía una altura de 32.48 m, un ancho de 8.35 m y una capacidad de almacenamiento de 2,700 toneladas de cereales; fue construido en 1959 en el borde del canal navegable que comunica el mar del norte con el mar báltico.

Tomando en cuenta la esbeltez del silo, los efectos del viento y las excentricidades producidas por el llenado que pueden actuar en forma decisiva sobre la cimentación y dada la escasa capacidad de carga del suelo, se proyectó una cimentación a base de pilotes de 18.23 m de longitud con 40 cm de diámetro, calculados para soportar una carga de 130 toneladas cada uno.

A continuación se muestra la sección de la estructura, así como el perfil del terreno compuesto por:

- primera capa: musgo de pantano
- segunda capa: lodo
- tercera capa: arena fina

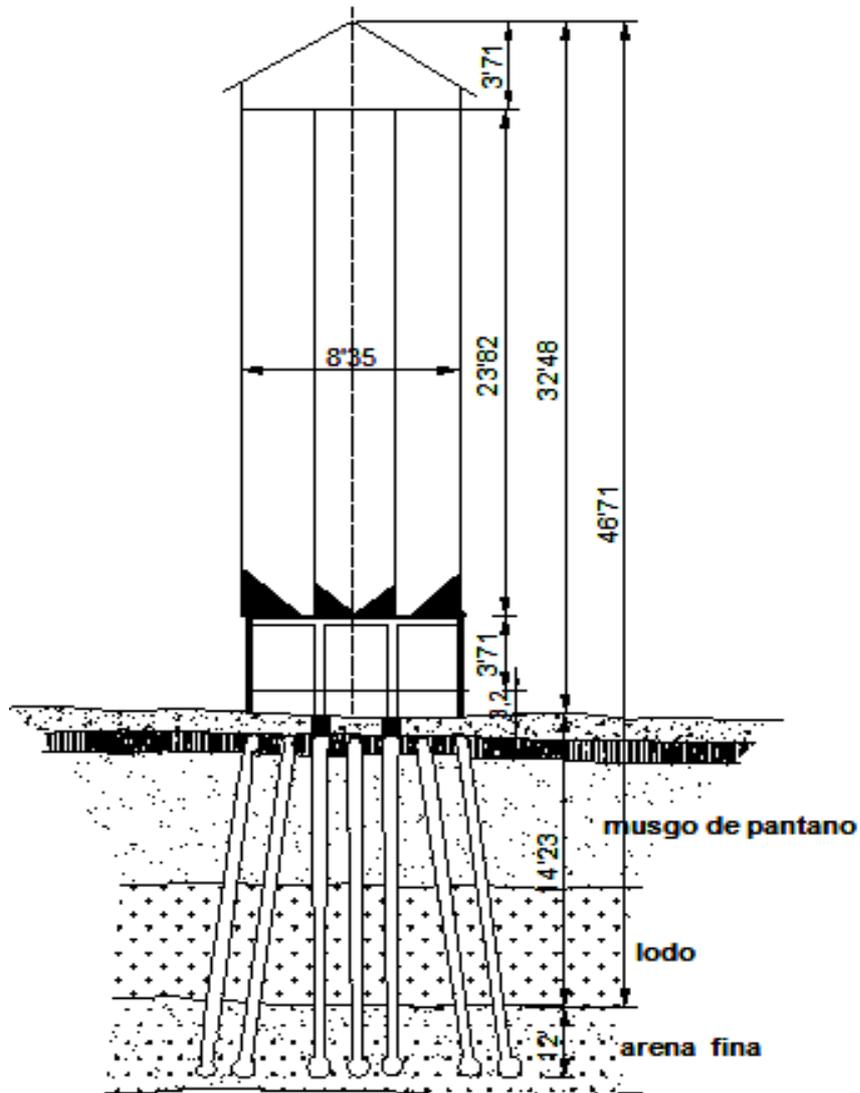


Fig. 6.31 Perfil de silo de Burg, Alemania. Tomado de Ref. 5 “Silos”

Los pilotes se apoyaban sobre la arena fina a 4 m de la capa de lodo, de tal manera que el agua broto frontalmente, causando la inclinación del silo hasta caerse y partirse en dos.

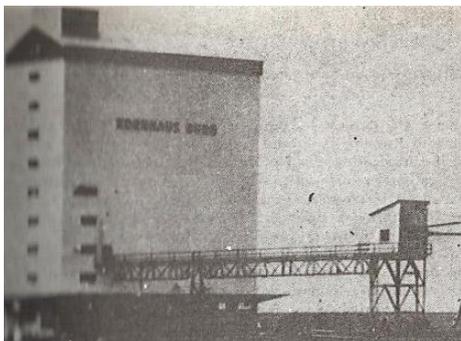


Fig. 6.32 Silo de Burg, Alemania en fase de funcionamiento. Tomado de Ref. 5 “Silos”

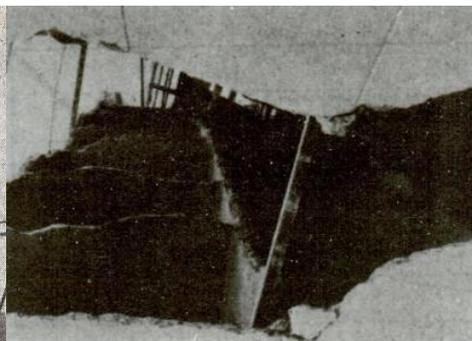


Fig. 6.33 Detalle de las celdas una vez producida la falla. Tomado de Ref. 5 “Silos”

Silo de concreto armado de una cooperativa agrícola al Norte de Francia

Este silo estaba compuesto por seis celdas hexagonales entrelazadas y con una altura total de 35 m, cada celda se apoyó en un conjunto de cuatro pilotes de 6.0 m a 6.5 m de longitud. Tal y como se muestra a continuación.

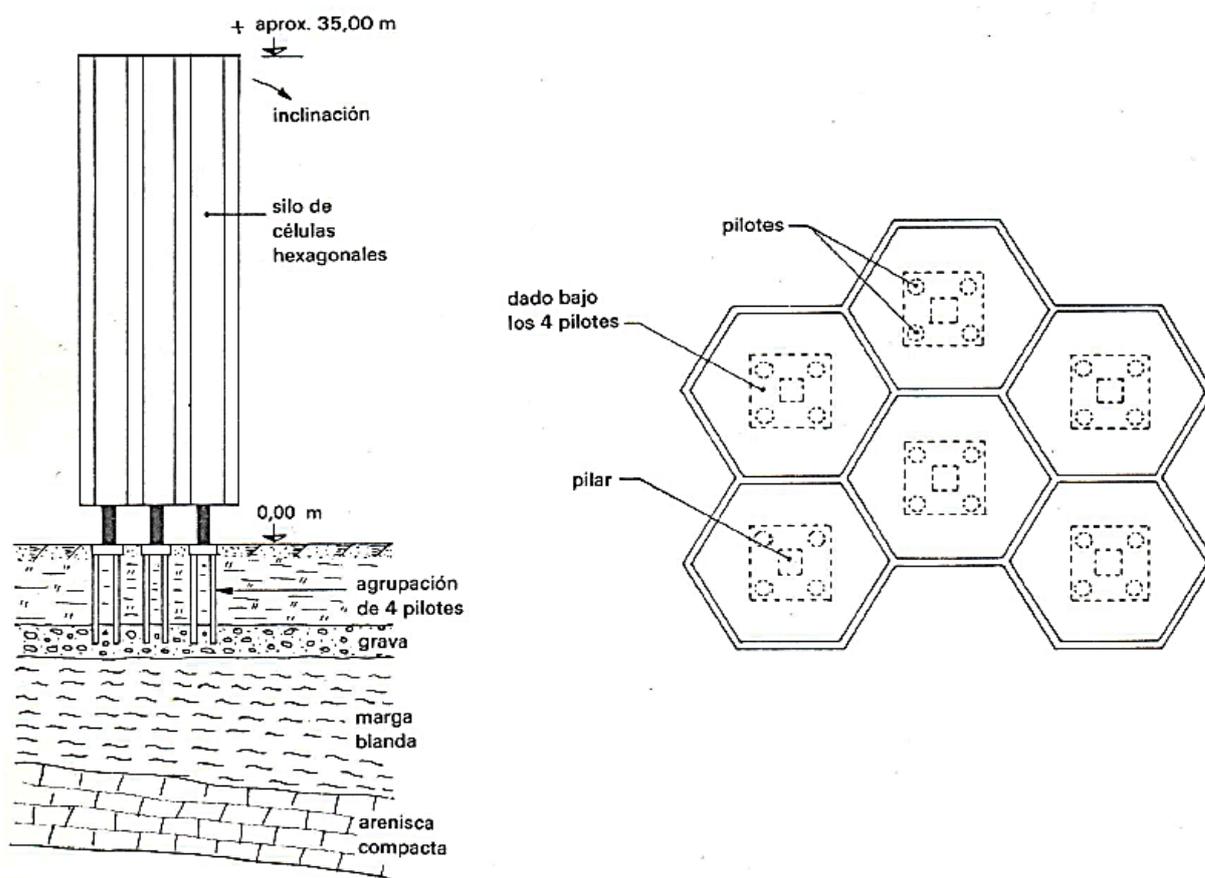


Fig. 6.34 Sección del silo (izquierda); vista en planta de la instalación y distribución de pilotes de cimentación (derecha). Tomado de Ref. 10 “Patología de las cimentaciones”

En su libro “Patología de las cimentaciones” Louis Logeais realiza las siguientes observaciones:

- Habría sido más prudente localizar cada pilote en un vértice, para ofrecer mejor resistencia al viento y facilitar la transmisión de esfuerzos.
- El estrato de grava en el que se apoyaba la cimentación era demasiado delgado y cubría un lecho de marga compresible de espesor variable, por lo que se habría experimentado un efecto menos perjudicial al colocar los pilotes a cada 2 m.

Pocos días después del primer llenado se observó que los silos se asentaban de tal modo que se produjo un desplome de 27 cm. Los silos se vaciaron a toda prisa; se realizaron sondeos que señalaron la delgadez del lecho de grava que soportaba los pilotes, superpuesto a otro de marga poco consistente y éste a su vez, sobre una base compacta de creta.

Se realizaron tareas de refuerzo onerosas y delicadas consistentes en la colocación de 24 nuevos pilotes que se apoyaron en la capa caliza y se recuperó la verticalidad del silo mediante el empleo de gatos hidráulicos.

La ocurrencia de esta falla se debió a la falta de conocimientos previos y al desconocimiento de la acción de los pilotes agrupados, ya que cuando los pilotes se colocan demasiado cerca uno del otro los esfuerzos transmitidos por los pilotes al suelo se traslapan reduciendo su capacidad.

Silo de concreto armado de una cooperativa agrícola al Norte de Francia

La falla ocurrió en un silo situado en un municipio del sudoeste del Macizo Central veintidós años después de su construcción, en este caso no fue posible realizar ninguna reparación alguna, fue necesario ordenar la demolición de la estructura.

El silo tenía una forma rectangular, ocupaba una superficie en planta de 8.50 m x 18.50 m, estaba compuesto por ocho celdas de concreto armado con 8000 quintales de capacidad de almacenamiento de cereal. Las paredes exteriores de las celdas estaban revestidas con ladrillo.

Para la construcción de la cimentación se realizaron 17 perforaciones para pilas elaboradas en obra, existía además un pequeño muro de concreto armado apoyado en los pilares exteriores que funcionaba como muro de contención del relleno.

Una tarde, con el silo al 50% de su capacidad los pilotes 1, 2 y 3 se hundieron, poco después todos los pilotes se fueron rompiendo provocando una inclinación importante. Análisis posteriores indicaron que los pilotes sufrieron pandeo, ya que estuvieron sujetos a grandes esfuerzos de flexión por el peso del relleno y la sobrecarga de los sacos de trigo depositados en el andén, además la sección transversal era insuficiente para resistirlos y se encontró presencia de corrosión en el acero.

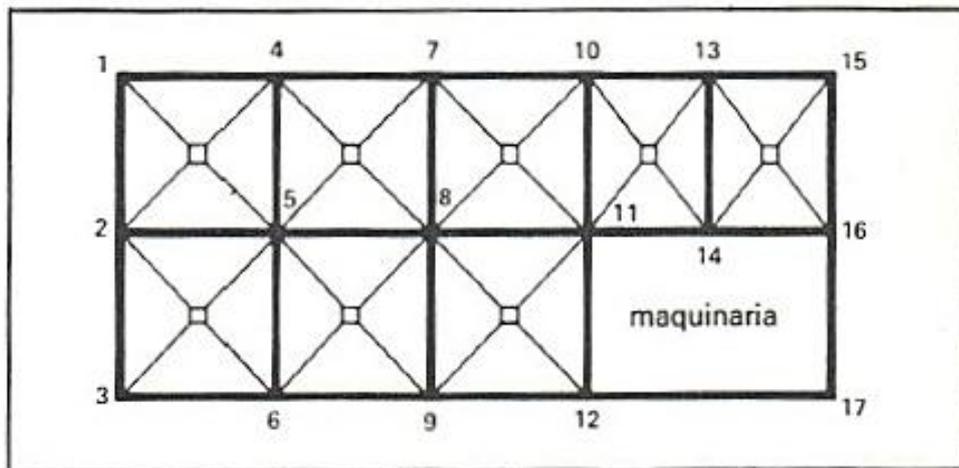


Fig. 6.35 Vista en planta de silo agrícola al norte de Francia. Tomado de Ref. 10 "Patología de las cimentaciones"

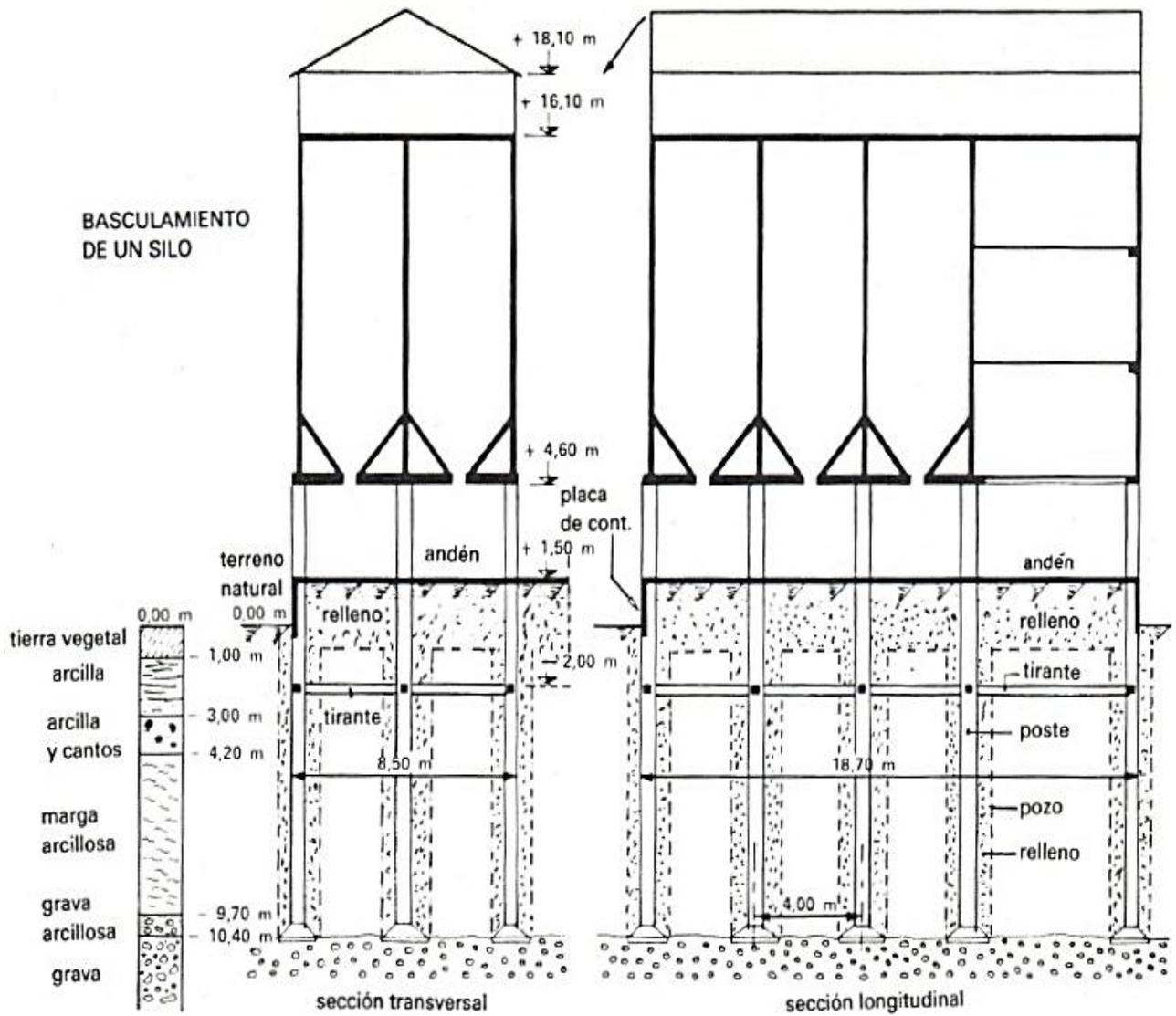


Fig. 6.36 Corte transversal de silo agrícola al norte de Francia. Tomado de Ref. 10 “Patología de las cimentaciones”

7. RECOMENDACIONES

7.1 Selección del Tipo de Cimentación

Son varios los aspectos que hay que considerar a la hora de elegir un tipo de cimentación para una estructura dada, tales como: su función, las cargas a las que será sometida, las condiciones del suelo en el que se apoya, los costos, entre otras.

Para realizar la elección del mejor tipo de cimentación para una superestructura el Dr. Ralph Brazelton Peck sugiere los siguientes pasos:

1. Obtener información respecto a la naturaleza de la superestructura y de las cargas que se van a transmitir a la cimentación.
2. Determinar las condiciones del subsuelo.
3. Considerar cada uno de los tipos acostumbrados de cimentación, descartando los tipos evidentemente inadecuados.
4. Realizar estudios más detallados y aún anteproyectos para las alternativas más prometedoras.
5. Preparar una estimación del costo de cada alternativa viable y elegir el tipo que represente la combinación más aceptable entre funcionamiento y costo.

Lo anterior con el propósito de obtener como resultado una estructura económica, funcional, segura y amigable con el medio ambiente.

La solución de la cimentación profunda solamente debe considerarse una vez analizadas las soluciones de cimentaciones superficiales que implican un procedimiento constructivo más simple y por lo tanto un menor tiempo de ejecución, además de que en general, éstas determinan un costo mayor.

Influyen en la selección del tipo de cimentación principalmente: las condiciones del suelo y del agua subterránea, así como la selección de las cargas en las que debe basarse el proyecto de una cimentación.

Con la información de los estudios realizados en el subsuelo y el esquema de cargas se puede abordar la elección del tipo de cimentación, buscando que se cumplan los siguientes puntos:

- Que las cargas de la estructura se transmitan a capas del terreno capaces de soportarlas sin rotura.
- Que las deformaciones de las capas subyacentes a los cimientos sean compatibles con las del propio cimiento y la superestructura, así como las estructuras próximas y puedan soportarse con seguridad.
- Que la ejecución del cimiento no cause daños a estructuras inmediatas existentes.

En la estabilidad de una cimentación influyen tanto los aspectos estructurales de la aplicación de las cargas como las propiedades mecánicas del suelo. A continuación se describen algunos de los aspectos más importantes a considerar en la elección del tipo de cimentación de un silo, ya que la omisión de estas consideraciones ha llevado a la falla a otros silos en el pasado.

Profundidad de las cimentaciones

La cimentación debe colocarse a una profundidad h tal que entre otros aspectos no experimente las variaciones estacionales de la capa superior del terreno.

Capacidad de Carga

La capacidad de carga, es la propiedad del suelo para soportar la carga sin que se produzcan fallas dentro de su masa y es diferente de acuerdo a los distintos comportamientos mecánicos de los suelos que se pueden encontrar. La capacidad de un suelo para soportar una carga varía no solamente con la resistencia del suelo sino también con la magnitud y distribución de la carga. Por ejemplo: En la arena compacta y en la arcilla no sensible, la falla se produce, generalmente, en forma brusca y definida, en cambio en la arena suelta y en la arcilla sensible la falla se produce en una transición más gradual asociada a una falla progresiva, tal y como se ejemplifica en las curvas carga-asentamiento de la fig. 7.1.

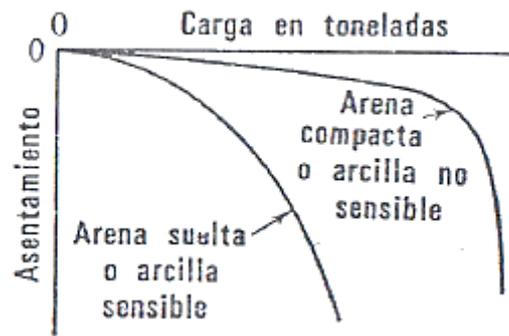


Fig. 7.1 Curvas de carga asentamiento. Tomado de Ref. 23 “Mecánica de Suelos y Cimentaciones”

Para analizar la capacidad de carga de un suelo se han desarrollado varias teorías matemáticas. En general, se reduce el problema al estudio de tres casos: La capacidad de carga en suelos de comportamiento puramente cohesivo ($c \neq 0$; $\phi = 0$); la de suelos de comportamiento puramente friccionante ($c = 0$; $\phi \neq 0$) y la de suelos de comportamiento cohesivo-friccionante.

A continuación se muestra una tabla resumen donde se relacionan las más importantes teorías de capacidad de carga, así como los tipos del suelo y cimentación para los cuales son aplicables.

Dónde:

Df – profundidad de desplante de la cimentación

γ – peso volumétrico del suelo

c – cohesión del suelo

B – base o ancho de la cimentación

Φ – ángulo de fricción interna

Nc, Nq y Ny – coeficientes adimensionales que dependen del valor de Φ

σ_{od} y ρ_{od} – $\gamma * Df$

TEORIAS PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE CARGA DE UN SUELO	APLICACIÓN
<p>Terzaghi</p> $q_u = C \cdot N_c + \sigma_{od} \cdot N_q + 0.5 \cdot B \cdot \gamma \cdot N_\gamma$ <p><i>Suelos cohesivos y friccionantes</i></p>	<p>$C \neq 0$</p> <p>$\phi \neq 0$</p> <p>Cimientos Superficiales</p>
<p>Zeevaert</p> $q_u = (\alpha_1 \cdot C \cdot N_c + \alpha'_1 \cdot \sigma_{od} \cdot N_q + 0.5 \cdot \alpha_2 \cdot B \cdot \gamma \cdot N_\gamma) \cdot (D_r \cdot 0.1)$ <p><i>Suelos cohesivos y friccionantes</i></p>	<p>$C \neq 0$</p> <p>$\phi \neq 0$</p> <p>Cimientos Superficiales</p>
<p>Skempton</p> $q_u = C \cdot N_c + P_{od}$ <p><i>Suelos cohesivos</i></p>	<p>$\phi < 10^\circ$</p> <p>Cimientos Superficiales y profundos</p>
<p>Meyerhof</p> $q_u = C \cdot N_c + P_{od} \cdot N_q$ <p><i>Suelos preferentemente friccionantes</i></p>	<p>$\phi \equiv 0$</p> <p>Cimientos profundos</p>

Fig. 7.2 Teorías de Capacidad de carga de los suelos. Tomado de Refs.21 y 22

Asentamientos admisibles

La mayoría de las estructuras en los silos son flexibles en cierto grado; se sabe por ejemplo que un área de la superficie del terreno, uniformemente cargada, tiende a asentarse más en su centro que en los bordes. Una estructura completamente flexible puede adaptarse a la superficie deformada del terreno mientras que una superestructura totalmente rígida tiende a funcionar como un puente e igualar los asentamientos de la superficie del terreno transmitiendo presiones mayores en los bordes.

Para estructuras como: pilas de puentes y silos de concreto armado, las cimentaciones deben considerarse estrictamente rígidas. Estas no son capaces de adaptarse a la curvatura del cráter de asentamiento en la superficie del terreno.

Efecto de la excentricidad.

Como ya se explicó en capítulos anteriores, la descarga de un silo puede ser excéntrica y por lo tanto toda la estructura debe diseñarse tomando en cuenta esta condición. Por ejemplo, si la carga no se aplica concéntricamente, el momento de volteo reduce la capacidad de carga. De acuerdo con Meyerhof, la cimentación cargada excéntricamente reacciona como si el ancho de la cimentación se hubiera reducido de B a B' :

$$B' = B - 2e$$

En la expresión e es la excentricidad. A continuación se muestra el comportamiento de una cimentación excéntricamente cargada en suelos estratificados.

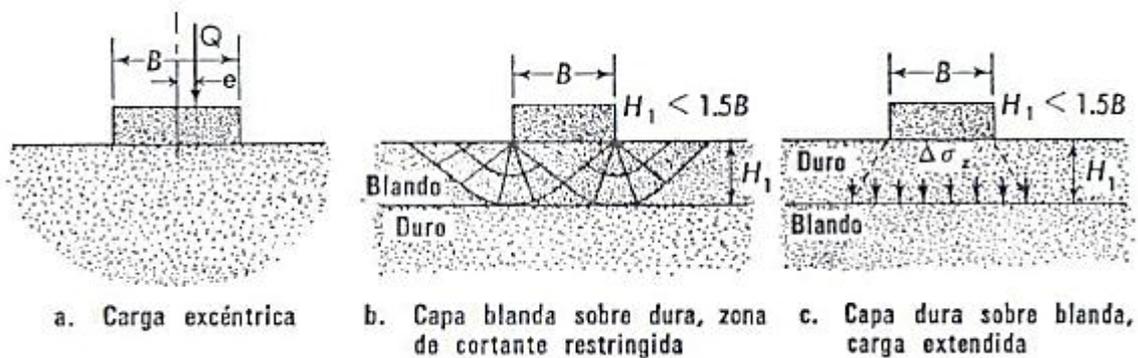


Fig. 7.3 Capacidad de carga con aplicación de cargas excéntricas y en suelos estratificados.

Tomado de Ref.23 “Mecánica de Suelos y Cimentaciones”

Normatividad

Es importante conocer los códigos de edificación vigentes del lugar donde se construirá la estructura, ya que el proyecto de cimentación y su ejecución deben cumplir con las disposiciones legales y vigentes del lugar.

7.2 Verificación de la seguridad de las cimentaciones

La revisión de la seguridad de una cimentación ante estados límite de falla y servicio haciendo uso de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones del D.F. consiste en comparar para cada elemento de la cimentación, y para esta en su conjunto, la capacidad de carga del suelo con las acciones de diseño afectando la capacidad de carga neta con un factor de resistencia y las acciones de diseño con sus respectivos factores de carga.

La verificación del cumplimiento de los estados límites de falla se realiza considerando las combinaciones de carga actuantes en la estructura del silo, ya que tanto la superestructura como sus elementos estructurales se diseñan para tener resistencias de diseño en todas las secciones, por lo menos iguales a las resistencias requeridas calculadas.

En cuanto a la revisión de estados límite de servicio, ésta se basa en lo correspondiente al cuidado de los movimientos verticales, como asentamientos o emersión de las cimentaciones, a inclinaciones en las construcciones y deformaciones diferenciales en la propia estructura y sus vecinas.

Cabe mencionar que en nuestro país no existe una normatividad específica para estructuras como los silos. Sin embargo existen algunos parámetros que podemos utilizar para la revisión de su seguridad estructural, tal como son las Normas Técnicas complementarias del D.F. y el manual de Obras civiles de Comisión Federal de Electricidad.

Hay otros países que han ahondado más en el tema y tienen algunas normas que han sido también puestas a pruebas en la construcción de silos, teniendo como ejemplo son las Normas Alemanas DIN 1055 1964. Por otra parte, en la referencia No. 8 el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto da algunas recomendaciones para la construcción de silos de concreto.

Derivado de lo anterior, se recomienda realizar la revisión de las cimentaciones ante estados límite de servicio de acuerdo a los parámetros mostrados en la Fig. 7.4 de las NTC para Diseño y Construcción de Cimentaciones del D.F. o los mostrados en la Fig. 7.5 obtenidos del Manual de Obras Civiles de Comisión Federal de Electricidad.

Tabla 3.1 Límites máximos para movimientos y deformaciones originados en la cimentación¹		
a) Movimientos verticales (hundimiento o emersión)		
Concepto		Límite
En la zona I:		
Valor medio en el área ocupada por la construcción:		
Asentamiento:	Construcciones aisladas	5 cm ⁽²⁾
	Construcciones colindantes	2.5 cm
En las zonas II y III:		
Valor medio en el área ocupada por la construcción:		
Asentamiento:	Construcciones aisladas	30 cm ⁽²⁾
	Construcciones colindantes	15 cm
Emersión:	Construcciones aisladas	30 cm ⁽²⁾
	Construcciones colindantes	15 cm
Velocidad del componente diferido		1 cm/semana
b) Inclínación media de la construcción		
Tipo de daño	Límite	Observaciones
Inclínación visible	$100 / (100 + 3h_c)$ por ciento	h_c = altura de la construcción en m
Mal funcionamiento de grúas viajeras	0.3 por ciento	En dirección longitudinal
c) Deformaciones diferenciales en la propia estructura y sus vecinas		
Tipo de estructuras	Variable que se limita	Límite
Marcos de acero	Relación entre el asentamiento diferencial entre apoyos y el claro	0.006
Marcos de concreto	Relación entre el asentamiento diferencial entre apoyos y el claro	0.004
Muros de carga de tabique de barro o bloque de concreto	Relación entre el asentamiento diferencial entre extremos y el claro	0.002
Muros con acabados muy sensibles, como yeso, piedra ornamental, etc.	Relación entre el asentamiento diferencial entre extremos y el claro	0.001
		Se tolerarán valores mayores en la medida en que la deformación ocurra antes de colocar los acabados o éstos se encuentren desligados de los muros.
Paneles móviles o muros con acabados poco sensibles, como mampostería con juntas secas	Relación entre el asentamiento diferencial entre extremos y el claro	0.004
Tuberías de concreto con juntas	Cambios de pendiente en las juntas	0.015
¹ Comprende la suma de movimientos debidos a todas las combinaciones de carga que se especifican en el Reglamento y las Normas Técnicas Complementarias. Los valores de la tabla son sólo límites máximos y en cada caso habrá que revisar que no se cause ninguno de los daños mencionados al principio de este Capítulo.		

Fig. 7.4 Tomado de las Normas Técnicas Complementarias del D. F. para Diseño y Construcción de Cimentaciones

Límites máximos para movimientos y deformaciones originados en la cimentación		
<u>Inclinación media</u>		
<u>Tipo de daño</u>	<u>Límite</u>	<u>Observaciones</u>
Inclinación visible.	$100/(100+3h)p$ por ciento	h = altura de la construcción, en m
Mal funcionamiento de grúas viajeras.	0.3 por ciento	En dirección longitudinal
<u>Deformaciones diferenciales en la propia estructura y sus vecinas</u>		
<u>Tipo de estructura o elemento</u>	<u>Variable que se limita</u>	<u>Límite</u>
Tanques de almacenamiento de acero, sobre bases flexibles. Tapa fija.	Pendiente del perfil de asentamiento.	0.008
Tapa flotante.		0.002 a 0.003
Losas de cimentación circulares y zapatas anulares rígidas, esbeltas y altas como torres, silos y tanques.	Pendiente transversal media.	0.002
Marcos de acero.	Relación entre el asentamiento diferencial y el claro.	0.006
Marcos de concreto.	Relación entre el asentamiento diferencial y el claro.	0.004
Muros de carga de ladrillo recocido o bloque de cemento.	Relación entre el asentamiento diferencial y el claro.	0.002
Muros con acabados muy sensibles, como yeso, piedra ornamental, etc.	Relación entre el asentamiento diferencial y el claro.	0.001 Se toleran valores mayores en la medida en que la deformación ocurra antes de colocar los acabados o estos se encuentran desligados de los muros.
Paneles móviles o muros con acabados poco sensibles, como mampostería con juntas secas.	Relación entre el asentamiento diferencial y el claro.	0.004
Tuberías de concreto con juntas	Cambio de pendiente en las juntas	0.015

Fig. 7.5 Tomado del Manual de Obras Civiles de Comisión Federal de Electricidad

CONCLUSIONES

Al inicio de un proyecto de silos se recomienda conocer el funcionamiento al que se destinará la estructura con la finalidad de determinar todas y cada una de las acciones que afectarán la estructura durante su vida útil.

La determinación de las acciones de diseño es fundamental para lograr elementos que cumplan con los estados límite de falla y los estados límite de servicio, además de cumplir con las deformaciones permitidas por los materiales y por consiguiente con los reglamentos locales.

Cabe mencionar que en nuestro país no existe una normatividad específica para estructuras como los silos. Sin embargo se tienen algunos parámetros que se pueden utilizar para la revisión de su seguridad estructural, tal como son las Normas Técnicas Complementarias del D.F. y el Manual de Obras Civiles de Comisión Federal de Electricidad, por lo que resalta la importante necesidad de elaborar normas adecuadas para este tipo de estructuras, ya que éstos son de importante presencia en: plantas cementeras, plantas de proceso industrial y puertos marítimos; donde se utilizan como auxiliares para el manejo de grandes cantidades de materiales que se procesan para crear productos nuevos y para la comercialización de materias primas que se importan o exportan.

Para la finalidad anterior pueden utilizarse como referencia las normas ya existentes en países como Alemania, Estados Unidos y Canadá, que han ahondado en el tema y cuentan con normas que han sido puestas a pruebas en la construcción de silos y sus cimentaciones y han creado un historial de casos de éxito y de falla.

Adicionalmente, después de la revisión de los casos históricos en fallas en cimentaciones descritas en el capítulo 6 “Fallas en cimentaciones de silos” se encontraron algunos aspectos relevantes que vale la pena mencionar como parte del aprendizaje obtenido:

- ❖ No existen fallas de una cimentación como unidad estructural.
- ❖ La mayoría de los casos, la falla se debió a la falta de estudios previos de mecánica de suelos.
- ❖ En los casos que fue posible una reparación, los costos fueron excesivos.
- ❖ En casos de cimentaciones desplantadas en suelos arcillosos, la falla ocurrió cuando las cargas fueron aplicadas rápidamente por primera vez.
- ❖ Uno de los errores cometidos fue no tomar en cuenta la generación de excentricidad en la distribución de cargas del silo.
- ❖ Otro de los errores comunes no solo en cimentaciones de silos, es creer que una cimentación a base de pilotes es necesariamente segura.

Finalmente, es importante en todo proyecto de la ingeniería civil, destacar no solo los éxitos obtenidos; sino los errores cometidos, con la finalidad de dejar testimonio de los aspectos importantes que podríamos llegar a omitir en cada una de las actividades de la ingeniería (Planeación, Proyecto, Diseño, Construcción, Operación, Supervisión, Mantenimiento) y el propósito de este trabajo escrito ha sido contar con un documento con la finalidad anotada.

BIBLIOGRAFÍA

1. Luis O. Ibañez Mora. SOLUCIÓN PARA CIMENTACIONES DE CHIMENEAS Y OBRAS DE GRAN ALTURA DE LA INDUSTRIA AZUCARERA. Revista Centro Azúcar 4/2001.
2. Adem Dogandun; Zeki Karaka; Ahmet Durmus; and Halil Sezen, M. ASCE. CAUSE OF DAMAGE AND FAILURES IN SILO STRUCTURES. Journal of Performance of Constructed Facilities March/April 2009.
3. A. Baracos, M.E.I.C. THE FOUNDATION FAILURE OF THE TRANSCONA GRAIN ELEVATOR. National Research Council Canada, October, 1957
4. Juan Ravenet. SILOS: TEORIA, INVESTIGACIÓN, CONSTRUCCIÓN. Editores Técnicos Asociados, 197
5. Juan Ravenet. SILOS: DEFORMACIONES, FALLAS, EXPLOSIONES, PREVENCIÓN DE ACCIDENTES. Editores Técnicos Asociados, 1978.
6. Marcel y Andre Reimbert. CONSTRUCCIÓN DE SILOS, TEORIA Y PRÁCTICA. Ed. Aguilar, 1962.
7. Roberto Meli Piralla. DISEÑO ESTRUCTURAL. Ed. Noriega Editores. Cuarta impresión, 1991.
8. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SILOS DE CONCRETO: (ac1 313-77) Y COMENTARIOS. Ed. Limusa, 1990.
9. C. Szechy. D. Sc. FALLAS EN FUNDACIONES. Editora Tecniciencia, 1964
10. Louis Logeais. CONSTRUCCIÓN: PATOLOGIA DE LAS CIMENTACIONES. Editorial Gustavo Gill, 1984.
11. Braja M. Das. PRINCIPIOS DE INGENIERIA DE CIMENTACIONES. Internacional Thomson Editores, 2001.
12. Ralph B. Peck. INGENIERIA DE CIMENTACIONES. Editorial Limusa, Segunda Edición, 1988.
13. Reglamento de Construcciones del Distrito Federal RCDF-94 y sus Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones.

BIBLIOGRAFÍA

14. Manual de Diseño de Obras Civiles C.F.E México B.2.4. CIMENTACIONES EN SUELOS.
15. Gordon A. Fletcher. ESTUDIOS DE SUELOS Y CIMENTACIONES EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN. Editorial Limusa, 1982.
16. David Bernard Williams. MANTENIMIENTO Y FUNCIONAMIENTO DE SILOS. Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO 113, 1996.
17. Tschebotarioff Gregory Porphyriewitch. MECÁNICA DEL SUELO, CIMIENTOS Y ESTRUCTURAS DE TIERRA. Editorial Aguilar, Madrid 1958
18. Budhu Muni. SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS. John Wiley & Sons, Inc. New York 2000.
19. Bozozuk, M. (1976). CBD-177 TOWER SILO FOUNDATIONS. Canadian Building Digest, National Research Council, Canada, (http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/cbd/cbd177_e.html)
20. Jacob Feld. FALLAS TÉCNICAS EN LA CONSTRUCCIÓN. Editorial Limusa, México 1978.
21. Eulalio Juárez Badillo, Alfonso Rico Rodríguez. MECANICA DE SUELOS, V2. TEORIA Y APLICACIONES DE LA MECANICA DE SUELOS. Editorial Limusa, 2003.
22. Leonardo Zeevaert. INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES Y PROEFUNDAS, SUJETAS A CARGAS ESTÁTICAS Y SÍSMICAS. Editorial Limusa, 1980.
23. George B. Sowers. MECÁNICA DE SUELOS Y CIMENTACIONES. Centro Regional de Ayuda Técnica. México/Buenos Aires, 1972.
24. http://umanitoba.ca/libraries/archives/exhibits/agric_exper/agri-food/infoagfdcollage.html

GLOSARIO

Asentamiento: Desplazamiento vertical de una estructura en forma diferencial.

Asperjar: Rociar o esparcir en forma de gotas el agua u otro líquido.

Creta: o caliza de creta es una roca sedimentaria de origen orgánico, blanca, porosa y blanda.

Ductilidad: se reconoce a la ductilidad de las estructuras o capacidad de sobrellevar SIN FALLA grandes deformaciones, como la fuente mayoritaria de liberación de energía de un conjunto estructural.

Disimetría: (Sinónimo de asimetría) Defecto de simetría.

Falla: La ocurrencia de comportamientos que ponen en peligro la estabilidad de una estructura o parte de ella, así como la ocurrencia de daños que impiden a la misma desarrollar sus funciones de diseño.

Hundimiento: Desplazamiento vertical de una estructura en forma uniforme.

Inercia: Es la propiedad que tienen los cuerpos para oponerse al movimiento cuando están en reposo o al cambio de velocidad cuando se mueven.

Licuación: Se define como la transformación de un material granular de un estado sólido a un estado líquido como consecuencia del incremento de la presión de agua en los poros. Algunos de los factores que determinan el fenómeno de licuación en los suelos son: magnitud y/o duración de movimiento sísmico, granulometría del suelo, densidad relativa y la profundidad del nivel freático.

Marga: Es un tipo de roca sedimentaria compuesta principalmente de calcita y arcillas, con predominio de la calcita, lo que le confiere un color blanquecino con tonos que pueden variar bastante de acuerdo con las distintas proporciones y composiciones de los minerales principales.

GLOSARIO

Oleaginosas: Adj. Aceitoso (Del lat. Oleaginius, aceitoso, de olea, aceituna). Las oleaginosas son semillas que se comen o utilizan para la extracción de aceite. Estas incluyen semillas de calabaza, de melón y semilla de algodón.

Piensos compuestos: Son un alimento elaborado para animales. Para la fabricación de pienso compuesto se pueden utilizar desde materias primas especialmente elaboradas con ese fin (como cereales u otro cultivo), sustancias sintéticas (como la urea) hasta desechos de la industria alimentaria.

Pilar: En ingeniería y arquitectura un pilar es un elemento vertical (o ligeramente inclinado) destinado a recibir cargas verticales para transmitir las a la cimentación y que, a diferencia de la columna, tiene sección poligonal.

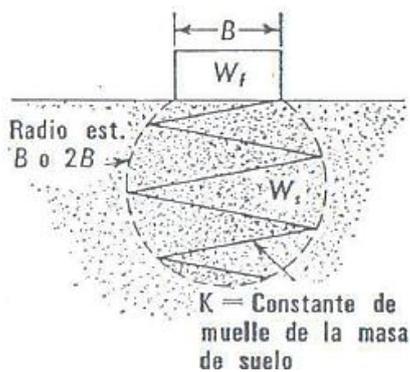
Qm: Quintal métrico, es una antigua medida de peso utilizada en la agricultura y que equivale a 100 Kg.

Resonancia: Si se aplica aun cuerpo soportado elásticamente un impulso de corta duración, vibrará con su frecuencia natural, que depende de su masa y de sus propiedades elásticas. Para un cuerpo perfectamente elástico cuyo peso sea W y cuya resistencia a deformarse sea, medida en fuerza por unidad de deformación (gramos por centímetro) sea K , la frecuencia natural f_n está dada por:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Kg}{W}}$$

Cuando se pierde energía en el proceso se dice que la vibración se ha amortiguado la frecuencia natural disminuye. La amortiguación se expresa en término de la razón de amortiguación, C , la cual es una indicación de la cantidad de energía vibratoria perdida en cada ciclo: $C = 0$ indica que no hay pérdida, $C = 1$ indica que toda la energía del impulso se ha disipado en un ciclo de vibración.

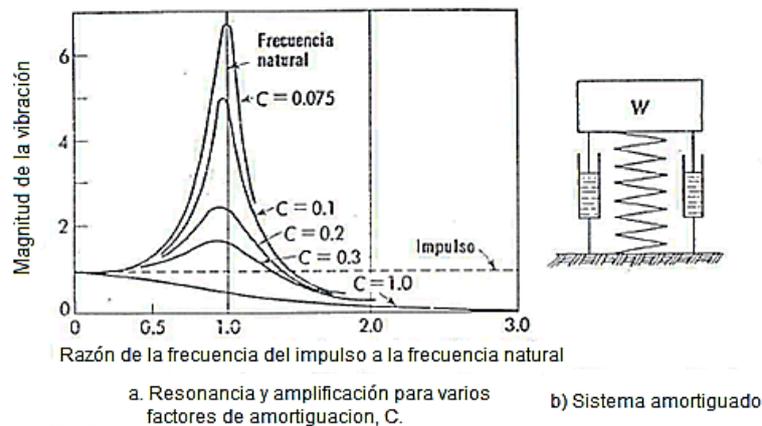
En la frecuencia natural del sistema suelo-cimiento, la resistencia por unidad de deformación K se puede estimar por el asentamiento por distorsión ρ , que depende del módulo de elasticidad del suelo y del tamaño de la cimentación. El peso del cuerpo vibrante, W , es la suma del peso de la cimentación W_f , y el de la porción de masa de suelo situada debajo de la cimentación, que vibra W_s .



Representación simplificada de las componentes de la vibración de un sistema suelo-estructura. Tomado de Ref. 23 “Mecánica de Suelos y Cimentaciones”

Si la vibración se aplica aproximadamente a la frecuencia natural $f = fn$, cada movimiento recurrente de la fuente vibratoria aplica un impulso adicional al movimiento del cuerpo.

Si no hay pérdida de energía o amortiguación, la amplitud del movimiento del sistema elástico se aumenta en cada ciclo por la energía que le comunica el impulso y con el tiempo puede llegar a ser indefinidamente grande; esto se llama *Resonancia*.



Resonancia de un sistema amortiguado. Tomado de Ref. 23 “Mecánica de Suelos y Cimentaciones”

Rigidez: Es una medida de cuanto puedo deformar un material en el rango elástico, la rigidez se puede medir a través del módulo de elasticidad.

Sensibilidad: El grado de sensibilidad es la proporción de la resistencia a la compresión simple en estado inalterado entre el estado remoldeado.

$$St = qu \text{ remoldeado} / qu \text{ inalterado}$$