



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/054/12

Señor  
ÁLVARO JESÚS SANTILLÁN GÁLVEZ  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. ÓSCAR ENRIQUE MARTÍNEZ JURADO, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"PROYECTO DE REHABILITACIÓN DE UN SILO DE CONCRETO REFORZADO PARA ALMACENAMIENTO DE CLINKER"**

- INTRODUCCIÓN
- I. GENERALIDADES
- II. DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DEL SILO
- III. DIAGNÓSTICO DE DETERIORO Y EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL SILO
- IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS
- V. PROYECTO DE REHABILITACIÓN
- VI. PROYECTO EJECUTIVO Y PRESUPUESTO
- VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES  
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CONSULTADAS

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.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 9 de abril del 2012.  
EL PRESIDENTE

  
M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JTS/MTH\*gar.

Proyecto de rehabilitación de un Silo de concreto  
reforzado para almacenamiento de Clinker

# ÍNDICE

# PROYECTO DE REHABILITACIÓN DE UN SILO DE CONCRETO REFORZADO PARA ALMACENAMIENTO DE CLINKER

## ÍNDICE

	Págs.
Introducción	1
Capítulo 1 Generalidades	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Planteamiento del problema y alcance del trabajo	7
1.3. Localización y datos del sitio	9
Capítulo 2 Descripción y Características Estructurales del Silo	12
2.1. Descripción del Silo	13
2.2. Propiedades de los materiales de construcción	13
2.3. Descripción de secciones y armados de los elementos	15
Capítulo 3 Diagnóstico de Deterioro y Evaluación Estructural del Silo	23
3.1. Inspección de la estructura y hallazgos	23
3.2. Revisión y análisis de la información disponible	26
3.3. Revisión del diagnóstico, estado físico y químico de los materiales de construcción del Silo	27
3.4. Características del material almacenado	30
3.5. Criterios de diseño cargas y combinaciones consideradas	31
3.6. Modelo y consideraciones para el análisis estructural	45
Capítulo 4 Análisis de Resultados	47
4.1. Comportamiento global de la estructura	47
4.2. Comportamiento de los elementos de la estructura	53
4.3. Análisis de deficiencias de los elementos de la estructura	60
Capítulo 5 Proyecto de Rehabilitación del Silo	61

5.1.	Análisis de las deficiencias de los elementos de la estructura	61
5.2.	Análisis del modelo para la rehabilitación	62
5.3.	Proyecto de rehabilitación	65
Capítulo 6 Proyecto Ejecutivo y Presupuesto		66
6.1.	Proceso constructivo	66
6.2.	Dibujos constructivos	70
6.3.	Especificaciones de rehabilitación	71
6.4.	Catálogo de conceptos y volúmenes de obra	82
6.5.	Presupuesto y análisis de precios unitarios	82
6.6.	Programa de ejecución y recursos	86
Capítulo 7 Conclusiones y recomendaciones		88
Bibliografía y referencias consultadas		91

Proyecto de rehabilitación de un Silo de concreto  
reforzado para almacenamiento de Clinker

# **INTRODUCCIÓN**

## **Introducción.**

Antes de los años 80 del siglo XX, los silos fueron diseñados con las teorías de Janssen y Airy, a partir de los 90 del mismo siglo las teorías mas aceptadas y realistas son las de Reimbert y Janssen modificada y han contribuido a mejorar el diseño de silos, permitiendo un mejor desempeño y seguridad de estas estructuras; sin embargo, la mayoría de los silos en México y el mundo no reciben el mantenimiento adecuado para su adecuada conservación, aunado a ello para aquellos silos que fueron diseñados y construidos antes del reconocimiento y aceptación y aplicación de estas dos teorías, los problemas generados por el comportamiento mal estimado del material almacenado hasta el momento se han caracterizado por fisuras con diferente patrón verticales y horizontales producidas por deformaciones excesivas en los muros, llegando incluso al colapso parcial o total de los silos.

El presente trabajo tiene por objetivo explicar el desarrollo del proyecto de rehabilitación estructural de un silo de concreto reforzado que presenta daños en su estructura, incluyendo en el proyecto las recomendaciones y dibujos para la reparación y reforzamiento de la estructura.

Para desarrollar el diagnóstico, análisis y evaluación estructural se siguieron las guías de los siguientes códigos y reglamentos que son aplicables; Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05); the Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials (ACI 313-97); Eurocode Actions on Silos and Tanks (EN 1991-4), el Manual de Diseño de Obras Civiles 1993 Capitulo Sismo y el Reglamento de Construcciones del DF (RCDF-2004).

También se hará uso de la metodología para rehabilitación de estructuras de concreto dañadas de la cual aplicaremos los siguientes pasos; diagnóstico, evaluación estructural, definición de objetivos de la rehabilitación, definición de la estrategia de rehabilitación, siendo que los objetivos y la estrategia constan de: saneamiento, reparación, refuerzo y protección de la estructura dañada, los pasos anteriores quedan dentro del diseño.

Para concluir con los pasos de la ejecución que son; la construcción o intervención y el programa de mantenimiento preventivo y correctivo futuro.

La información será presentada en seis apartados: en el primer capítulo se hace una descripción general de las condiciones ambientales en donde está ubicada la estructura así como la descripción de la estructura que se estudiara, en el segundo capítulo se analizan y revisan las principales características estructurales del Silo, en el tercer capítulo se muestran las condiciones de daño que presenta el silo y que son resultado de la inspección de daños, de la revisión de la documentación disponible del Silo, se presenta también un resumen de los estudios del estado físico – químico de los materiales del Silo realizados por la empresa Sika, así como la evaluación estructural que incluye la aplicación de las condiciones de carga, desarrollo y estudio del modelo de análisis estructural, en el capítulo cuarto una vez conocidos los resultados del comportamiento estructural y estado físico del Silo se analizan estos resultados y se desarrollan las revisiones particulares de todos los elementos estructurales que forman el Silo, así como la revisión global de estabilidad de la estructura, en el quinto capítulo se presenta el desarrollo de la estrategia de rehabilitación; y en el sexto capítulo se completa el proyecto con el desarrollo del proyecto ejecutivo y el presupuesto incluyendo la documentación para la realización de la licitación para la construcción de este proyecto.

# Proyecto de rehabilitación de un Silo de concreto reforzado para almacenamiento de Clinker

## CAPÍTULO 1

# **GENERALIDADES**



## **Capítulo 1 Generalidades.**

En este capítulo se presenta una descripción general en la que se incluyen: las aplicaciones de los silos, el comportamiento general de los materiales almacenados, las fallas, los reglamentos que se aplican para su diseño de las estructuras verticales usadas para contener y almacenar materiales conocidos comúnmente como “Silos“. Se aborda también el planteamiento del problema y la definición del alcance del trabajo en base al diagnóstico y la evaluación estructural con lo que se desarrolla el proyecto de rehabilitación, entendiendo por rehabilitación de la estructura, a las actividades que van desde el saneamiento, reparación, reforzamiento y protección de la misma que necesita ser rehabilitada por el deterioro producido por los elementos del medio ambiente externo, por las cargas a las que esta sometida, por detalles constructivos o por la operación y que le permitirá seguir operando en condiciones seguras.

### **1.1. Antecedentes.**

La costumbre de almacenar granos en contenedores verticales tiene algunos siglos de antigüedad.

Es hasta mediados de 1800 que se inicio la construcción de relativamente grandes recipientes de contención para propósito y uso comercial.

Desde esta época se extendió el uso de silos y bunkers, no solo para almacenar granos, sino una gran cantidad de materiales granulares. Tanto para agricultura como para la industria, el mejoramiento de los métodos y procedimientos de producción y la mecanización del manejo de materiales abrió el camino para el uso de grandes y complejos almacenamientos, con sofisticados equipos y sistemas de llenado, vaciado y manejo de los materiales.

Al principio los silos fueron usados para almacenamiento más o menos estático, los silos actuales juegan un papel mucho más activo en los procesos de manufactura y distribución. Dentro de los sistemas de proceso las principales aplicaciones son la dosificación y el mezclado de los productos almacenados.

En la actualidad, los requerimientos de grandes almacenamientos de materiales y su rápida extracción han generalizado el uso de silos con grandes dimensiones como son gran diámetro o gran altura o ambas. Para ser funcionales y económicos estos grandes silos deberán contar con importantes aberturas de descarga.

Cada una de estas tendencias produce importantes retos en el diseño y construcción de silos que requieren de nuevas investigaciones y estudios experimentales.

Aunque esto no se ha dado en la velocidad requerida, se ha avanzado poco en Japón y Europa y es casi nula en los Estados Unidos y América, por lo que los constructores y diseñadores deben hacer uso de la mejor forma posible de la tecnología existente. Un ejemplo es el uso de acero post-tensionado para resistir las grandes fuerzas radiales de tensión que se producen en silos mayores de 21.00 m de diámetro, el uso de este tipo de acero sobre el acero de refuerzo normal, permite resolver algunos problemas que ocurren en los silos de gran diámetro.

Uno de los avances más importantes de la experimentación de muchos años desarrollada alrededor del mundo es el entendimiento del comportamiento de los materiales en silos, este conocimiento abarca el estudio de las presiones producidas por los materiales contenidos en las paredes y fondos de silos, el comportamiento de estos materiales durante el llenado y vaciado y que gracias a la experimentación se revelan comportamientos anómalos en las presiones y distribución de presiones por efectos dinámicos que no pueden ser predichas por las teorías de cálculo de presión estática.

A pesar de los avances conocidos en el diseño y construcción de silos y bunkers, suceden fallas catastróficas en todas partes del mundo, produciendo grandes pérdidas económicas e inclusive de vidas.

Algunas de estas fallas son de carácter estructural, generalmente pueden ser catalogadas de acuerdo a lo siguiente: errores de diseño; errores de construcción; errores de operación.

Los errores de diseño pueden ser producidos por presiones mal estimadas, pandeo, detalles no adecuados y detallado insuficiente que guie a los constructores. Los errores de construcción incluyen olvido, espaciamiento inadecuado u omisión de colocación del acero de refuerzo, uso de mano de obra de baja calidad o uso de materiales de pobre calidad. Los errores de operación se producen por errores de almacenamiento de materiales que no son con los que se diseño de origen el silo o cambios en los sistemas de llenado y vaciado.

Para asegurar la mejor calidad y la seguridad de estas estructuras, silos y bunkers, algunos países han desarrollado códigos y estándares de diseño y construcción que también han adoptado otros países. Como son el DIN 1055 Silo Code in Germany, CH-

302 Silo Code in Rusia, The French Silo Code, el ACI-313 Standard Recommended Practice in US y el más reciente de todos que engloba el estado del arte en el mundo es el Eurocode 1991-4.Rev 2005.

El almacenamiento de materiales a granel en silos y bunkers es primordial en la industria: agrícola minera química; etc.

Estas estructuras permiten el almacenamiento durante corto o largo tiempo, por sus dimensiones los silos permiten el almacenamiento de largo tiempo y los bunkers el almacenamiento de corto tiempo, ambos son usados para almacenar productos finales, intermedios o en greña.

Dentro de las instalaciones los silos pueden estar en arreglos sencillos o en grupos y en las terminales sirven para recibir o distribuir materiales mediante diferentes formas de transporte: camión tren barcas barcos etc. Estas terminales también cuentan con sofisticados equipos para recibir distribuir y manejar materiales mediante medios neumáticos (bombas, aerodeslizadores), mecánicos (transportadores de banda, elevadores de cangilones), descargas de gravedad en fosas, extracción en silos dependiendo del material de que se trate medios mecánicos (alimentadores con vibración, tolvas vibradoras, cribas vibratorias, gusanos transportadores, etc.), neumáticos (fondos aerados, jets de aire, etc.).

Los términos “bin”, “silo”, “bunker”, tienen diferentes traducciones a lo largo del mundo y varían de autor en autor.

El término “bin” incluye ambas estructuras de almacenamiento, “silo” incluye las estructuras de almacenamiento profundas, “bunker” incluye las estructuras de almacenamiento someras, o poco profundas.

Las proporciones de un almacenamiento, especialmente la relación de la altura del material almacenado contra la menor dimensión transversal, afectan el comportamiento del material almacenado en el caso de almacenamiento estático o durante la descarga, partiendo de esto se puede definir a los silos o bunkers, existen dos métodos principales para definir esto:

Método empírico, con dos aproximaciones:

- Método de Dishinger

$$H > 1.5 \sqrt{A}$$

- Método del Reglamento Ruso  
 $H > 1.5 D$  para silos circulares  
 $H > 1.5 a$  para silos rectangulares

Donde:

$H$  = Altura de zona de carga del silo.

$D$  = Diámetro interno de la zona de carga del silo.

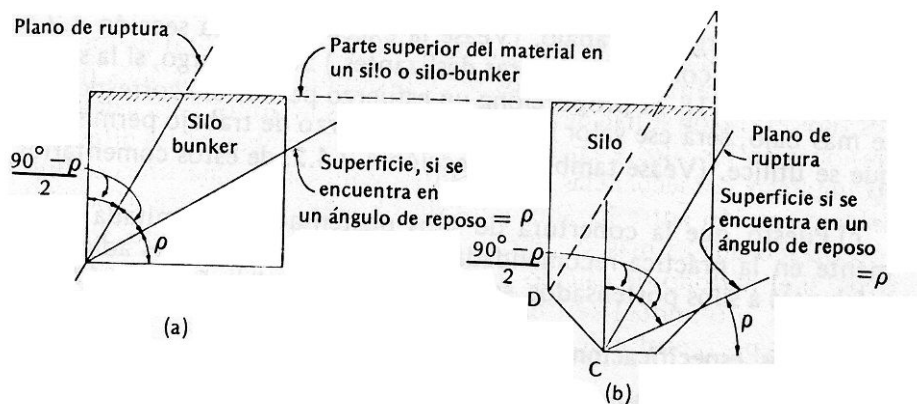
$A$  = Área transversal de la zona de carga del silo.

Si la estructura de almacenamiento satisface alguna de estas relaciones se le considera un silo, si no satisface ninguna es un bunker.

Método aproximado basado en el plano de ruptura

La figura 1.1 presenta dos almacenamientos con diferentes dimensiones.

El plano de ruptura es determinado por la teoría de Coulomb. No se considera la fricción sobre el muro, para la condición de una pared vertical y una superficie superior horizontal, la inclinación del plano de ruptura con respecto a la vertical está definido por el ángulo  $(90^\circ - \rho) / 2$ , donde  $\rho$  es el ángulo de reposo del material, si el plano de ruptura corta el plano horizontal superior del material se trata de un bunker, si corta el muro vertical es silo.



**Figura 1.1 Cálculo de diferencia entre Silo y Bunker**

Las propiedades físicas de los materiales almacenados en silos y bunkers tienen gran influencia en las propiedades de fluidez del material y las fuerzas que este aplica a los muros y superficie del fondo que lo contienen. Es claro que estas propiedades varían de

un material a otro, también los materiales presentan variaciones dependiendo de su fuente de origen por ejemplo el carbón.

Por lo que se puede considerar que los materiales varían dependiendo de su fuente, edad, grado de compactación, cambios del medio ambiente, etc.

Para el cálculo de las presiones, las propiedades de los materiales consideradas más importantes son: peso unitario ( $\gamma$ ), ángulo de fricción interna  $\rho$  y su valor es muy similar al ángulo de reposo ( $\rho$ ), y el coeficiente de fricción entre el material y muro ( $\mu'$ ).

Otras propiedades de los materiales que influyen en la fluidez o la presión son: el tamaño de las partículas; granulometría; esfuerzo que influye en el grado de compactación; cohesividad y contracción o expansión.

El peso unitario ( $\gamma$ ) puede variar con la profundidad bajo la superficie del material almacenado, pues el material de abajo es compactado por la presión del material superior.

El peso unitario varía por el tiempo de almacenamiento y el método de llenado.

Por lo que es recomendable obtener la variación de los valores dependiendo de la presión del material superior para  $\gamma$ ,  $\rho$ ,  $\mu'$ .

El coeficiente de fricción  $\mu'$  entre el material y el muro varía con la edad del almacenamiento y si es de metal o concreto y el efecto de la edad puede hacer variar el valor debido a la fricción que va haciendo más lisa la pared del silo.

Los materiales harinosos como el cemento se adhieren a las paredes y producen que el coeficiente de fricción sea muy parecido a la  $\tan \rho$ .

Los materiales aceitosos como la soya o los frijoles lubrican los muros y disminuyen el coeficiente de fricción  $\mu'$ , e incrementan la presión lateral sobre los muros.

Algunos materiales como el Clinker, el cemento o las cenizas volantes son almacenados calientes y producen grandes esfuerzos por temperatura en los muros de silos o bunkers.

## **1.2. Planteamiento del problema y alcance del trabajo**

En 1979 se construyó el Silo para almacenamiento de Clinker con el fin de optimizar las operaciones de la planta, pues el patio existente resultaba insuficiente para recibir la producción de Clinker de dos líneas, como se menciona, los silos permiten una mejor operación pues el material que se almacena puede ser extraído o recuperado hasta en un 90% y en un menor tiempo.

Este Silo se diseñó para almacenar 25,000 ton de Clinker, tiene un diámetro de 22.0 m y una altura total de 57.863 m, el diseño se realizó siguiendo las recomendaciones del código ACI 313-77, así como los reglamentos y especificaciones de esos años; con esta referencia se puede considerar que en general las cargas y condiciones de diseño, son menores que las que en la actualidad se obtienen para diseñar este tipo de estructuras, también las especificaciones de los materiales de construcción eran menos rigurosas, en este caso el concreto se definía por la resistencia a la compresión y no por el concepto de durabilidad; para su construcción se usó el procedimiento de colado continuo o cimbra deslizante mediante la colocación de barras de acero perdidas y embebidas en el interior de los muros que van siendo colados en tramos de 1.20 m de altura, en las que se apoyan los gatos hidráulicos y van elevando la cimbra a razón de 20 a 30 cm por hora, procedimiento que si no cuenta con la supervisión adecuada, capacitada y vigilante, sucede que el acero de refuerzo no se coloca adecuadamente (flotado), el concreto no recibe la compactación correcta mediante el vibrado y la superficie no se cura adecuadamente, es común que con el tiempo de operación y los miles de ciclos de carga y descarga este tipo de estructuras presenten algunos signos de deterioro y daño en sus elementos y principalmente en los muros.

En años recientes se ha detectado el incremento en la cantidad de fisuras y grietas en ambos sentidos, tanto vertical como en horizontal, del muro perimetral de concreto reforzado del Silo, así como desprendimientos de bloques de concreto de mediano tamaño que dejan expuesto el acero de refuerzo principalmente en las juntas de colado sin tratamiento adecuado; esto da una clara evidencia de que el Silo presenta problemas importantes de daños y deterioro en los muros lo que lleva a considerar que el comportamiento estructural no es adecuado y existen riesgos en la estabilidad y capacidad de carga del Silo, por lo que se decidió desarrollar el proyecto de rehabilitación del mismo, como parte del mantenimiento correctivo a estructuras de concreto en la planta de cemento.

La metodología que se plantea para la solución del problema y que permitirá llegar al proyecto de rehabilitación del Silo dañado y en el que se llevarán a cabo una serie de actividades es de acuerdo a lo siguiente:

- 1.2.1. Planeación y conocimiento del problema; se realizó una definición de las principales actividades a realizar.

- 1.2.2. Solicitud y revisión de la información disponible; se desarrollo la revisión a detalle de los dibujos tal como se diseño, la información del sitio.
- 1.2.3. Visita de inspección y evaluación visual a detalle del Silo; en la que se revisan de forma cercana y posible los daños como fisuras desprendimientos de concreto, corrosión en el acero, desplomes, conexión de elementos de acero con concreto y se realiza un plan en conjunto con la planta.
- 1.2.4. Revisión de los dibujos estructurales para comprender el funcionamiento de la estructura y su sistema resistente, las dimensiones y configuración del silo y una estimación preliminar de masas y pesos de operación.
- 1.2.5. Revisión de la información adicional disponible como los reportes de mecánica de suelos y principalmente el reporte de diagnosis desarrollado por Sika Mexicana.
- 1.2.6. Desarrollo de los criterios de diseño y de cargas. Definiendo el peso propio, las cargas de equipo, las cargas de temperatura, las cargas de presión y fricción producidas por el Clinker almacenado, las cargas de sismo, las cargas de viento y las correspondientes combinaciones de diseño y de comportamiento.
- 1.2.7. Desarrollo del modelo matemático para análisis de la estructura como fue construida, este basado en un modelo de elemento finito. Realizando el análisis estructural del silo bajo las cargas aplicadas para evaluar su comportamiento estructural.
- 1.2.8. Obtención de los esfuerzos en los muros del Silo y en los demás elementos resistentes a fuerzas laterales, debidos a las combinaciones de cargas verticales, cargas del material almacenado y las cargas de sismo.
- 1.2.9. Obtención de las fuerzas en los muros y cálculo de las relaciones demanda a capacidad resistente (RDC) para los elementos resistentes.
- 1.2.10. Preparación de los resúmenes de deficiencias, recomendaciones generales y el concepto de rehabilitación.
- 1.2.11. Revisión del modelo de rehabilitación y desarrollo del proyecto ejecutivo.
- 1.2.12. Desarrollo del presupuesto y programas de construcción.

### **1.3. Localización y datos del sitio.**

La planta de producción de cemento se encuentra localizada muy cerca de la ciudad de

Orizaba, en el estado de Veracruz, ver figura 1.2.

La instalación cuenta con dos líneas de producción para la manufactura de cemento. Para almacenar Clinker la planta tiene un patio horizontal con extracción mediante un túnel longitudinal en el centro con bocas de extracción y un Silo de almacenamiento de Clinker vertical de 25,000 ton con un túnel de extracción en el que se localizaron tres bocas de salida con sus válvulas para extraer material de distintas posiciones y permitir la menor cantidad de material muerto en el fondo del Silo.

#### 1.3.1. Datos de localización.

Localización de la planta	Orizaba / Veracruz / México
Altura sobre el nivel medio del mar	1134 m
Latitud	18°51'27"N
Longitud	97°02'32"W

#### 1.3.2. Datos meteorológicos.

Temperatura ambiente	Promedio máxima	30.0°C
	Promedio mínima	9.5°C
	Media anual	19.2°C
Presión atmosférica	Media anual	1013 mbar
Humedad relativa	Media anual	76.5 %
Precipitación		
Tormenta 24 hr	Máxima	139.0 mm/día
	Promedio anual	1798 mm/año
Viento	Velocidad máxima	19.6 m/s
	Dirección que rige	S
Clima	Semi- cálido húmedo	
Ambiente Corrosivo	Medianamente corrosivo	

#### 1.3.3. Datos del Suelo.

Se realizó un sondeo mixto hasta la profundidad de 22.1 m con un perfil estratigráfico descrito a continuación:



- En la capa superficial existe una losa de concreto y rellenos con un espesor de 1.20 m
- Bajo esta capa siguen suelos limo-arcillosos y arcillo-limosos con poca arena y grava, de consistencia blanda a firme y un contenido de agua máximo del 84% y una resistencia al corte de 0.4-0.5 kg / cm<sup>2</sup>, con colores café y gris amarillento y un espesor de 8.8 m.
- Continúa una capa de suelo limo-arcilloso muy firme de igual naturaleza que la arcilla superior, pero de menor compresibilidad con un espesor de 5.8 m
- Continúan desde la profundidad anterior hasta la profundidad estudiada depósitos con suelos de arena-arcillosa con grava en estado muy compacto con contenido de agua del 20 al 40% y un espesor mayor a los 6.3 m.

#### 1.3.4. Datos del suelo para obtención de parámetros sísmicos.

- Subsuelo clasificado como tipo II. que equivale a un suelo medio, como está descrito en los párrafos anteriores.
- Está ubicada en la zona B, de acuerdo con la regionalización sísmica de la República Mexicana.



**Figura 1.2 Ubicación de la Planta Orizaba**

Proyecto de rehabilitación de un Silo de concreto  
reforzado para almacenamiento de Clinker

## CAPÍTULO 2

# **DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DEL SILO**

## Capítulo 2 Descripción y Características Estructurales del Silo.

En este capítulo se describen las principales características de la estructura, las dimensiones del Silo y los elementos que lo conforman. Posteriormente se detallan las propiedades mecánicas de los principales materiales, las secciones y armados de los elementos estructurales que lo componen, así como su evaluación estructural.

En la figura 2.1 se puede ver el silo analizado en este trabajo.



**Figura 2.1 Vista general del Silo de Clinker**

## **2.1. Descripción estructural del Silo.**

El Silo de Clinker es una estructura circular de concreto reforzado, con un diámetro interior de 22.00 m con un espesor de pared de 400 mm, tiene una altura de 57.863 m desde el nivel de piso (elev. 100.00) hasta el tope de la cubierta (elev. 157.863).

La cimentación está resuelta a base de 34 pilas de 1.20 m de diámetro y 32 m de profundidad, unidas mediante cabezales de concreto de 2.00 m de espesor y un ancho mínimo de 2.00 m colocados en forma perimetral, siguiendo la circunferencia del muro y en dos franjas paralelas al diámetro a lo largo del túnel de extracción a 3.15 m bajo el nivel de piso.

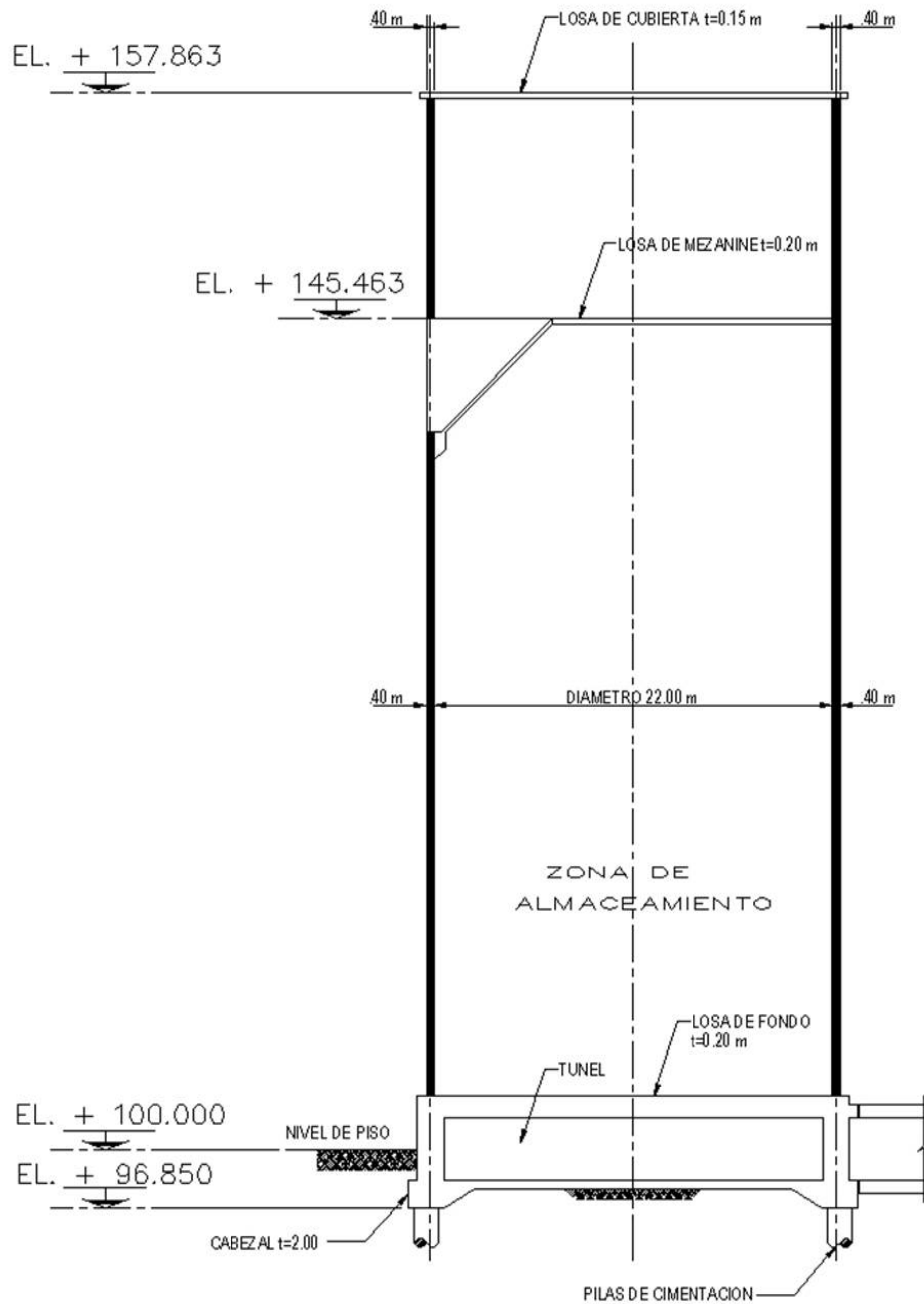
Sobre los cabezales existen muros perimetrales de concreto con espesor mínimo de 1.00 m formando un anillo de doce lados y en el sentido paralelo al diámetro muros del mismo espesor que forman el túnel longitudinal.

Sobre los muros se apoya una losa de concreto reforzado de 1.20 m de peralte que funciona como fondo del silo en la que en la zona central existen tres bocas de extracción, también de estos muros se tiene el desplante del muro perimetral del Silo que forma la porción del Silo llamada zona de presión en referencia al efecto de empuje lateral que produce el material almacenado, al llegar los muros al nivel 145.463 existe una losa de 20 cm de espesor de concreto reforzado apoyada en vigas de acero que están conectadas a los muros perimetrales que sirve para confinar el material almacenado y en este nivel se apoya una galería de acero que soporta un transportador de placas que transporta el Clinker para llenar el Silo así como plataforma de operación.

El muro perimetral del Silo continua hasta llegar al nivel 157.863 en el que existe una losa de concreto reforzado de 15 cm de espesor que se apoya en armaduras de acero conectadas al muro de concreto y que forma la cubierta del mezanine para operación de acuerdo a la figura 2.2.

## **2.2. Propiedades de los materiales de construcción del Silo.**

Todos los elementos estructurales que forman el Silo como: pilas, cabezales de cimentación, muros del túnel y el arranque de muros, losa de fondo, muros en zona de presión, losas de mezanine y cubierta, están resueltos a base de concreto reforzado con las siguientes características:



**Figura 2.2 Sección transversal Silo de Clinker**

Concreto con una resistencia a la compresión nominal a los 28 días.

$$f'_c = 250 \text{ kg / cm}^2$$

El módulo de elasticidad.

$$E_c = 220,000 \text{ kg / cm}^2$$

Acero de refuerzo con un límite de fluencia.

$$f_y = 4,200 \text{ kg / cm}^2$$

Con un módulo de elasticidad

$$E_s = 2,040,000 \text{ kg / cm}^2$$

Las estructuras de acero que soportan las losas de mezanine y cubierta, así como las plataformas de operación y la galería de alimentación del Clinker al silo están resueltas con:

Acero estructural ASTM A-36 con un límite de fluencia.

$$f_y = 2,530 \text{ kg / cm}^2$$

Con un módulo de elasticidad

$$E_s = 2,040,000 \text{ kg / cm}^2$$

El análisis realizado por la empresa Sika, muestra en un estudio aleatorio mediante extracción de corazones, detección y escaneo del acero refuerzo que la calidad del concreto y la localización y diámetros de acero de refuerzo cumple en general con las especificaciones del concreto y acero recomendadas, el mismo estudio indica que el acero de refuerzo en general está adecuadamente colocado de acuerdo a lo especificado en los planos.

### **2.3. Descripción de secciones y armados de los elementos.**

Muros en zona de presión.

El acero de refuerzo para los muros de 400 mm de espesor consiste en una doble capa de varillas de refuerzo de distintos diámetros en sentido horizontal y vertical, la tabla 2.1 muestra los diámetros y sus separaciones de acuerdo al diseño y lo medido en el estudio desarrollado por la empresa Sika, la variación de diámetros y separaciones del refuerzo horizontal depende en forma proporcional a los esfuerzos de empuje horizontal que varían de acuerdo a la profundidad del almacenamiento de material.

La relación del área de acero de refuerzo a área de la sección transversal de concreto es 0.0031 que satisface al límite el refuerzo mínimo (ACI sección 10.5.1).

Adicionalmente se proporciona acero de refuerzo colocado alrededor de huecos, lo que se puede ver en la figura 2.3 tienen como mínimo 1000 mm de espesor y que está reforzada con dos lechos de varillas de acero de refuerzo en ambos sentidos: el lecho inferior es de varillas de refuerzo # 12 @ 300 mm; en el lecho superior el refuerzo es a base de varillas

# 10 @ 300 mm y en la zona del túnel se adicionan varillas del # 12 @ 300 mm adicionales para dar una separación @150 mm.

En la zona central del túnel se colocaron tres huecos de extracción a los que se colocó refuerzo adicional en ambos lechos y ambos sentidos, así como refuerzo diagonal en las esquinas como se puede ver en la figura 2.4.

Muros bajo la zona de presión.

Estos muros tanto el perimetral, de doce lados, como los transversales que forman el túnel tienen un espesor mínimo de 1000 mm y están armados con dos capas de varillas del # 10 @ 300 mm en ambos sentidos; los muros en conjunto con la losa de fondo del Silo y el cabezal de cimentación forman un cuerpo rígido que recibe las cargas del almacenamiento del Silo y las transmite a las pilas de cimentación como puede verse en la figura 2.5.

ZONA	ELEVACIÓN (m)	ACERO DE REFUERZO		ACERO DE REFUERZO	
		Diseño	Reporte Sika	Diseño	Reporte Sika
Zona de almacenamiento (presión)	De 145.463 a 157.713	# 5 @ 200 mm ambas caras	# 4 @ 200 mm ambas caras		# 4 @ 200 mm ambas caras
	De 138.000 a 145.463	# 8 @ 200 mm ambas caras	# 8 @ 200 mm ambas caras		
	De 128.580 a 138.000	# 10 @ 200 mm ambas caras	# 10 @ 200 mm ambas caras	# 5 @ 200 mm cara exterior # 4 @ 200 mm cara interior	# 5 @ 200 mm ambas caras
	De 112.530 a 128.580	# 10 @ 150 mm ambas caras	# 10 @ 150 mm ambas caras		
	De 102.950 a 112.530	# 10 @ 120 mm ambas caras	# 10 @ 120 mm ambas caras		
Bajo la zona de almacenamiento	De 98.850 a 102.950	# 10 @ 300 mm ambas caras	n/d	# 10 @ 300 mm ambas caras	n/d

**Tabla 2.1 Esquema de armado como construido para muros de silo**

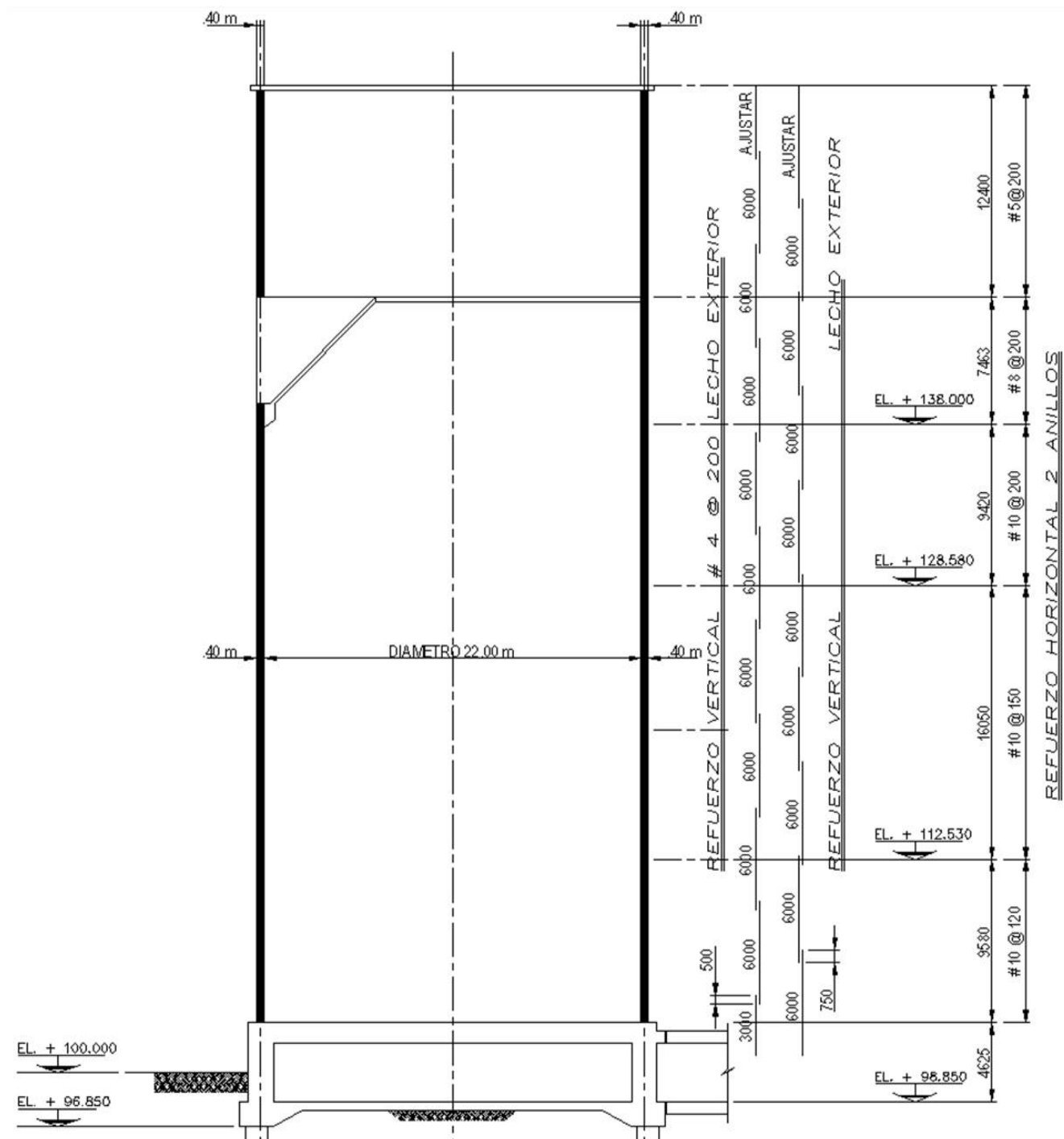


Figura 2.3 Armado de muros

Cabezales de cimentación.

Formados por traves de concreto de 2,000 por 2,000 mm armadas con 7 varillas # 10 en ambos lechos y estribos del # 5 @ 300 así como 3 varillas # 5 @ cara, estos cabezales



siguen la configuración perimetral del muro, siguen también la configuración longitudinal del túnel; este cabezal recibe y permite que se anclen adecuadamente las 34 pilas distribuidas en el perímetro del Silo y en forma longitudinal en el túnel como se puede observar en la figura 2.6.

Pilas de concreto.

Las 34 pilas usadas para transmitir las cargas del Silo a un estrato más resistente son de 1,200 mm de diámetro y 32 m de profundidad armadas con 20 varillas # 12 y en la parte superior se les colocaron bastones adicionales a razón de 20 varillas # 10 y a lo largo se colocaron tres secciones de estribos a diferente separación en los extremos, tanto superior como inferior, se colocaron estribos # 5 @ 120 mm y en la zona central # 5 @ 200 de acuerdo a la figura 2.7, estas pilas tienen una capacidad de carga de 754 t.

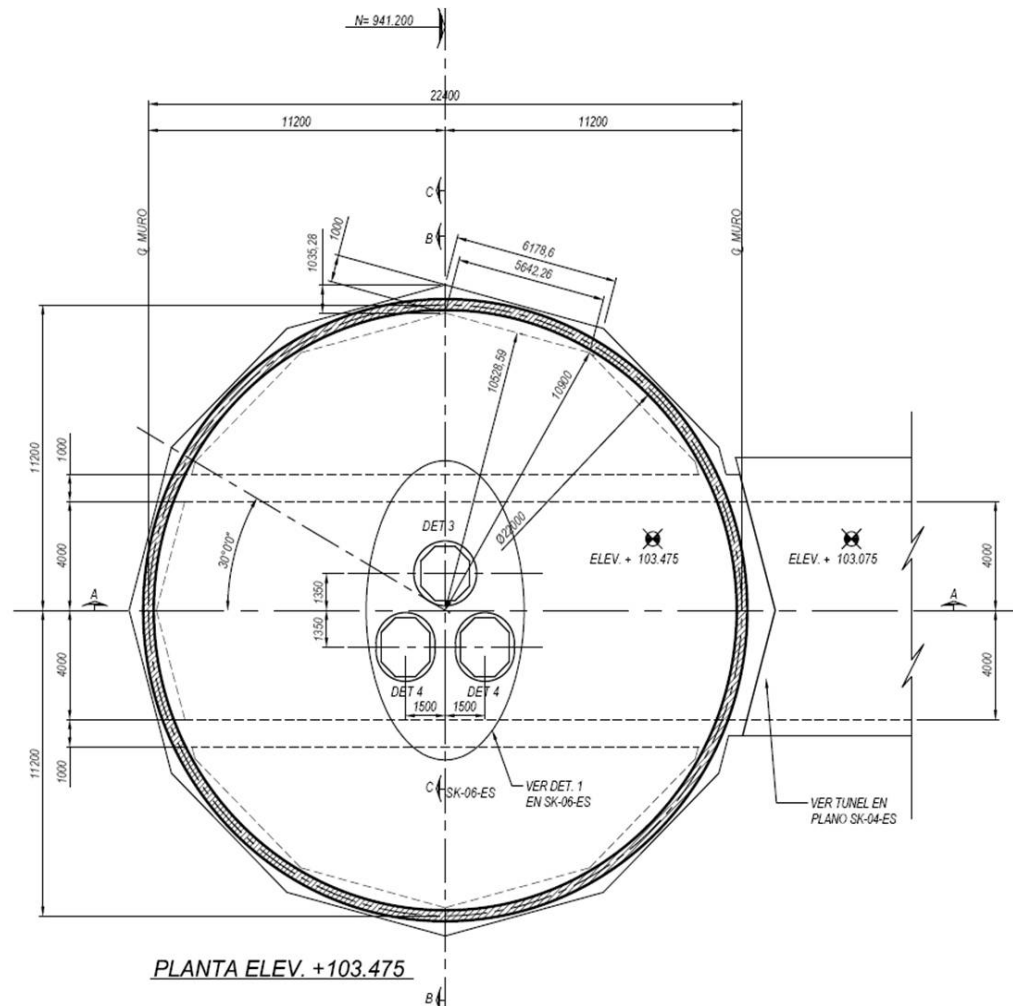


Figura 2.4 Losa de fondo del Silo

Losas superiores para mezanine y cubierta.

Estas losas sirven para formar el mezanine de operación; la losa de mezanine tiene un espesor de 200 mm y está armada con varillas # 3 @ 200 en ambos lechos y en ambos sentidos y está apoyada y soportada en una estructura metálica a base de vigas armadas de acero estructural, que a su vez se conectan para anclarse y apoyarse en el muro de concreto perimetral del Silo, estas conexiones se realizaron usando las placas embebidas que se dejaron en el muro durante el deslizado.

La losa de cubierta tiene un espesor de concreto de 150 mm en promedio, pues se le dejó una pendiente que va del centro hacia el perímetro para evitar la acumulación de agua, está armada con varillas de refuerzo # 3 @ 200 en ambos lechos y ambos sentidos. Sobre la losa se colocó un sistema de impermeabilizante para proteger la losa y evitar filtraciones hacia el mezanine de operación, como se puede ver en la figura 2.8.

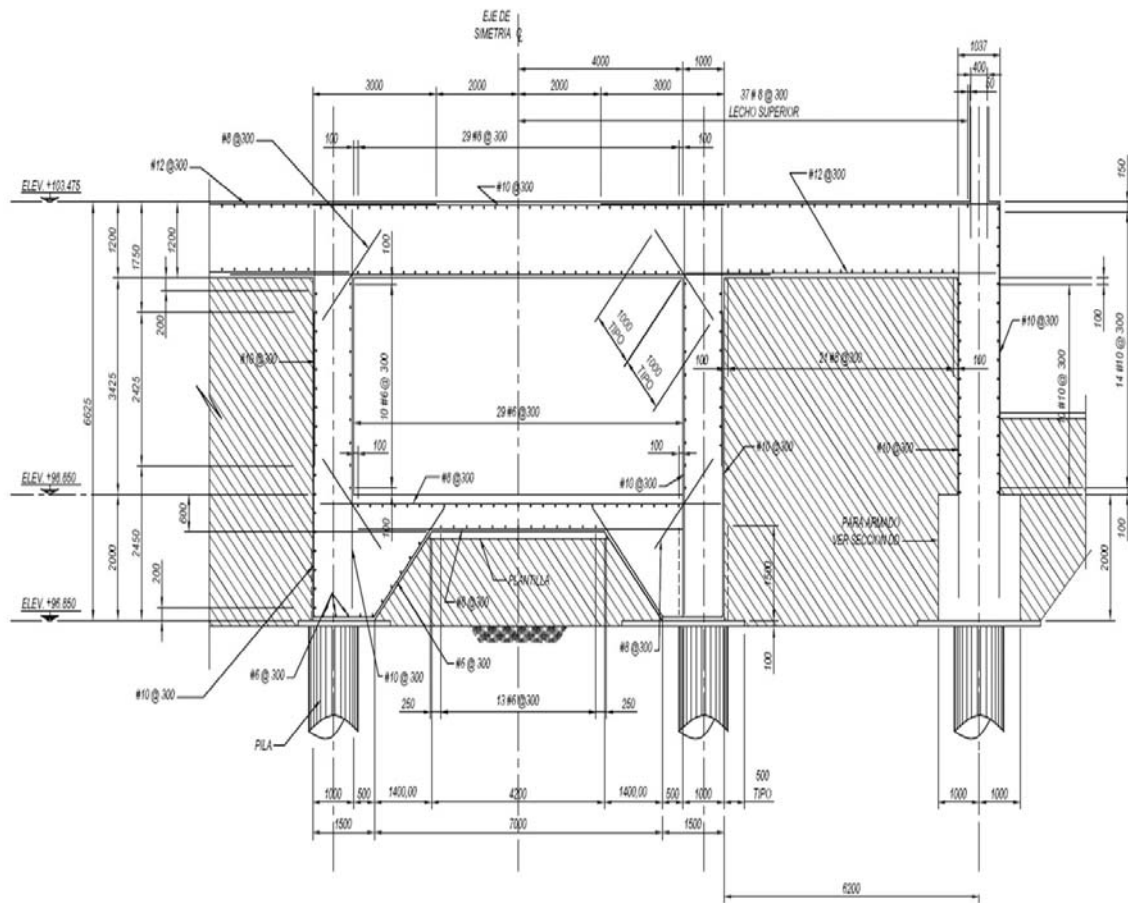


Figura 2.5 Muros bajo zona de presión

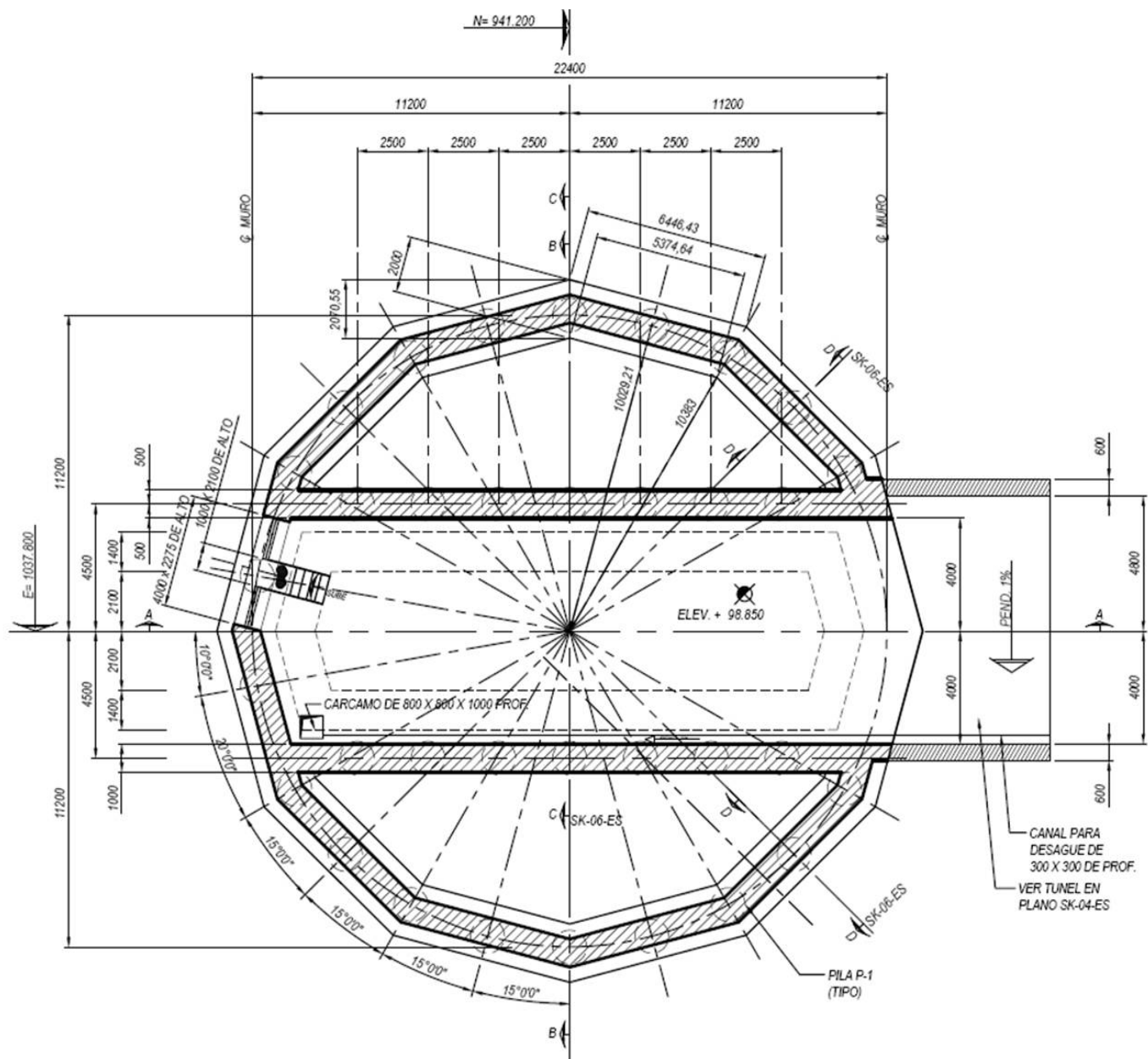
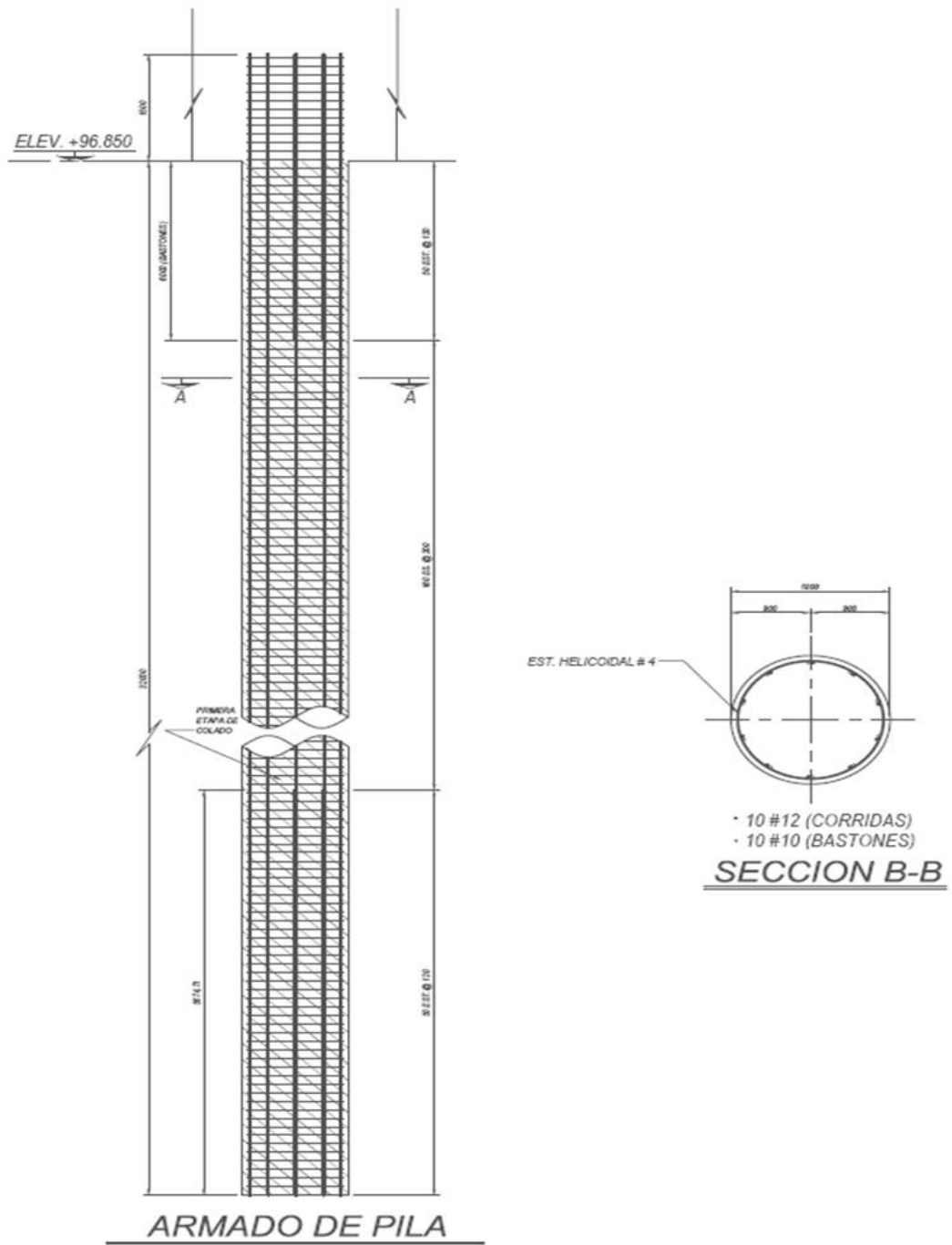


Figura 2.6 Cabezal de cimentación



**Figura 2.7 Pila de cimentación**

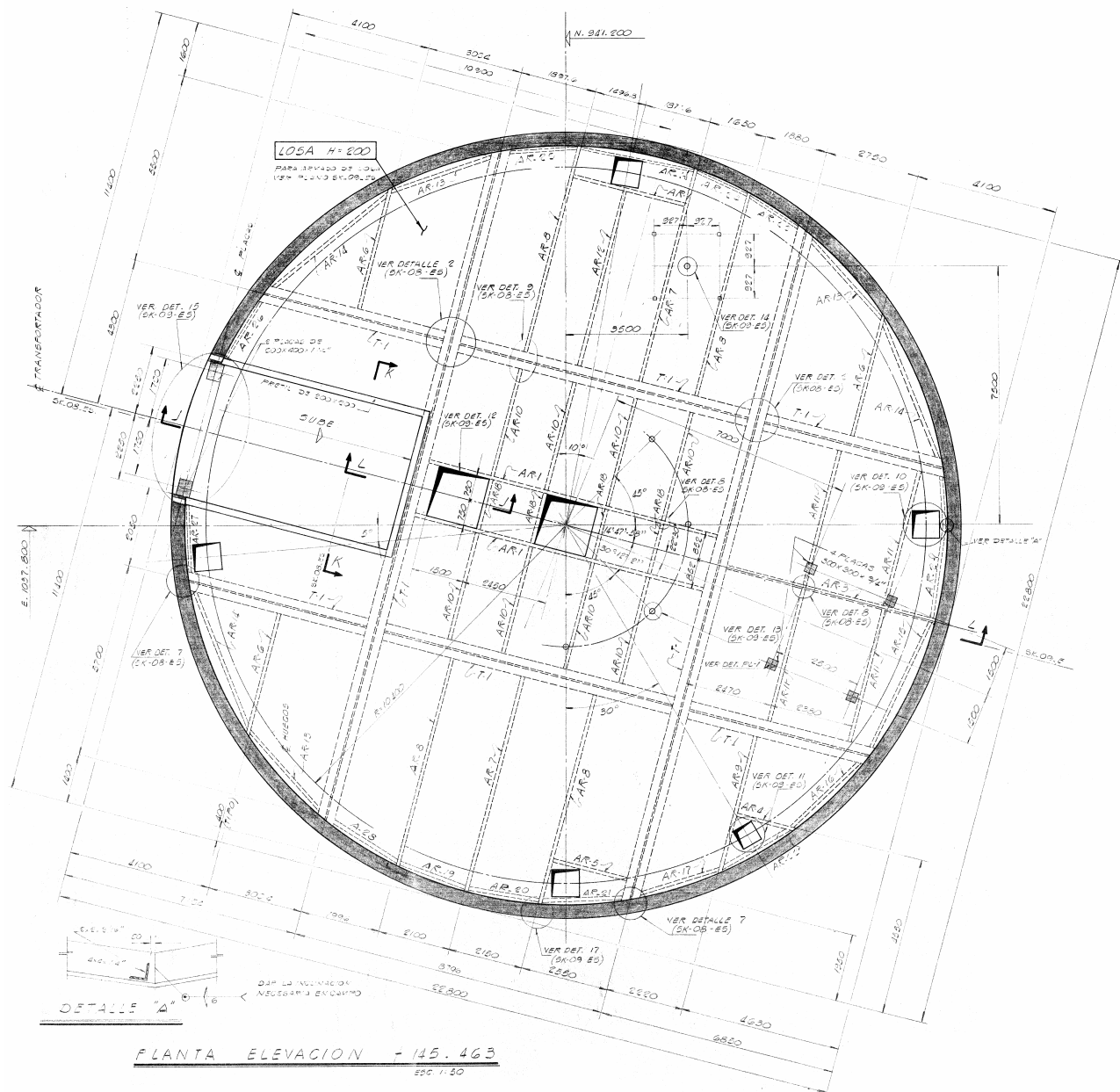


Figura 2.8 Losa de mezanine

Proyecto de rehabilitación de un Silo de concreto  
reforzado para almacenamiento de Clinker

## CAPÍTULO 3

# **DIAGNÓSTICO DE DETERIORO Y EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL SILO**

## **Capítulo 3 Diagnóstico de Deterioro y Evaluación Estructural del Silo.**

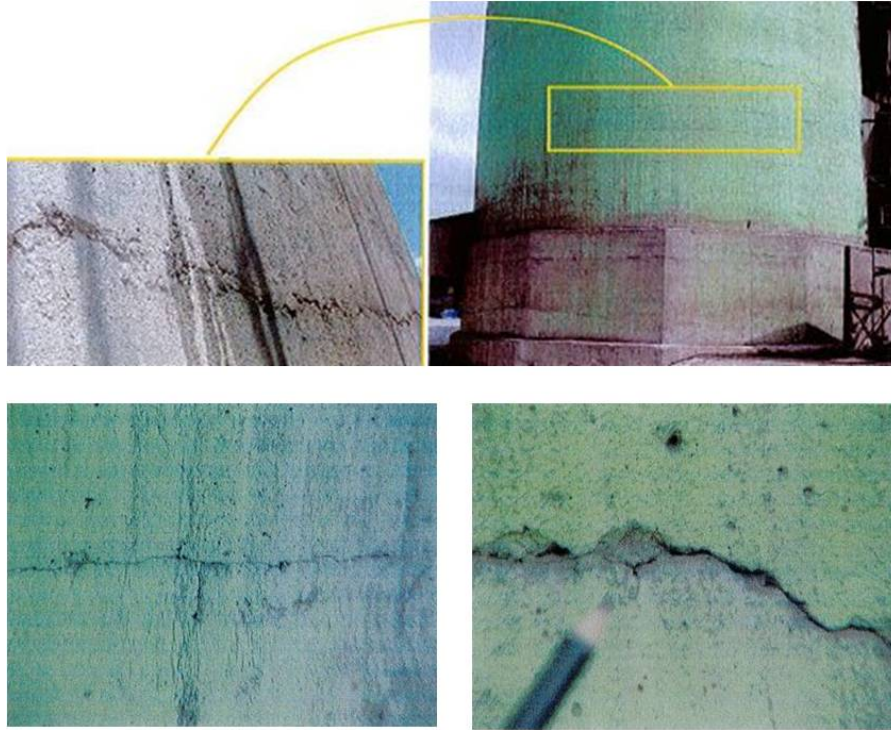
Dentro del trabajo, este capítulo es uno de los más importantes pues en él se desarrolla la parte de diagnóstico y evaluación estructural cuyos resultados permiten que pueda conocerse el origen de las deficiencias y el deterioro que sufre la estructura, para evaluar el riesgo y desarrollar el proyecto de rehabilitación.

### **3.1. Inspección de la estructura y hallazgos.**

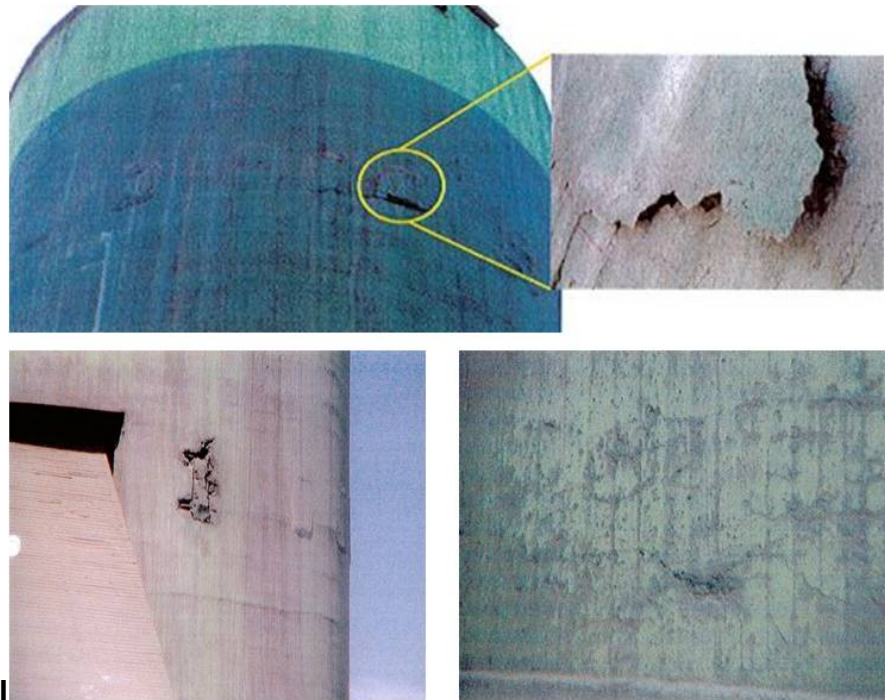
Se llevo a cabo una visita de inspección con el fin de conocer el estado actual del Silo de Clinker, esta inspección se realizó de la forma más detallada posible, pues se pudo colocar una canastilla desde la cubierta, que permitió hacer un levantamiento de los daños muy a detalle y se encontraron los siguientes hallazgos que se agrupan a continuación:

- 3.1.1. Juntas de colado mal preparadas y sin tratamiento alguno a lo largo del Silo; es claro que durante el deslizado del Silo se presentaron varios paros en el ritmo de deslizado lo que produjo varias juntas de colado (juntas frías), que no fueron tratadas adecuadamente y que ahora son muy visibles por los movimientos propios de la operación del Silo como se puede ver en la figura 3.1.
- 3.1.2. Desprendimiento de trozos de concreto debidos a la incorrecta colocación del concreto en los huecos o ventanas preparados para apoyar la estructura metálica del mezanine y la cubierta en los muros del Silo, también en este inciso se resalta el deficiente colado que se hizo de algunas ventanas para la introducción de equipo al mezanine de operación como se muestra en la figura 3.2.
- 3.1.3. Fisuras finas y algunas grietas principalmente en la parte inferior del Silo en la zona de carga con espesores de entre 0.15 y 0.60 mm que en promedio son mayores al ancho de grieta considerado como aceptable o permisible que es de 0.20 mm, lo que indica que existen deformaciones en sentido transversal por empuje del material en los muros, como se ve en la figura 3.3.
- 3.1.4. Desprendimiento de recubrimientos por incipiente corrosión del acero de refuerzo en algunas zonas, esto se identifica en la figura 3.4.

Como se puede apreciar, los daños indicados en los incisos 3.1.1 y 3.1.2 corresponden totalmente a errores de proceso constructivo, y los de los incisos 3.1.3 y 3.1.4 son errores de diseño y dan indicio de que las cargas consideradas son mayores o que el diseño está escaso.

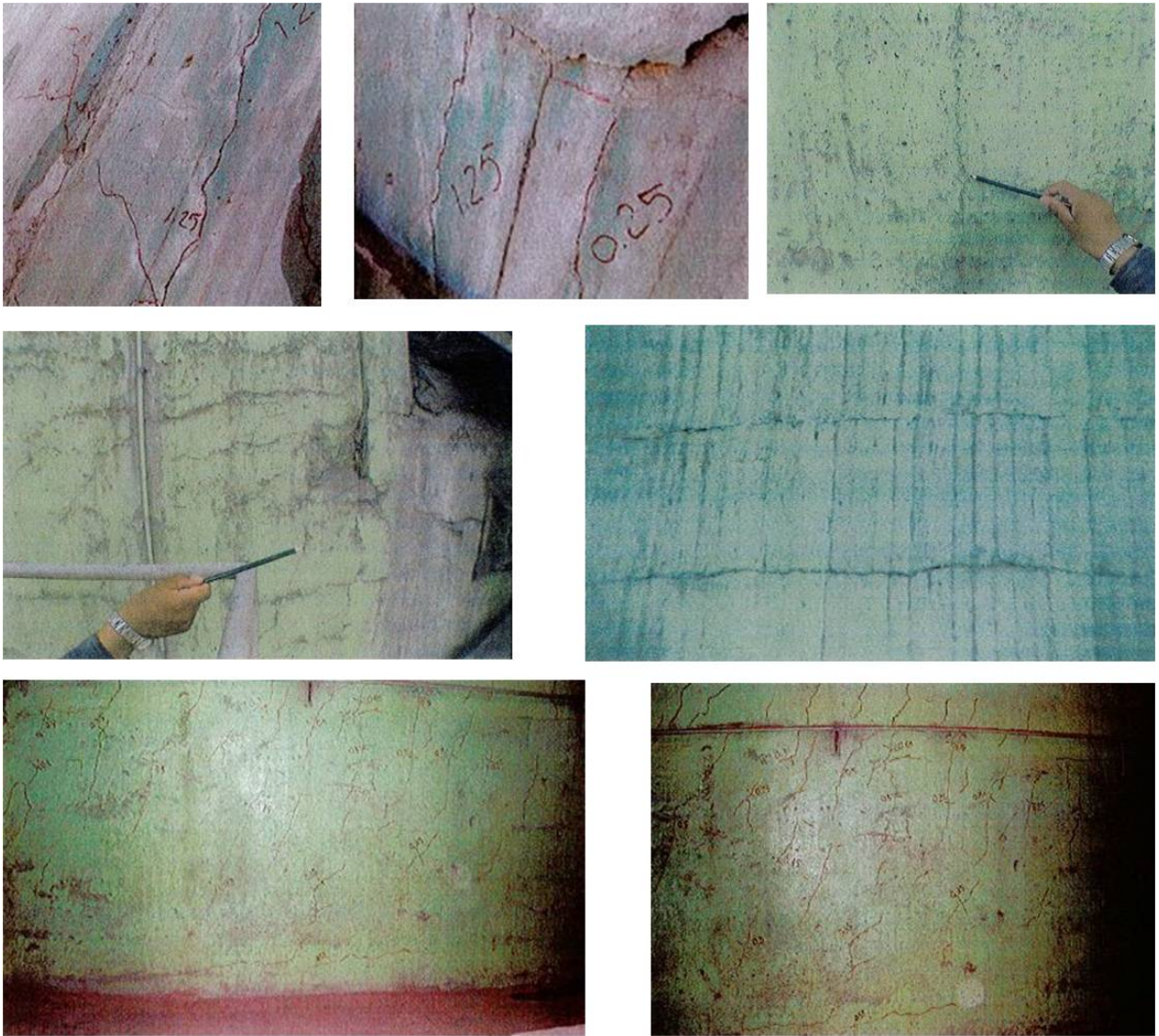


**Figura 3.1 Juntas de colado sin tratamiento ni refuerzo especial**



**Figura 3.2 Desprendimientos de concreto en ventanas de colado**





**Figura 3.3 Fisuras en muros de Silo**



**Figura 3.4 Corrosión incipiente del acero de refuerzo**

### **3.2. Revisión y análisis de la información disponible.**

Posterior a la inspección visual detallada se analizó y revisó la información del proyecto que fue posible reunir, dado que para este tipo de construcciones, que tienen más de 30 años de haber sido construidas, normalmente resulta complicado lograr obtener toda la información. En este caso, por ejemplo, no se lograron conseguir las memorias de cálculo, aunque una de las finalidades de este estudio es el de restituir al Silo por lo menos su capacidad de operación, por lo que al realizar el análisis y diseño del estado actual se podrá rehabilitar para cumplir con este objetivo, adicionalmente se lograron obtener los dibujos estructurales, el estudio de mecánica de suelos, y una estimación de las cargas que producen los equipos en la estructura; por lo que se considera que la información encontrada es suficiente para poder analizar a detalle las condiciones actuales del Silo y será complementada con el informe del estudio de diagnóstico que dadas las condiciones mencionadas, aportará mucha información para poder desarrollar completamente el estudio de evaluación estructural.

Se lograron obtener los dibujos estructurales del Silo de acuerdo a esta lista:

- SK-01-AU Plano para deslizado
- SK-02-AU Plano para deslizado
- SK-03-ES Armado en muro deslizable
- SK-04-ES Túnel plantas y cortes
- SK-05-ES Cimentación
- SK-06-ES Cimentación cortes y detalles
- SK-07-ES Planta y armaduras de elevación +145.463
- SK-08-ES Secciones y detalles de elevación +145.463, 1 de 2
- SK-09-ES Secciones y detalles de elevación +145.463, 2 de 2
- SK-10-ES Huecos, cortes y detalles
- SK-11-ES Silo de Clinker planta de elevación +157.713
- SK-12-ES Escalera
- SK-13-ES Escalera, cortes y detalles

La revisión y análisis de los dibujos estructurales permite conocer la forma en que fue concebido el trabajo estructural del Silo, así como también se obtuvo la información necesaria para poder generar el modelo de análisis estructural y los datos de diseño

como secciones, armados y características de materiales estructurales para llevar a cabo la evaluación estructural.

También se revisó y analizó el estudio de mecánica de suelos del que se obtienen datos de características del suelo para obtener las fuerzas sísmicas y la capacidad de carga de la cimentación a base de 34 pilas de cimentación con un diámetro de 1.20 m, y un cabezal perimetral así como las condiciones geológicas del sitio, las propiedades del suelo de cimentación los hundimientos estimados, todas estas propiedades y datos permiten poder realizar la evaluación de forma más completa y conocer de mejor forma el comportamiento de la estructura del Silo.

### **3.3. Revisión del diagnóstico, estado físico y químico de los materiales de construcción del Silo.**

La finalidad del estudio de diagnóstico es determinar las características y condiciones actuales; del concreto, del acero de refuerzo y estructural que integran la estructura para establecer, mediante esta investigación los posibles daños o patologías existentes en el concreto.

De acuerdo a los resultados del estudio realizado por la empresa SIKA Mexicana y en conjunto con la evaluación estructural se emitirán recomendaciones de procedimientos y sistemas de rehabilitación que permitan incrementar la vida útil de la estructura, siendo esto el resultado final del proyecto de rehabilitación.

Los estudios de diagnóstico comprendieron los ensayos físico-químicos de tipo semi-destrutivo y no destructivo siguientes:

- 3.3.1. Determinación de las características mecánicas del concreto mediante pruebas de resistencia a la compresión de núcleos con estimación del módulo de elasticidad, índices esclerométricos y ensayos de resistencia a la adherencia.
- 3.3.2. Determinación del grado de saturación de agua en el concreto.
- 3.3.3. Obtención y determinación del grado de contaminación del concreto mediante pruebas de carbonatación, contenido de cloruros y contenido de sulfatos.
- 3.3.4. Verificación de la concordancia entre la información documental y las instalaciones existentes mediante detecciones de separaciones y cuantificaciones del acero de refuerzo embebido.
- 3.3.5. Identificación y caracterización de daños como; fisuras, concreto desprendido.

### 3.3.6. Realización de estudios de potencial de corrosión en la mayor parte del Silo para Identificación y caracterización de daños por efectos de corrosión en el acero de refuerzo.

Para obtener la información de diagnóstico de daños se obtuvieron las muestras necesarias y representativas que se ensayaron en el laboratorio y permiten conocer y diagnosticar los daños y las recomendaciones para su mitigación:

- Extracción de 14 núcleos de 75 mm de diámetro y 1 de 50 mm.
- Ensaye de resistencia a compresión y determinación de peso volumétrico de 9 especímenes, así como la obtención del módulo de elasticidad de 4 de ellos.
- Determinación del contenido de sulfatos en 3 de las 9 muestras citadas en el inciso anterior.
- 8 pruebas de resistencia a la adherencia en el concreto con probetas de 75 mm de diámetro.
- 12 sitios para detección de armados y medición de espesores de recubrimiento mediante equipo generador de corrientes Eddy.
- 26 series de determinación de dureza del concreto mediante esclerómetro.
- 8 determinaciones de profundidad de carbonatación, mediante solución indicadora de pH, realizadas en núcleos de concreto.
- 25 series de 3 mediciones cada una, de contenido de humedad mediante sondeo electrónico.
- Alrededor de 300 m<sup>2</sup> de área de lecturas para estimar el potencial de corrosión en el acero de refuerzo.
- 18 extracciones de muestras de polvo en 6 sitios para determinaciones de contenido de cloruros solubles en ácido.
- Identificación de daños superficiales visibles y caracterización de los mismos.

La inspección, el muestreo y las pruebas de laboratorio practicadas en muestras de concreto tomadas del Silo de Clinker permitieron determinar las características físicas y mecánicas, así como su estado, grado de contaminación, potencial de corrosión del acero de refuerzo e identificación de daños.

Calidad del concreto. Existe una gran variación en la calidad del concreto dado que la resistencia a la compresión registrada varía en un rango entre 216 a 567 kg/cm<sup>2</sup>

Con un coeficiente de variación de 16.6%, los valores más bajos se encuentran en el cuerpo del muro del silo y los mayores en la base y cimentación.

Por otra parte, del módulo de elasticidad registra valores entre 85,795 y 282,967 kg/cm<sup>2</sup>, por lo que también se comprueba la variación en la calidad del concreto en los distintos puntos investigados.

Las pruebas con esclerómetro registran de igual manera una fuerte variación en la resistencia del concreto, sin embargo, lo que es consistente, es que el concreto es más resistente en la cimentación y cuanto más asciende hacia la superestructura, menor valor se obtiene en la resistencia.

Por lo anterior, se determina la conveniencia de considerar un valor conservador en la resistencia a la compresión del concreto.

Adherencia. Se registran valores en un rango de 10.1 a 29.1 kg/cm<sup>2</sup> que incluyen un coeficiente de variación de 39%, lo cual es representativo de una gran heterogeneidad en la superficie del concreto.

Carbonatación. Se determinó un avance probable de hasta 3 cm en el 65% de la superficie del concreto y hasta 4 cm en el 12.5%, se estima que el frente de carbonatación haya alcanzado al 9% del acero de refuerzo, lo anterior es significativo por la afectación que logra la carbonatación al acero de refuerzo con el paso de los años y el Silo tiene alrededor de 30 años de haber sido construido.

Contenido de cloruros. Se registro en tres puntos contaminación local a una profundidad de hasta 5 cm.

Contenido de sulfatos. Existe contenido insignificante que no implica riesgo.

Potencial de corrosión. Existen procesos de corrosión correlacionados con los frentes de carbonatación, particularmente en las zonas donde el acero presente recubrimientos de bajo espesor y en las zonas donde se presentan discontinuidades en el concreto, debidas a la presencia de juntas frías por deficiencia en el proceso constructivo durante el deslizado, a los taponamientos realizados en los apoyos de la estructura metálica que da apoyo a la losa tapa, a fisuras de hasta 1.25 mm de espesor y a un concreto de porosidad de media a baja se ha favorecido el ingreso de humedad que acelera la penetración del frente de carbonatación y en consecuencia la oxidación del acero de refuerzo.

Todo lo anterior establece un entorno favorable a la formación de frentes de carbonatación que ha iniciado un proceso de corrosión generalizado, porque es importante limitar el

avance del frente de carbonatación mediante la construcción de un recubrimiento superficial, aunado al saneamiento de los puntos donde se exhibe corrosión y desprendimiento de concreto, además de sellar las fisuras mayores de 0.3 mm por ambos lados del muro.

Todo lo anterior para detener el proceso de deterioro de la estructura y prolongar la vida económica del Silo.

### **3.4. Características del material almacenado.**

Para calcular las presiones del material almacenado en el Silo es necesario conocer en forma muy cercana las propiedades reales del material almacenado.

En la literatura técnica existen una gran cantidad de tablas que contienen listas de diferentes materiales con sus propiedades y parámetros para diseño de silos: densidad, ángulo de fricción interna, ángulo de fricción muro- material, todos usados para calcular las presiones y fricciones en silos.

Estas tablas sirven como una referencia para diseño, como se puede ver en la tabla 3.1, pero como todas están basadas en los nombres genéricos de los materiales, que pueden variar en forma muy importante debido a que sus propiedades dependen de: condiciones del material, contenido de la mezcla, tamaño de partículas, graduación, desgaste, y angulosidad de las partículas, condiciones de operación, presión de consolidación, tiempo de almacenamiento, temperatura, relación de llenado y cantidad de aireación del material.

Por lo que es recomendable que las propiedades de los materiales deberán obtenerse mediante pruebas de laboratorio o como mínimo de datos de materiales representativos de instalaciones similares.

El material que se almacena en el Silo es el llamado "Clinker"; que es el producto de calcinar en un horno rotatorio a 1,450°C la harina cruda que es la mezcla molida finamente de piedra caliza y arcillas que contienen los elementos químicos necesarios en cantidades correctas cuidadosamente dosificados de: cal, sílice, óxido de aluminio y óxido de hierro, esta mezcla sufre una reacción química que al ser enfriada violentamente mediante aire (hasta 120°C) se forman nódulos duros del tamaño de una nuez de un nuevo material que es conocido como Clinker.



Peso propio de elementos de mampostería 300 kg/m<sup>2</sup>

Peso propio para considerar equipos 250 kg/m<sup>2</sup>

Estos datos son aplicados para el cálculo de pesos de la estructura como se muestra en las tablas 3.2 y 3.3.

Los pesos y masas considerados para el análisis modal de la estructura son calculados automáticamente por el software y son incluidos como cargas concentradas en los nodos,

<b>Parte de la estructura del Silo</b>	<b>Peso (t)</b>
Cubierta plataformas y equipo	29.0
Cubierta losa de concreto	168.0
Cubierta armaduras y vigas de acero	60.0
Muros de mezanine a cubierta	828.0
Mezanine plataformas y equipo	60.0
Mezanine losa de concreto	205.0
Mezanine armaduras y vigas de acero	95.0
Muros en zona de presión	2,837.0
Mezanine losa de concreto	1,027.0
Muros bajo zona de presión	1,134.0
<b>Carga muerta total</b>	<b>6,443.0</b>

**Tabla 3.2 Carga muerta por peso propio de Silo**

<b>Parte de la cimentación del Silo</b>	<b>Peso (t)</b>
Cabezal de la cimentación	946.0
Pilas de cimentación	3,684.0
<b>Carga muerta total</b>	<b>4,630.0</b>

**Tabla 3.3 Carga muerta por peso propio de cimentación**

Cargas Vivas.

Serán consideradas como cargas vivas las producidas por ocupación y operación, en su valor total para combinaciones con cargas verticales, en su valor medio para combinaciones con cargas laterales y en su valor mínimo para análisis de la de cimentación.

Plataformas de concreto 1,000 kg/m<sup>2</sup>

Plataformas de acero 500 kg/m<sup>2</sup>



Se puede ver en la tabla 3.4 la aplicación de los datos indicados para calcular las cargas vivas que primordialmente son aplicadas en los elementos horizontales como losas.

Parte de la cimentación del Silo	Peso (t)	Peso reducido (t)
Cubierta losa de concreto	67.0	33.5
Mezanine losa de concreto	114.0	57.0
Losa de fondo del silo	25,000.0	20,000.0
<b>Carga viva total</b>	<b>25,181.0</b>	<b>20,090.5</b>

**Tabla 3.4 Carga viva y carga viva reducida**

Cargas de presión y fricción en muros del Silo.

Las cargas de presión y de fricción fueron consideradas de acuerdo a las recomendaciones del ACI 313 1997 mediante el uso básicamente de la teoría de Janssen, incluyendo el efecto dinámico sobre los muros producido por la descarga así como las cargas adicionales producidas por efecto de la excentricidad en la extracción.

El cálculo 3.1 de las fuerzas y empujes que se producen en los muros de silos se puede realizar en forma sistemática y automatizada mediante hojas de cálculo desarrolladas en Excel aplicando las formulas que a continuación se presentan para el cálculo de presiones y fricciones en los muros del Silo.

La presión vertical inicial de llenado a la profundidad y bajo la superficie del material almacenado se calcula de la siguiente forma:

$$q = \gamma R / \mu' \kappa [1 - e^{-\mu' \kappa Y/R}]$$

Donde la presión horizontal inicial de llenado a la profundidad y bajo la superficie del material almacenado es:

$$p = q \kappa$$

En donde la relación de la presión lateral  $\kappa$  es:

$$\kappa = 1 - \text{Sen}^2 \phi$$

La carga de la fricción vertical por unidad de longitud del perímetro del muro a la profundidad y bajo la superficie del material almacenado es:

$$V = (\gamma Y - q) R$$

En donde:

$$\gamma = \text{Densidad del material en kg/m}^3$$

$\mu'$  = Coeficiente de fricción entre el material y la pared del silo

$\phi$  = Angulo de fricción interna del material almacenado

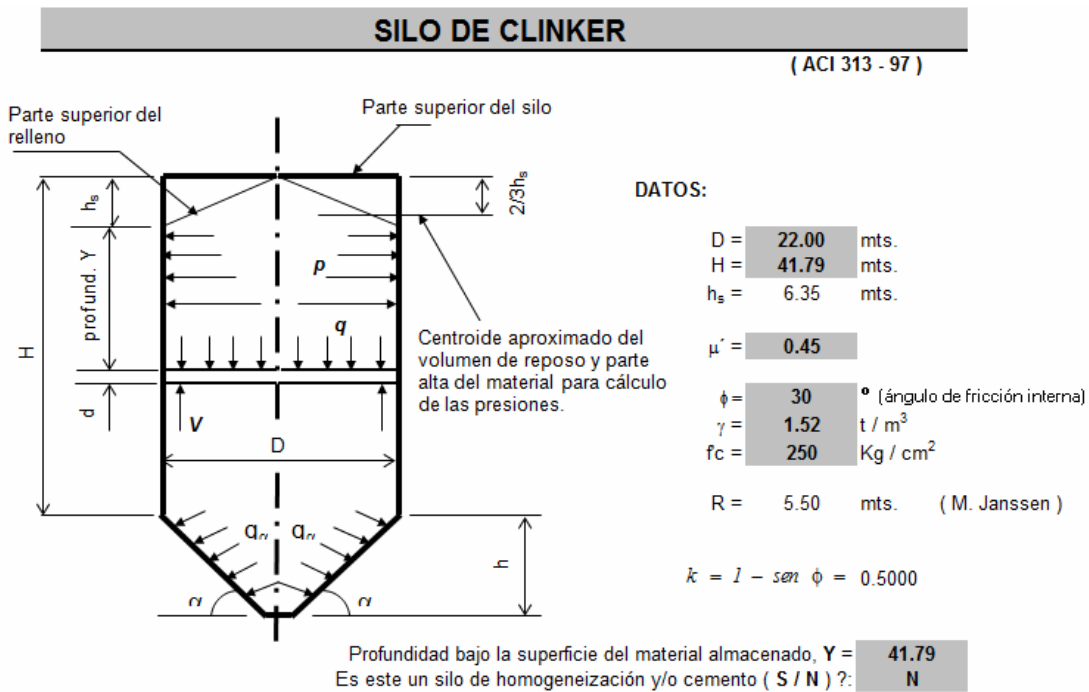
$C_d$  = Factor de amplificación dinámica por efecto de la descarga

En el cálculo de las presiones la combinación de diferentes valores de  $\mu$  y  $\kappa$  pueden ser usadas para obtener las cargas máximas y estas se muestran en la tabla 3.5.

ACCIONES	$\mu$	$\kappa$
Presión máxima vertical	$\mu_{min}$	$\kappa_{max}$
Presión máxima horizontal	$\mu_{min}$	$\kappa_{max}$
Fricción máxima vertical	$\mu_{max}$	$\kappa_{min}$

**Tabla 3.5 Datos de material para cálculo de empujes**

A continuación se muestra la mascara de entrada de datos de la hoja de cálculo desarrollada en Excel para el cálculo de; fuerzas de empuje horizontal, fuerzas verticales de fricción, calculo de refuerzo por tensión en muros y por efectos de temperatura, agrietamiento en muros producidos por la tensión, los datos se tomaron de la tabla 3.1.



Una vez que se ha realizado el cálculo automático de las cargas aplicadas en los muros

del silo, mediante la hoja de cálculo en Excel, como se puede ver en forma tabular se obtienen las presiones de empuje que incluyen el efecto de la excentricidad por la descarga y con estos datos se calcula el área de acero requerida para soportar estas cargas, también se incluye la cantidad de acero de refuerzo que se requiere por efecto de la diferencia de temperatura del material.

### TABLA RESUMEN DE RESULTADOS

SILO DE CLINKER

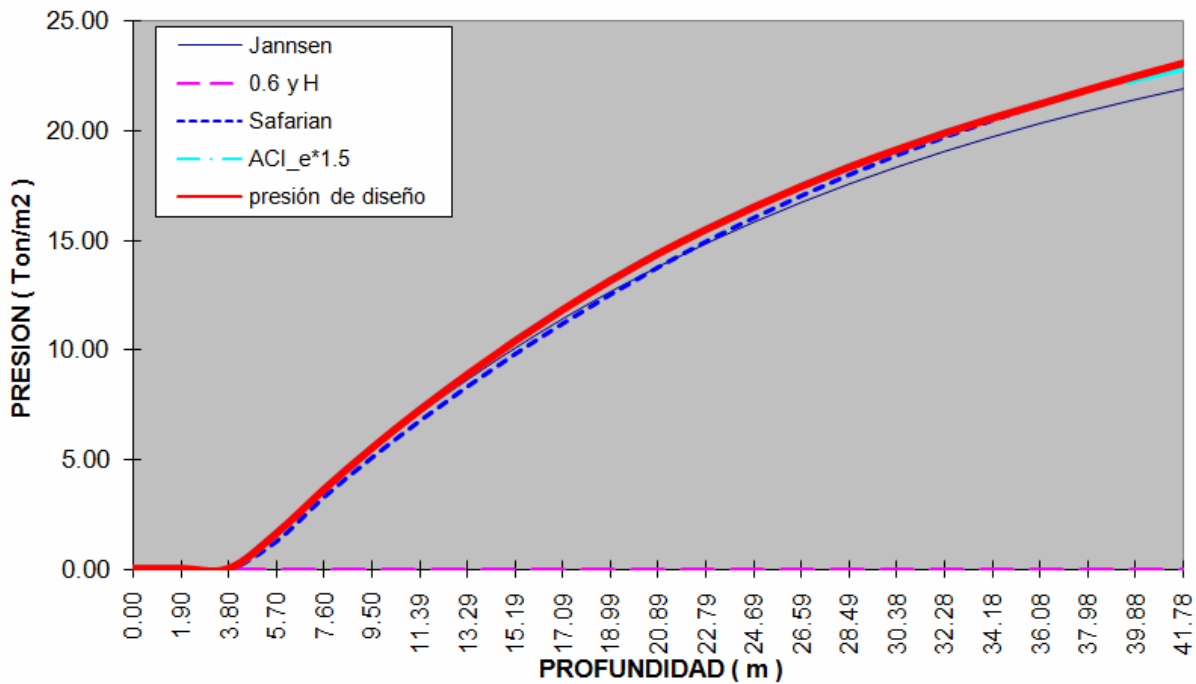
Factor para tabular resultados

1.899

PROF. ( mt )	PRESIONES ACTUANTES ( Ton / m <sup>2</sup> )					Presión de diseño. (Ton/m <sup>2</sup> )	AREAS DE ACERO					AGRIET AMIENT O ( mm )
	DIRECTA	POR DESCARGA EXCENTRICA			Secc. 4.4.5		Existente.	Req'd. por esfuerzos	Req'd por temperatura	Requerido Total	Dif. As	
	( Janssen )	Safarian	ACI 313	ACI 313 (e*1.5)	0.6 γ H *							
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.67	0.00	18.40	18.40	O.K.	
1.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.67	0.00	18.40	18.40	O.K.	
3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.67	0.00	18.40	18.40	O.K.	
5.70	1.60	1.29	1.61	1.61	0.00	1.61	50.67	8.38	18.40	26.78	O.K.	
7.60	3.56	3.31	3.60	3.62	0.00	3.62	50.67	18.85	18.40	37.25	O.K.	
9.50	5.38	5.10	5.46	5.50	0.00	5.50	79.17	28.64	18.40	47.04	O.K.	
11.39	7.06	6.77	7.18	7.24	0.00	7.24	79.17	37.70	18.40	56.10	O.K.	
13.29	8.61	8.34	8.78	8.86	0.00	8.86	79.17	46.14	18.40	64.54	O.K.	
15.19	10.05	9.82	10.28	10.39	0.00	10.39	79.17	54.10	18.40	72.50	O.K.	
17.09	11.38	11.21	11.67	11.82	0.00	11.82	105.56	61.55	18.40	79.95	O.K.	
18.99	12.61	12.53	12.97	13.15	0.00	13.15	105.56	68.48	18.40	86.88	O.K.	
20.89	13.75	13.77	14.16	14.37	0.00	14.37	105.56	74.83	18.40	93.23	O.K.	
22.79	14.81	14.94	15.25	15.47	0.00	15.47	105.56	80.56	18.40	98.96	O.K.	
24.69	15.79	16.02	16.26	16.49	0.00	16.49	105.56	85.87	18.40	104.27	O.K.	
26.59	16.69	17.03	17.19	17.44	0.00	17.44	105.56	90.82	18.40	109.22	3.66	
28.49	17.53	17.98	18.06	18.32	0.00	18.32	105.56	95.40	18.40	113.80	8.24	
30.38	18.30	18.87	18.85	19.12	0.00	19.12	105.56	99.57	18.40	117.97	12.41	
32.28	19.01	19.69	19.58	19.87	0.00	19.87	105.56	103.47	18.40	121.87	16.31	0.184
34.18	19.67	20.46	20.26	20.56	0.00	20.56	131.96	107.06	18.40	125.46	O.K.	
36.08	20.29	21.18	20.90	21.20	0.00	21.20	131.96	110.40	18.40	128.80	O.K.	
37.98	20.85	21.85	21.48	21.79	0.00	21.85	131.96	113.78	18.40	132.18	0.22	
39.88	21.37	22.47	22.01	22.33	0.00	22.47	131.96	117.01	18.40	135.41	3.45	0.131
41.78	21.86	23.06	22.52	22.85	0.00	23.06	131.96	120.08	18.40	138.48	6.52	0.135

También se obtienen mediante esta hoja de cálculo las graficas típicas que representan los empujes horizontales sobre los muros, producidos por el material que contiene el Silo y que en esta gráfica se puede observar el comportamiento de dichos empujes, así como el efecto de la sobre presión producida por la excentricidad de la descarga calculada mediante tres diferentes teorías y se considera la que produce el mayor valor de empujes esto lo podemos ver en la siguiente gráfica obtenida de la hoja de cálculo de Excel mencionada.

## PRESIONES EN PARED DEL SILO



### Cargas de Temperatura

Para el cálculo de estas cargas se usó lo recomendado en el ACI313 1997 en donde se debe obtener el diferencial de temperatura que será usado para el análisis. El software utilizado es capaz de calcular el comportamiento de los esfuerzos en los elementos usando el promedio de la distribución del gradiente del diferencial de temperatura. El coeficiente de expansión térmica considerado es de  $0.0000099/^\circ\text{C}$  para el concreto.

En donde el diferencial de temperatura entre la temperatura interior del muro y la del exterior se calcula como:

$$(T_i)_{\text{dis}} = (T_i - 44.5^\circ\text{C})$$

$$\Delta T = [(T_i)_{\text{dis}} - T_o] K_t$$

Donde el valor de  $K_t = [0.08 \text{ h} / (10.4 + 0.08 \text{ h})]$

$T_i$  = Temperatura del material caliente

$T_o$  = Temperatura del medio ambiente en invierno

$h$  = Espesor de la pared del silo en cm

Una vez que se ha calculado el diferencial de temperatura se determina la cantidad de acero de refuerzo por efectos de temperatura considerando que la forma del silo restringe el alabeo, por lo que el momento flexionante último por unidad de altura de muro se

calcula aplicando como se puede ver en el cálculo 3.4:

$$M_{xu} = M_{yu} = 1.4 (21 E_c h^2 \alpha_c \Delta T / (1 - \nu))$$

$E_c$  = Módulo de elasticidad del concreto en kg/cm<sup>2</sup>

$\alpha_c$  = Coeficiente térmico de expansión del concreto

$\nu$  = Relación de Poisson del concreto

Dentro de la hoja de cálculo de Excel mencionada también se calculan los efectos que produce la diferencia de temperaturas en la cara interior del Silo debida a la temperatura que trae el material al ser almacenado y la temperatura en la cara exterior principalmente producida por la temperatura del medio ambiente, estos efectos una vez calculados requieren del cálculo del área de acero necesaria adicional para poder tomarlos, que podemos ver en el siguiente cálculo.

Area de acero por temperatura :

Temp. del material almacenado (  $T_i$  ) = 120 grados  
 Temperatura ambiente (  $T_o$  ) = 19 grados

Espesor del muro = 40 cm.  
 $f_c$  = 250 Kg/cm<sup>2</sup>

$$M_{xu} = M_{yu} = 21 * 1.4 * E_c * h^2 * \alpha_c * \Delta T / (1 - \nu) = 2704172.03 \text{ Kg-cm}$$

Donde  $\Delta T = [T_{i,dis} - T_o] K_t = 13.56 \text{ grados.}$

Luego entonces  $A_{st} = 18.4 \text{ cm}^2 / \text{m muro}$

Area de acero total :

$$A_{s_{req.}} + A_{st} = 138.48 \text{ cm}^2 / \text{m muro}$$

### Cargas de Viento

Las cargas de viento se calcularon usando el "Manual de Diseño de Obras Civiles- Diseño por Viento" (CFE-1993). El valor de la velocidad regional de viento ( $V_R$ ) fue tomado como 153 km/hr.

La presión estática ( $p_z$ ) generada por el viento se incrementa por los efectos dinámicos como se indica en el mencionado manual.

Se tomo un factor de solidez de: 1.0 ( $C_p$ ) (área de edificio totalmente cerrado) siendo éste un valor adecuado para el cálculo de las fuerzas de viento.

En donde la velocidad de diseño ( $V_D$ ) en km/hr que se obtiene con la siguiente ecuación.

$$V_D = F_T F_\alpha V_R$$

En donde:

$F_T$  = Factor de topografía

$F_\alpha = F_C F_{rz}$  Factor de exposición

$F_C$  = Factor de tamaño

$F_{rz}$  = Factor de variación de velocidad con la altura

$$F_{rz} = 1.56 [10 / \delta]^\alpha \quad \text{si } z < 10 \text{ m}$$

$$F_{rz} = 1.56 [z / \delta]^\alpha \quad \text{si } 10 < z < \delta$$

$$F_{rz} = 1.56 \quad \text{si } z > \delta$$

$z$  = variación de altura

$\alpha$  = Variación del viento con la altura

$\delta$  = Altura de velocidad gradiente

Una vez calculada la velocidad de diseño, podemos obtener la presión dinámica ( $q_z$ )

$$q_z = 0.0048 G V_D^2 \text{ que podemos ver en el cálculo 3.4.}$$

$$G = (0.392 \Omega) / (273 + \tau)$$

$G$  = Factor de corrección por altura y temperatura

Para finalmente obtener la presión de diseño actuante en la estructura ( $p_z$ )

$$p_z = C_p q_z$$

$$p_z \text{ en kg/m}^2$$

Estas formulas también son sistematizadas para simplificar el cálculo de las constantes de viento con las que se obtendrán las fuerzas de empuje producidas por el viento sobre el cuerpo del silo y como sucede con las cargas por empuje de materiales las fuerzas de empuje de viento también varían con respecto a la altura del silo, por lo que se tienen que calcular valores de empuje para cada altura como puede verse en la tabla 3.6 que indica las fuerzas de viento aplicadas al silo.

En la siguiente hoja de Excel se calculan todas las constantes que varían en función de parámetros como la rugosidad del terreno, la topografía del terreno la altura sobre el nivel del mar, la altura gradiente, la clasificación de la estructura, la altura de la estructura, por lo que con tantos parámetros realizar el cálculo mediante una hoja de cálculo de Excel se

simplifica mucho como puede verse en la siguiente hoja de cálculo de Excel para obtener las principales constantes para el cálculo de las fuerzas de viento obtenidas en la tabla 3.6.

### EVALUACION DE LA PRESION DINAMICA DE BASE ( qz )

#### CLASIFICACION DE LA ESTRUCTURA

Según su importancia: Grupo : **B**  
 Según su respuesta ante la acción del viento: Tipo : **1**

#### DETERMINACION DE LA VELOCIDAD DE DISEÑO ( Vd = Ft . Fα . Vr )

Categoría del terreno según su rugosidad: Categoría : **2**  
 Clase de la estructura según su tamaño: Clase : **C**

Determinación de la velocidad regional ( Vr ) Vr = **153** Km/hr.

Determinación del factor de topografía local ( Ft ) Ft = **1**

Determinación del factor de exposición ( Fα = Fc . Frz ) Fc = **0.90**

Obtención de los valores de α y δ

αA =            αB =            αC = **0.138**                                    δ = **315**

Obtención del factor de rugosidad y altura, Frz                                    Z = **57.86** mts.                                    Se usa Ec. 2

$Frz = 1.56 \left[ \frac{10}{\delta} \right]^\alpha$	si $z \leq 10$	Ecuación 1	Frz = <b>0</b>	Fα = <b>0</b>
$Frz = 1.56 \left[ \frac{z}{\delta} \right]^\alpha$	si $10 < z < \delta$	Ecuación 2	Frz = <b>1.235</b>	Fα = <b>1.111</b>
$Frz = 1.56$	si $z \geq \delta$	Ecuación 3	Frz = <b>0</b>	Fα = <b>0</b>

#### Cálculo de la velocidad de diseño ( Vd )

Velocidad de diseño para Z ≤ 10                                    Vd = **0** Km/hr.

Velocidad de diseño para 10 < Z < δ                                    Vd = **170** Km/hr.

Velocidad de diseño para Z > δ                                    Vd = **0** Km/hr.

#### PRESION DINAMICA DE LA BASE ( qz = 0.0048 . G . Vd^2 )

Ω = **664.3**            τ = **19**                                    G = **0.892**

qz<sub>1</sub> = **0** Kg/m<sup>2</sup>                                    qz<sub>2</sub> = **123.7** Kg/m<sup>2</sup>                                    qz<sub>3</sub> = **0** Kg/m<sup>2</sup>

Elevación m	$h_i$ m	$\Phi_{\text{silos}}$ m	$q_z$ kg/m <sup>2</sup>	$q_{z\text{prom}}$ kg/m <sup>2</sup>	$C_p$	$p_z$ kg/m <sup>2</sup>	$A_z$ m <sup>2</sup>	$F_z$ kg	$\Sigma F_z$ kg
57.86			123.70						
	12.44	22.80		119.70	0.63	75.41	283.63	21,389	
45.42			115.70						21,389
	10.49	22.80		111.70	0.63	70.37	239.17	16,831	
34.93			107.70						38,220
	10.48	22.80		102.65	0.63	64.67	238.94	15,452	
24.45			97.60						53,672
	14.45	22.80		86.91	0.63	54.75	329.46	18,039	
10.00			76.22						71,711
	10.00	22.80		76.22	0.63	48.02	228.00	10,948	
0.00			76.22						82,659

**Tabla 3.6 Cálculo de fuerzas de viento en el Silo**

Cargas de sismo

Las cargas de sismo inducidas en el silo y el edificio anexo se calcularon de acuerdo al "Manual de Diseño de Obras Civiles-Diseño por Sismo" (CFE-1993), usando un espectro de respuesta elástico.

Dentro del cálculo de masas para la obtención de fuerzas sísmicas se considero el 80% del peso del material almacenado de acuerdo a la recomendación del ACI 313 97.

Para obtener las fuerzas sísmicas usaremos los factores obtenidos del manual.

Grupo estructural	B
Tipo de estructura	4
Factor de comportamiento sísmico	2
Zona sísmica	B
Tipo de suelo	II

Las cargas sísmicas que actúan en los silos dependen del periodo de la estructura (que es igual a 0.58 s). El espectro de diseño usado para determinar las fuerzas de sismo debe de dividirse entre el factor de comportamiento sísmico para tomar en consideración la ductilidad de la estructura.

Los parámetros del espectro de diseño sísmico correspondiente a las características sísmicas mencionadas son:

$$c = 0.30$$

$$T_a = 0.30 \text{ seg}$$

$$T_b = 1.50 \text{ seg } r=2/3$$



$$a_0 = 0.08$$

Partiendo de estos datos se calcularon las fuerzas y cortantes sísmicos mediante el método estático para la estructura mostrados en la tabla 3.7.

También en el estudio de mecánica de suelos se realizó un espectro de sitio del que se obtuvieron las propiedades:

$$c = 0.26$$

$$T_a = 0.10 \text{ seg}$$

$$T_b = 1.00 \text{ seg } r=2/3$$

$$a_0 = 0.10$$

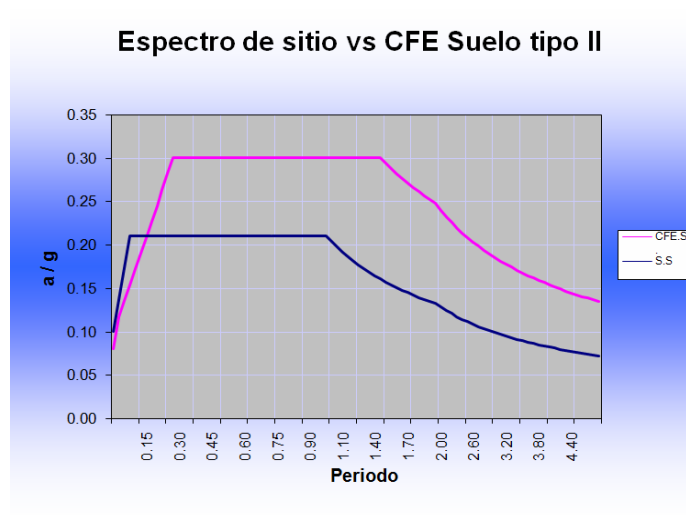
En donde las ordenadas del espectro de aceleraciones para diseño sísmico, son expresadas como una fracción de la aceleración de la gravedad y están dadas por la aplicación de las expresiones:

$$a = a_0 + [c - a_0] T_e / T_a; \text{ si } T_e < T_a$$

$$a = c \quad ; \text{ si } T_a < T_e < T_b$$

$$a = c [T_b / T_e] r \quad ; \text{ si } T_e > T_b$$

Ambos espectros se pueden ver en la figura 3.5.



**Figura 3.5 Espectro de sitio vs espectro CFE suelo tipo II**

Para fines de diseño, será necesario tener en cuenta el comportamiento inelástico de la estructura, esto se toma en consideración dividiendo los valores de las ordenadas espectrales entre el factor de reducción  $Q'$  a fin de obtener fuerzas sísmicas reducidas por ductilidad, este factor se calcula cómo sigue.

$$Q' = 1 + (Q - 1) T_e / T_a \quad ; \text{ si } T_e < T_a$$

$$Q' = Q \quad ; \text{ si } T_e > T_a$$

<b>Obtencion de cortantes sismicos metodo estatico</b>					
$h_i$ m	$\Sigma h_i$ m	$W_i$ t	$W_i \Sigma h_i / H$ t	$F_i$ t	$V_i$ t
	61.00	291.00	291.00	197.32	
6.20					197.32
	54.80	828.00	743.84	504.39	
6.20					701.71
	48.60	417.00	332.23	225.28	
20.99					926.99
	27.61	2,837.00	1,284.09	870.72	
4.19					1,797.71
	23.42	20,000.00	7,678.69	5,206.79	
16.80					7,004.50
	6.62	1,027.00	111.45	75.58	
2.32					7,080.08
	4.30	1,134.00	79.94	54.20	
3.30					7,134.28
	1.00	946.00	15.51	10.52	
1.00					<b>7,144.80</b>
		<b>27,480.00</b>	<b>10,536.75</b>		
<b>61.00</b>					

Cortante en la base

$$V_b = 7,144.80 \text{ t}$$

Relacion  $V_b / V_{sup}$

$$0.68$$

**Tabla 3.7 Cálculo de fuerzas de sismo estático en el Silo**

El software para análisis y diseño usado, cuenta con la capacidad de realizar análisis dinámicos que incluye la solución al problema de vibraciones libres (problema de valores característicos), así como algunos tipos de análisis de vibraciones con dos tipos de excitación:

El primero es usando el espectro de respuesta, el segundo es considerando el análisis lineal paso a paso usando temblores específicos, aunque ambos usan métodos de superposición modal en los que al excitar a la estructura, cada modo de la misma responde como un sistema independiente, en donde la respuesta total del edificio será la combinación de las respuestas independientes de cada uno de los modos multiplicadas por un factor que se le denomina coeficiente de participación.

Los resultados de las respuestas dinámicas se presentan como; deformaciones de la estructura (desplazamientos), velocidades o aceleraciones y como fuerzas o esfuerzos internos de los elementos.

Las frecuencias naturales, periodos y modos de vibrar de la estructura son los parámetros primarios de respuesta dinámica de la estructura ante cargas dinámicas, siendo estos valores funciones directas de la rigidez y distribución de masas de la estructura, debiendo ser muy cuidadosos en la aplicación de las masas en el modelo.

Se usará como método de análisis dinámico:

El análisis dinámico modal espectral en el que se incluye, como ya se menciono, el efecto de todos los modos naturales de vibración con un periodo mayor o igual a 0.40 seg, pero en ningún caso podrán considerarse menos de los tres primeros modos de traslación en cada dirección de análisis.

En donde las masas de una estructura de varios grados de libertad sometida a excitación en su base sufren movimientos que están gobernados por la ecuación matricial de equilibrio dinámico.

$$[m] \{ \ddot{x} \} + [c] \{ \dot{x} \} + [k] \{ x \} = \{ -x_0(t) \} [m]$$

$[m]$ ,  $[c]$ ,  $[k]$  Matrices de masa, amortiguamiento y rigidez

$\{x\}$  Vector de desplazamientos relativos a la base de la estructura

$\{-x_0(t)\}$  Vector de aceleraciones vs tiempo del terreno

De acuerdo al análisis modal, la solución de la ecuación anterior en cualquier instante se puede expresar como la combinación de las respuestas debidas a la participación de cada uno de los modos naturales de vibración, por lo que la respuesta total es:

$$x(t) = \sum_{n=1}^N C_n D_n(t) Z_n$$

$N$  = Número de grados de libertad de la estructura

$D_n$  = Desplazamiento de un oscilador simple, con frecuencia natural igual a la del modo  $n$  sujeto a la misma aceleración del terreno

$Z_n$  = El  $n$ -ésimo modo natural que se obtiene al resolver el problema de valores característicos definido por la ecuación matricial homogénea

$$[[k] \omega_n^2 [m]] Z_n$$

$\omega_n$  = La  $n$ -ésima frecuencia natural de vibrar

$$C_n = Z_n^T [m] / Z_n^T [m] Z_n$$

$C_n$  = Coeficiente de participación que define la escala a la que intervienen el modo  $n$  en

la respuesta.

Para fines de diseño es importante obtener solo los desplazamientos máximos de la estructura que es la respuesta modal máxima.

$$X_n = C_n D [T_n] Z_n$$

$T_n = 2 \pi / \omega_n$  Es el n-esimo periodo natural de vibración

$D [T_n]$  La ordenada del espectro de diseño correspondiente a ese periodo

$$D [T_n] = A [T_n] / \omega_n^2$$

$A [T_n] = a [T_n] / g$  La ordenada del espectro de diseño de aceleraciones

En donde queda la n-esima respuesta modal máxima en términos de aceleración espectral y reducida por ductilidad.

$$X_n = (C_n / \omega_n^2) (a [T_n] / g / Q' [T_n]) Z_n$$

Las fuerzas sísmicas que se producen al vibrar la estructura en su n-esimo modo son:

$$P_n = x_n [m]$$

Las respuestas modales no ocurren simultáneamente, estas se combinan de acuerdo distintos criterios que dependerán de algunos parámetros. En este caso se usará el criterio de la raíz cuadrada de la suma de cuadrados (SRSS), usado cuando las frecuencias de los modos naturales son cercanos entre sí con una diferencia máxima de 5%.

Combinaciones de carga.

Las combinaciones de carga mostradas fueron usadas durante el análisis del silo. Las combinaciones de carga siguieron las recomendaciones del ACI 318-99. Las fuerzas de viento obtenidas no fueron usadas en las combinaciones de carga, ya que en la verificación inicial se encontró que la fuerza total en la base inducida por el viento es mucho menor que la fuerza total en la base producida por el sismo.

$$U = 1.4 D + 1.7 L + 1.4 T + 1.7 Pr + 1.7 Fr$$

$$U = 1.05 D + 1.275 L + 1.05 T + 1.275 Pr + 1.275 Fr + 1.40 Sx + 0.42 Sy$$

$$U = 1.05 D + 1.275 L + 1.05 T + 1.275 Pr + 1.275 Fr + 1.40 Sy + 0.42 Sx$$

$$U = 0.9 D + 0.9 T + 0.9 Fr + 1.40 Sx + 0.42 Sy$$

$$U = 0.9 D + 0.9 T + 0.9 Fr + 1.40 Sy + 0.42 Sx$$

En esta tabla:

D = Carga muerta

L = Carga viva

T = Carga de temperatura

Pr = Carga de presión

Fr = Carga de fricción

Sx = Carga de sismo en dirección X

Sy = Carga de sismo en dirección Y

### **3.6. Modelo y consideraciones para el análisis estructural.**

Para realizar el cálculo y evaluación de la estructura del Silo se uso un modelo estructural de elementos finitos en tres dimensiones, en el que la cimentación se modelo mediante una malla de elementos placa y se usan dos opciones de apoyo, uno empotrando los nodos inferiores del silo y otro colocando apoyos articulados en los nodos en que existen pilas, los muros también se modelaron mediante una malla de elementos placa o cascarón, para el modelado de la losa de fondo se uso también una malla de elementos placa apoyados perimetralmente en los muros, para el modelado de cubiertas se usaron elementos barra y para las losas se usaron elementos placa apoyados perimetralmente en los elementos barra, véase la figura 3.6.

El software usado es el Staad-Pro, que es un programa de propósito general que incluye el análisis estructural con base en el uso de elementos finitos, este programa ofrece una gran versatilidad para desarrollar una gran variedad de análisis de esfuerzos, de los que se pueden obtener desplazamientos, reacciones y fuerzas en ejes globales para todos los nodos de la estructura, para los elementos barra se obtienen elementos mecánicos como fuerza axial, fuerza cortante, momentos de flexión y torsión, todos ellos en coordenadas locales; para los elementos placa, cascaron o sólidos se obtienen contornos de esfuerzos y fuerzas nodales para cada elemento.

También con este programa se pueden desarrollar análisis de tipo dinámico modal para conocer el comportamiento dinámico de la estructura, mediante un modelo de masas concentradas en los nodos.

Como ya fue mencionado, analizaremos dos modelos en los que: en el primero se empotraran los nodos inferiores del cuerpo del silo, en el otro se usarán soportes articulados en la ubicación de las pilas.

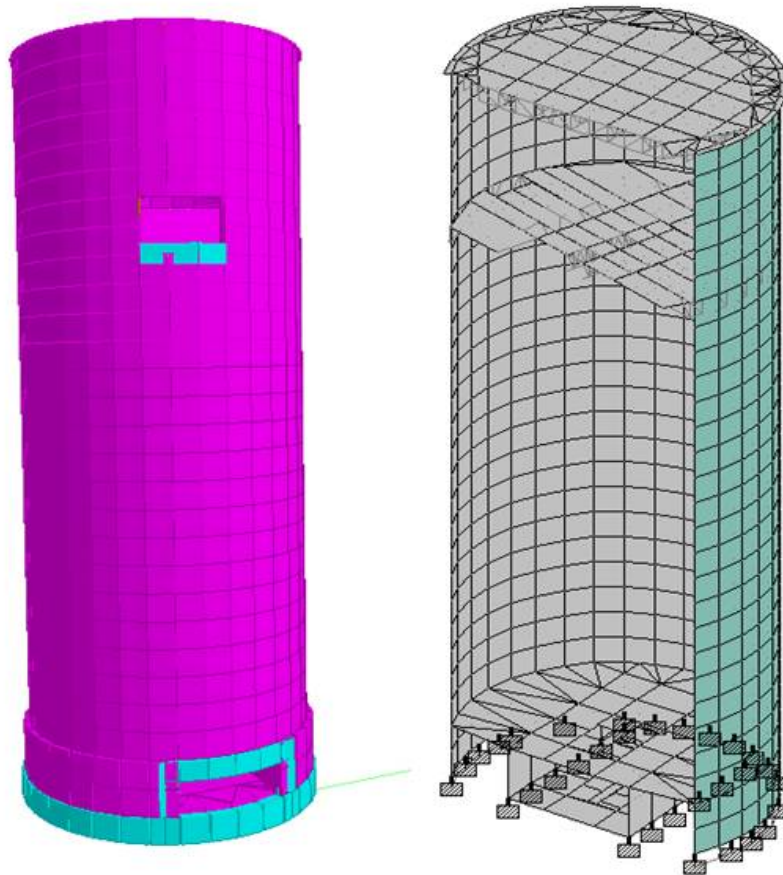
Dentro de las principales consideraciones hechas para la construcción del modelo tenemos tres consideraciones importantes:

En la primera se consideran los muros del silo no agrietados, con los apoyos en la base del silo empotrados.

En la segunda consideración se suponen los muros agrietados en un porcentaje del 50% de la sección transversal del muro y los apoyos articulados en los lugares de localización de pilas.

Para ambas condiciones, en la obtención de fuerzas sísmicas se usaron también las consideraciones del espectro de diseño combinando los resultados de los diez primeros modos, usando el procedimiento de SRRS.

Para las cargas laterales se calcularon también los efectos de segundo orden P- $\Delta$ .



**Figura 3.6 Modelo matemático del Silo en el software Staad-Pro**

Proyecto de rehabilitación de un Silo de concreto  
reforzado para almacenamiento de Clinker

CAPÍTULO 4

# **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

## **Capítulo 4 Análisis de Resultados.**

En este capítulo se presentan los resultados del análisis del silo en su estado actual, de daño y deterioro de acuerdo a los estudios; de evaluación estructural y diagnóstico.

Los puntos importantes que se revisan son; si el acero de refuerzo horizontal y el acero de refuerzo vertical son adecuados para resistir la combinación del empuje horizontal producida por el material y los efectos del sismo en la zona de presión, si la zona de muros bajo la zona de presión está capacitada para resistir la combinación de fuerzas de sismo y las fuerzas verticales del peso de material, así como la capacidad resistente de la cimentación y el suelo.

La capacidad de los elementos de resistir adecuadamente las cargas aplicadas será evaluada mediante la comparación de las cargas aplicadas (demandas) contra la capacidad resistente de los elementos (capacidades). Esto, si la relación demanda-capacidad (RCD) es menor de uno, el elemento revisado es adecuado para resistir las cargas aplicadas.

### **4.1. Comportamiento global de la estructura.**

Comportamiento del silo por cargas de empuje y fricción del material almacenado.

Primero se revisará el silo para el comportamiento que presenta debido a las fuerzas de empuje de acuerdo a lo establecido en el ACI 313-97 que es la revisión del silo en la zona de carga para las fuerzas de fricción vertical y de empuje horizontal producidas por el material almacenado considerando, todo esto calculado en una hoja de Excel como ejemplo se presentan las mascararas con los datos y resultados obtenidos:

- Empuje estático del material.
- Sobrecarga producida por la acción dinámica en la descarga del material del silo.
- Sobrecarga producida por el efecto de excentricidad al descargar el material del silo.
- Sobrecarga producida por las diferencias de temperatura entre el material almacenado y la temperatura ambiente en la cara exterior del silo.

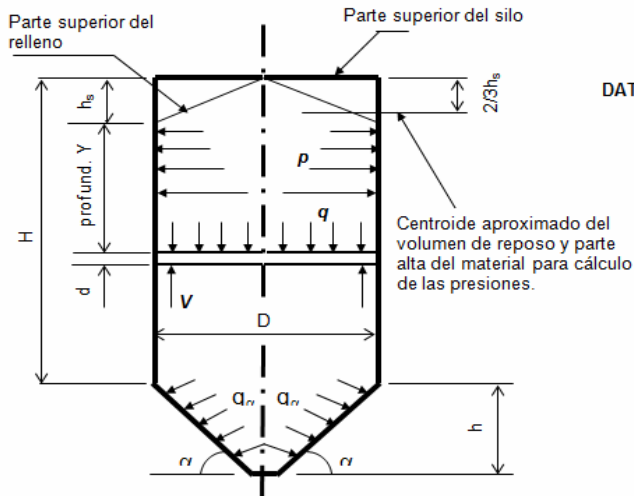
Como se puede ver en los resultados de la revisión encontramos que el espesor del muro es menor que el recomendable, calculado con la fórmula preliminar  $79 \text{ cm} > 40 \text{ cm}$ , en los resultados se encuentra que existe una deficiencia de acero de refuerzo en el primer tercio inferior del silo, también se puede ver en los resultados obtenidos que los agrietamientos



también son muy cercanos a los permisibles  $0.19 \text{ mm} = 0.20 \text{ mm}$  que es el valor permisible.

## SILO DE CLINKER PLANTA ORIZABA

( ACI 313 - 97 )



**DATOS:**

- D = 22.00 mts.
- H = 41.79 mts.
- $h_s = 6.35$  mts.
- $\mu' = 0.45$
- $\phi = 30^\circ$  (ángulo de fricción interna)
- $\gamma = 1.52$  t / m<sup>3</sup>
- $f_c = 250$  Kg / cm<sup>2</sup>
- R = 5.50 mts. ( M. Janssen )

$$k = 1 - \text{sen } \phi = 0.5000$$

Profundidad bajo la superficie del material almacenado, Y = **41.79**  
Es este un silo de homogeneización y/o cemento ( S / N )?: **N**

**1.- PRESION EN PAREDES DEL SILO POR LLENADO INICIAL ( Método de Janssen - Sección 4.4.2.1 ) :**

1.1.- Presión unitaria estática vertical (  $q$  ) a una profundidad "Y" bajo la superficie del material almacenado.

$$q = \frac{\gamma R}{\mu' k} [1 - e^{-\mu' k Y / R}] = 29.15 \text{ Ton / m}^2$$

1.2.- Presión unitaria estática lateral (  $p$  ) a profundidad "Y"

$$p = qk = 14.57 \text{ Ton / m}^2$$

1.3.- Fuerza vertical de fricción (  $V$  ) por unidad de ancho del perímetro del muro en un muro arriba de la profundidad "Y"

$$V = (\gamma Y - q) R = 153.47 \text{ Ton / m}$$

1.4.- Presiones de diseño.

Se obtendrá multiplicando  $p$  por un factor de sobrepresión de: 1.5 ( Sección 4.4.2.2 )  
( La cual corresponde a un patrón de flujo concéntrico )

PRESION VERTICAL ( $q$ )	<b>29.15</b>	( Ton / m <sup>2</sup> )
PRESION LATERAL ( $p_d$ )	<b>21.86</b>	( Ton / m <sup>2</sup> )
FUERZA DE FRICCION ( $V$ )	<b>153.47</b>	( Ton / m )

**2.- REVISION DEL ESPESOR DEL MURO :**

El espesor del muro será evaluado a la profundidad seleccionada ( Y ) :

$$h_{m\text{m}\text{r}} = \left[ \frac{mE_s + f_s - n f_{c,ten}}{f_s f_{c,ten}} \right] p D / 2 = 79.00 \text{ cm} > \text{ que el espesor mínimo de 15 cm, por lo tanto SE ACEPTA LA SECCION}$$

Donde :

$$m = 0.0003$$

$$f_{c,ten} = 0.1 f_c = 25 \text{ Kg / cm}^2$$

3.- PRESION ADICIONAL POR DESCARGA EXCENTRICA.

Tiene este silo una descarga excéntrica ( S / N )? **S**  
Entonces introduce el valor de la excentricidad ( e )

3.1.- Efectos por descarga excéntrica. (Método de Safarian)

excentricidad ( e ) = **2.02** mt. radio del silo imaginario  $r_i = r_s + e = 13.02$  mt.

Luego la presión estática lateral (p) para un silo de diá. imaginario D = 26.036 m. es  $p_i = 15.77$  Ton/m<sup>2</sup>

luego entonces  $p_{ecc} = p_i - p_k = 1.20$  Ton/m<sup>2</sup>

La presión lateral de diseño (  $p_d$  ) es :

$$p_d = C_d p + \frac{Y}{H-D} (p_{ecc}) = \boxed{23.06} \text{ Ton/m}^2$$

La presión actúa uniforme en esta sección Y > ( H-D )

NOTA:

La relación Y/H-D, se aplica solo cuando la presión calculada se encuentra dentro del rango " H-D ".

3.2.- Efectos por descarga excéntrica. ( ACI 313 ).

$$p_d = C_d p_{st} + p_{ecc} = \boxed{22.52} \text{ Ton/m}^2$$

considerando una excentricidad ( e ) de 2.018 m. tenemos una relación  $e / r = 0.18$

Donde  $p_{ecc} = 0.25 p_{st} \left( \frac{e}{r} \right) = 0.66$  Ton/m<sup>2</sup> La presión actúa uniforme en esta sección Y > ( H-D )

4.- TABULACION DE RESULTADOS:

PROF. ( mt )	PRESION DE DISEÑO ( Ton/m <sup>2</sup> )	PRES. DIS. EXCENTRICA (Safarian) Ton/m <sup>2</sup>	PRES. DIS. EXCENTRICA (ACI 313) Ton/m <sup>2</sup>	PRES. DIS. EXCENTRICA (ACI 313: e*1.5) Ton/m <sup>2</sup>
41.79	21.86	23.06	22.52	22.85

Este no es un silo de homo. / cemento, por lo tanto se omite la revisión de la siguiente condición

Presión adicional en los silos de homogeneización (  $p_{sh} = 0.6 \gamma H$  )

$$p_{sh} = \boxed{0.00} \text{ Ton/m}^2$$

5.- CALCULO DE LAS FUERZAS ULTIMAS Y AREAS DE ACERO:

El cálculo se hará tomando como base el método de Jenssen **J** y con  $p_d = 23.06$  Ton/m<sup>2</sup>

$$F_u = p_d (1.7D/2) = 431.220 \text{ Ton / m muro}$$

El área de acero requerida será

$$A_{s_{reqd}} = F_u / (.95 \phi f_y) = 120.08 \text{ cm}^2 / \text{ m muro}$$

Area de acero por temperatura :

Temp. del material almacenado ( Ti ) = **120** grados

Temperatura ambiente ( To ) = **19** grados

Espesor del muro = **40** cm.

$f_c = 250$  Kg/cm<sup>2</sup>

$$M_{x,u} = M_{y,u} = 21 * 1.4 * E_c * h^2 * \alpha_c * \Delta T / (1 - \nu) = 2704172.03 \text{ Kg-cm}$$

Donde  $\Delta T = [T_{i,dis} - T_o] K_t = 13.56$  grados.

Luego entonces  $A_{st} = 18.4$  cm<sup>2</sup> / m muro

Area de acero total :

$$A_{s_{reqd}} + A_{st} = \boxed{138.48} \text{ cm}^2 / \text{ m muro}$$

Para la evaluación de los agrietamientos. Es este un silo Nuevo ó Existente ( N / E )? **E**

## TABLA RESUMEN DE RESULTADOS

SILO DE CLINKER PLANTA ORIZABA

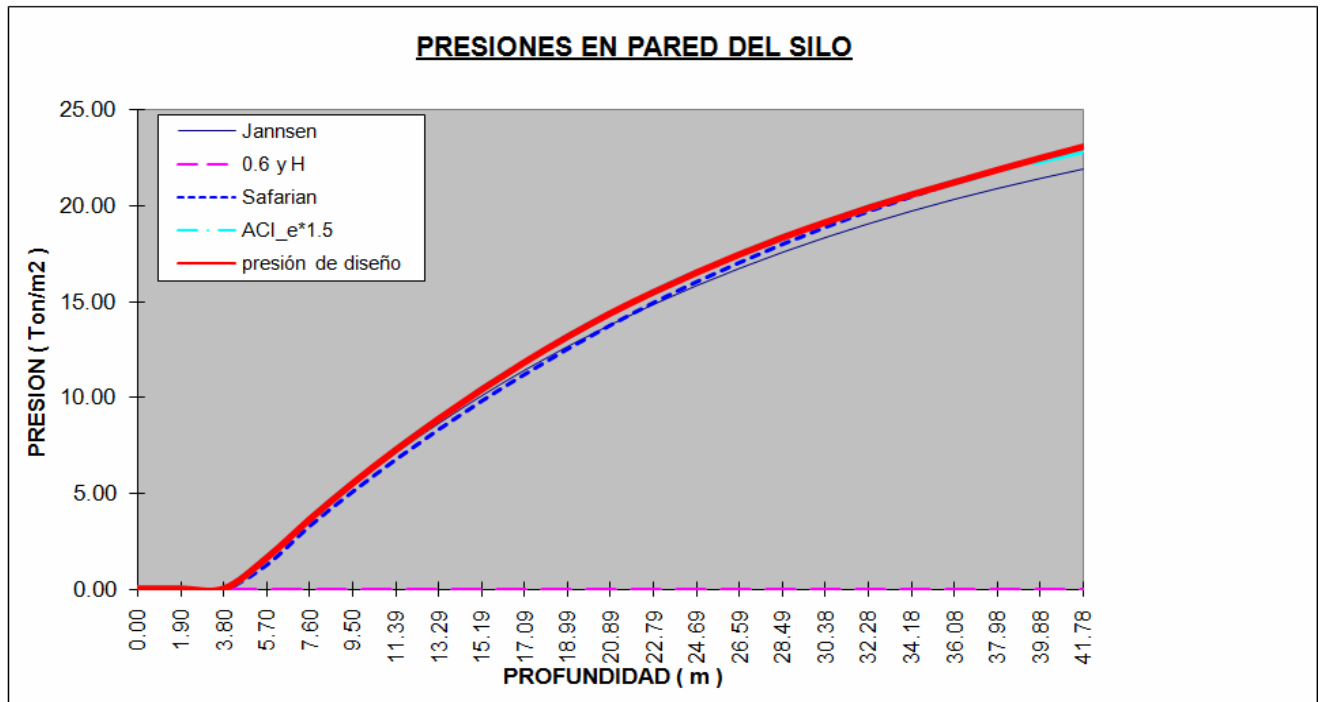
Factor para tabular resultados

1.899

PROF. ( mt )	PRESIONES ACTUANTES ( Ton / m <sup>2</sup> )					Presión de diseño. (Ton/m <sup>2</sup> )	AREAS DE ACERO					AGRIET AMIENT Ø ( mm )
	DIRECTA	POR DESCARGA EXCENTRICA			Secc. 4.4.5		Existente.	Req'd. por esfuerzos	Req'd. por temperatura	Requerido Total	Dif. As	
	( Janssen )	Safarian	ACI 313	ACI 313 (e*1.5)	0.6 γ H *							
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.67	0.00	18.40	18.40	O.K.	
1.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.67	0.00	18.40	18.40	O.K.	
3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.67	0.00	18.40	18.40	O.K.	
5.70	1.60	1.29	1.61	1.61	0.00	1.61	50.67	8.38	18.40	26.78	O.K.	
7.60	3.56	3.31	3.60	3.62	0.00	3.62	50.67	18.85	18.40	37.25	O.K.	
9.50	5.38	5.10	5.46	5.50	0.00	5.50	79.17	28.64	18.40	47.04	O.K.	
11.39	7.06	6.77	7.18	7.24	0.00	7.24	79.17	37.70	18.40	56.10	O.K.	
13.29	8.61	8.34	8.78	8.86	0.00	8.86	79.17	46.14	18.40	64.54	O.K.	
15.19	10.05	9.82	10.28	10.39	0.00	10.39	79.17	54.10	18.40	72.50	O.K.	
17.09	11.38	11.21	11.67	11.82	0.00	11.82	105.56	61.55	18.40	79.95	O.K.	
18.99	12.61	12.53	12.97	13.15	0.00	13.15	105.56	68.48	18.40	86.88	O.K.	
20.89	13.75	13.77	14.16	14.37	0.00	14.37	105.56	74.83	18.40	93.23	O.K.	
22.79	14.81	14.94	15.25	15.47	0.00	15.47	105.56	80.56	18.40	98.96	O.K.	
24.69	15.79	16.02	16.26	16.49	0.00	16.49	105.56	85.87	18.40	104.27	O.K.	
26.59	16.69	17.03	17.19	17.44	0.00	17.44	105.56	90.82	18.40	109.22	3.66	
28.49	17.53	17.98	18.06	18.32	0.00	18.32	105.56	95.40	18.40	113.80	8.24	
30.38	18.30	18.87	18.85	19.12	0.00	19.12	105.56	99.57	18.40	117.97	12.41	
32.28	19.01	19.69	19.58	19.87	0.00	19.87	105.56	103.47	18.40	121.87	16.31	0.184
34.18	19.67	20.46	20.26	20.56	0.00	20.56	131.96	107.06	18.40	125.46	O.K.	
36.08	20.29	21.18	20.90	21.20	0.00	21.20	131.96	110.40	18.40	128.80	O.K.	
37.98	20.85	21.85	21.48	21.79	0.00	21.85	131.96	113.78	18.40	132.18	0.22	
39.88	21.37	22.47	22.01	22.33	0.00	22.47	131.96	117.01	18.40	135.41	3.45	0.131
41.78	21.86	23.06	22.52	22.85	0.00	23.06	131.96	120.08	18.40	138.48	6.52	0.135

\* Altura del material aereado respecto al fondo del silo =   mts.

Agrietamiento permisible = 0.250 mm



## REVISION DEL ANCHO DE GRIETAS EN MUROS DEL SILO

### 1.- CONSIDERACIONES:

1.1.- Para la revisión del ancho de las grietas se supone que los muros están sujetos a tensión pura y que el refuerzo se localiza en el **centro del mismo**.

1.2.- El análisis de las grietas se realiza para una franja de muro de 1 mt. de altura.

### 2.- DATOS

$$\left. \begin{aligned} \text{espesor del muro} &= 40.00 \text{ cms.} \\ \beta &= 0.70 \\ A_s &= 131.96 \text{ cm}^2 \quad (A_v \cdot 100/s) \\ f_c &= 250 \text{ Kg/cm}^2 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Con varillas \# } & \mathbf{10} \text{ espaciadas } \mathbf{12} \text{ cms.} \\ A &= 4000 \text{ cm}^2/\text{unidad de ancho} \\ \Sigma o &= 179.82 \text{ cm.} \end{aligned} \right\}$$

$$f'_t = 1.19 \sqrt{f'_c} = 18.82 \text{ Kg/cm}^2$$

Donde:

$\Sigma o$  = suma de los perímetros de las varillas horizontales por unidad de altura del muro

$\beta$  = (0.7 para varillas corrugadas, 1.0 para varillas lisas)

### 3.- ANALISIS

2.1.- Se revisa el ancho de la grieta para una profundidad de  $Y = 41.79$  mts.

$$T_{y_{tot}} = p_{dis} \cdot \frac{D}{2} = 253660.00 \text{ Kg @ m.} \quad T_{y_{st}} = p \cdot \frac{D}{2} = 160325.00 \text{ Kg @ m.}$$

$$S_{cr} = \frac{A}{\Sigma o} \cdot \beta = 15.57 \text{ cms.}$$

2.2.- Revisando para las cargas a corto plazo ( carga total )

$$\psi_1 = 1 - 0.7 \left[ \frac{0.8 \cdot A \cdot f'_t}{T_{y_{tot}}} \right] = 0.83 > 0.3 \text{ entonces } \psi_1 = 0.83$$

$$f_s = \frac{T_{y_{tot}}}{A_s} = 1922.25 \text{ Kg/cm}^2. \quad w_1 = \frac{\psi_1 \cdot S_{cr} \cdot f_s}{E_s} = 0.122 \text{ mm.}$$

2.3.- Revisando para las cargas a corto plazo ( carga estática )

$$\psi_2 = 1 - 0.7 \left[ \frac{0.8 \cdot A \cdot f'_t}{T_{y_{st}}} \right] = 0.74 > 0.3 \text{ entonces } \psi_2 = 0.74$$

$$f_s = \frac{T_{y_{st}}}{A_s} = 1214.95 \quad w_2 = \frac{\psi_2 \cdot S_{cr} \cdot f_s}{E_s} = 0.068 \text{ mm.}$$

2.4.- Revisando para las cargas a largo plazo ( carga estática )

$$\psi_3 = 1 - 0.35 \left[ \frac{0.8 \cdot A \cdot f'_t}{T_{y_{st}}} \right] = 0.87 > 0.65 \text{ entonces } \psi_3 = 0.87$$

$$f_s = \frac{T_{y_{st}}}{A_s} = 1214.95 \quad w_3 = \frac{\psi_3 \cdot S_{cr} \cdot f_s}{E_s} = 0.081 \text{ mm.}$$

2.5.- Ancho total de la grieta:

$$w_{cr} = w_1 - w_2 + w_3 = 0.13460 \text{ mm.} < \text{ límite máximo aceptado} = 0.2000 \text{ mm.}$$

**por lo tanto la sección es adecuada por agrietamiento**

A continuación se presentan las propiedades modales, desplazamientos globales y fuerzas cortantes sísmicas de la estructura.

Los periodos fundamentales del silo se presentan en la tabla 4.1

Modo	Dirección	Periodo (seg)
1	Traslación sentido X	0.578
2	Traslación sentido Z	0.543
5	Distorsion cilindrica	0.440
10	Rotación	0.263

**Tabla 4.1 Periodos y modos de vibrar del silo del análisis dinámico**

Los desplazamientos máximos del silo se muestran en la tabla 4.2 y son menores que los permisibles.

Dirección	Desplazamiento elástico en zona superior ( m )	Desplazamiento inelástico en zona superior <sup>[1]</sup> ( m )	Relación de desplazamiento calculado <sup>[2]</sup> (%)	Desplazamiento permisible (%)
Traslación sentido X	0.029	0.058	0.098	1.2
Traslación sentido Z	0.026	0.052	0.088	1.2

[ 1 ] Desplazamiento inelastico = Desplazamiento elastico x Q

[ 2 ] Relacion de desplazamiento = Desplazamiento en zona superior / Hsilo

Q = 2.0

H<sub>silo</sub> = 59.00 m

**Tabla 4.2 Desplazamientos máximos en la cubierta del Silo**

En la tabla 4.3 se resumen las fuerzas cortantes sísmicas en donde se puede ver que las fuerzas calculadas con el procedimiento dinámico son menores al 75% de las calculadas por el método estático por lo que se diseñará con las calculadas por el método estático

Dirección	Fuerza cortante en la base método estático ( V <sub>b</sub> ) ton	Fuerza cortante en la base 75% método estático ( V <sub>b</sub> ) ton	Fuerza cortante en la base método dinámico ( V <sub>b</sub> ) ton
Traslación sentido X	7,247.18	5,435.39	4,196.35
Traslación sentido Z	7,247.18	5,435.39	4,312.84

Se diseñará considerando la fuerza sísmica obtenida con el método dinámico modificando las ordenadas espectrales por la relación  $0.75 V_{be}/V_{bd}$

**Tabla 4.3 Fuerza cortante sísmica en la base del Silo**

## 4.2. Comportamiento de los elementos de la estructura.

Fuerzas horizontales – acero de refuerzo horizontal en los muros del silo.

El acero de refuerzo en los muros del silo debe ser el suficiente para resistir la acción combinada de cargas gravitacionales, cargas de presión, cargas de fricción cargas de temperatura y de sismo.

Estas cargas producen esfuerzos anulares de tensión, esfuerzos de flexión, y esfuerzos cortantes en los muros.

Los esfuerzos anulares producidos por el material almacenado y los esfuerzos de flexión debidos a las cargas de temperatura, son los que actúan principalmente en la zona de presión, los esfuerzos cortantes debidos a las cargas sísmicas son los que rigen el diseño de los muros bajo la zona de presión.

El promedio de los elementos mecánicos o fuerzas; de tensión, flexión y fuerzas cortantes en este caso esfuerzos son calculados en varias zonas horizontales del silo para las combinaciones de carga definidas y el total del refuerzo horizontal requerido para satisfacer los esfuerzos, se compara con el acero de refuerzo horizontal existente. En donde; (RDC) es la relación que representa el nivel de sobre-esfuerzos (o no) del acero de refuerzo existente del muro del silo.

El acero de refuerzo horizontal necesario para cada condición aislada de cargas se calcula como sigue:

$$A_{s\_tens} = F_u / \phi f_y$$

$$A_{s\_flexión} = M_u / \phi f_y (d - a / 2)$$

$$A_{s\_cortante} = V_u - \phi V_c / \phi \rho f_y$$

Donde:

$F_u$ ,  $M_u$ ,  $V_u$ : Fuerza anular, momento de flexión y fuerza cortante respectivamente

$\phi$ : Factores de reducción para tensión (0.9), flexión (0.9), cortante (0.85)

$f_y$ : Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo

$\rho$ : Porcentaje de acero de refuerzo horizontal

$V_u$ : Esfuerzo cortante ultimo aplicado

$V_c$ : Esfuerzo cortante resistido por el concreto

$$V_c = \phi 0.53 \sqrt{f'_c} b d \quad (25,140 \text{ kg/cm}^2/\text{m})$$

$$a = \rho f_y d / 0.85 f'_c$$

En el caso de los muros en la zona de presión; el análisis de los resultados indica que la combinación de carga 21 en la que rigen las cargas de presión y las combinaciones 22 y 24 en las que rigen las cargas de sismo tienen similar importancia en el cálculo del acero de refuerzo horizontal necesario. Para la combinación de cargas 21 (con un factor de carga de 1.7 para las cargas de presión) los esfuerzos anulares son los mayores y los esfuerzos producidos por cortante son mínimos, para las combinaciones de carga 22 y 24 (con factores de carga de 1.28 para las cargas de presión y un factor de carga de 1.4 para las cargas de sismo) la combinación de esfuerzos de presión y cortante rige el diseño, los esfuerzos de flexión debidos a cargas de temperatura tienen una pequeña contribución en la cantidad de acero de refuerzo requerido.

Para los muros bajo la zona de presión las combinaciones de carga de la 22 a la 25 que incluyen las fuerzas de sismo, rigen la cantidad de acero de refuerzo requerido principalmente definido por los esfuerzos de cortante debidos al sismo.

En la tabla 4.4 se presenta un resumen de los valores (RCD) obtenidos de la comparación; de acero de refuerzo requerido / acero de refuerzo existente en los muros del silo. Como puede verse en la mayoría de los casos existe deficiencia de acero de refuerzo para poder resistir adecuadamente las cargas aplicadas.

Para estos cálculos el acero de refuerzo nominal considerado es el que se incluye en los dibujos originales ya que el estudio de Sika confirmó que el acero está adecuadamente colocado.

Zona	Elevacion desde el nivel TCC (m)	$A_{s\_tens}$ requerido (cm <sup>2</sup> )	$A_{s\_flexion}$ requerido (cm <sup>2</sup> )	$A_{s\_cortante}$ requerido (cm <sup>2</sup> )	$A_{s\_total}$ requerido (cm <sup>2</sup> )	$A_{s\_total}$ existente (cm <sup>2</sup> )	RDC
Zona de presión	46.36 a 59.00	20	4	1	25	20	1.26
	37.93 a 46.36	21	13	1	35	51	0.69
	29.50 a 37.93	57	12	0	69	79	0.87
	12.64 a 29.50	106	16	0	122	106	1.16
	4.21 a 12.64	123	16	2	141	132	1.07
Bajo zona de presión	0.00 a 4.21	68	1	30	99	53	1.88
	0.00 a 4.21 muros transv.	27	3	5	35	53	0.66

TCC = Tope de concreto cabezal de cimentación

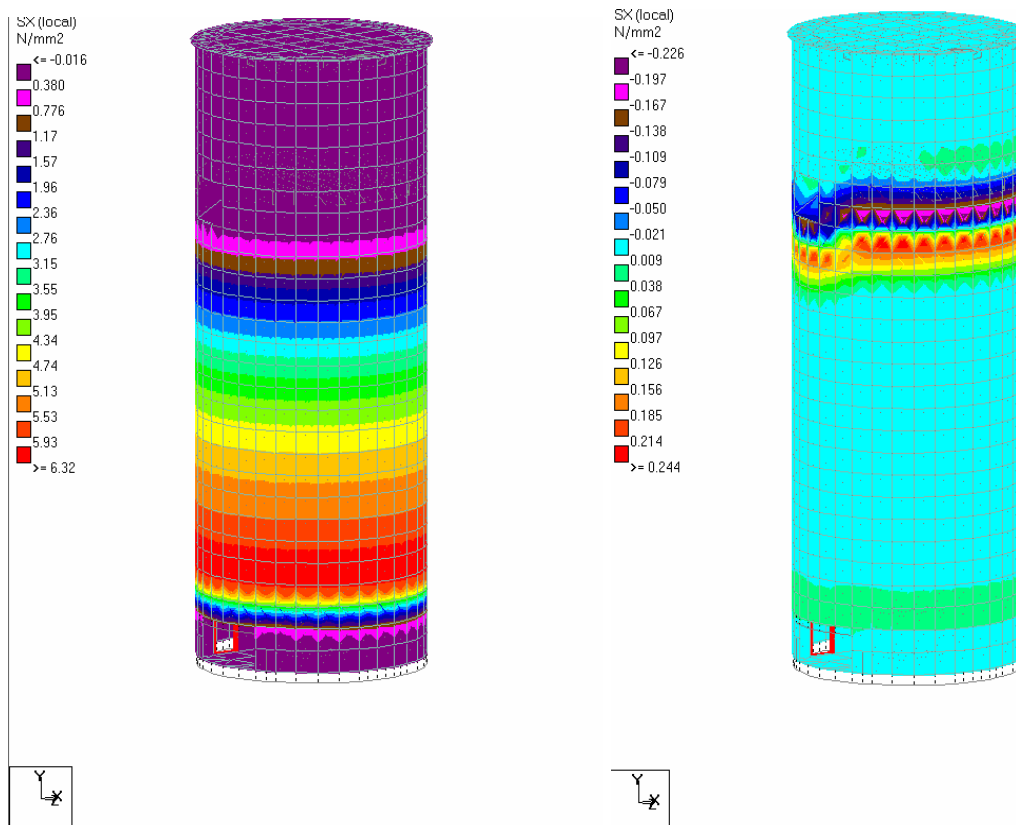
RDC = Relación demanda-capacidad

**Tabla 4.4 Relación demanda capacidad del acero de refuerzo horizontal**

La figura 4.5 muestra las fuerzas y momentos anulares debido a cargas de presión y temperatura respectivamente, en la que los esfuerzos de tensión anular debidas a las cargas de presión son mayores de acuerdo a lo esperado en la zona de presión. Los esfuerzos de flexión debidos a la temperatura son casi constantes a lo largo de las zonas de presión, y concuerdan con las ecuaciones simplificadas del ACI-313 para calcular los momentos de flexión debidos a efectos de temperatura

En la figura 4.6 se muestran los esfuerzos cortantes en los muros debidos a sismo en dirección X y Z.

Es importante notar que existe una concentración de fuerzas (esfuerzos) a lo largo de las aberturas, por lo tanto se requerirá acero de refuerzo adicional para estas zonas. Estos resultados concuerdan con las observaciones de daños “in-situ”.



**Figura 4.5 Esfuerzos debidos a las fuerzas de presión y temperatura**

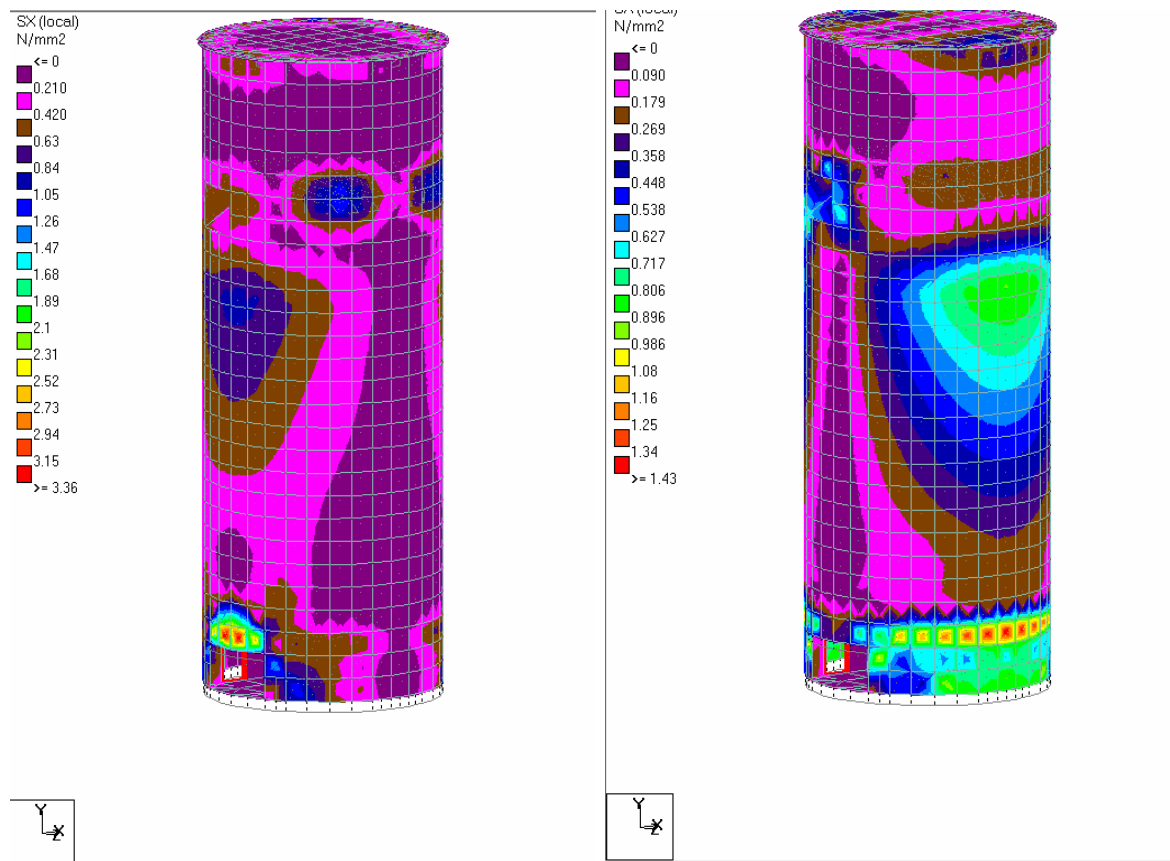
Fuerzas verticales – acero de refuerzo vertical en las paredes del Silo

Los esfuerzos verticales de tensión en las paredes debidos a los momentos de volteo sísmico presentan valores que varían desde cero en la parte superior del silo a valores



muy elevados en la base. En la zona de presión, esta condición es mitigada por las fuerzas de compresión debidas al peso de la cubierta de techo, el peso propio de los muros, y las fuerzas de fricción del material almacenado.

Bajo la zona de presión las fuerzas de compresión se deben al peso de la cubierta de techo, el mismo peso propio de la pared el peso del material almacenado en el silo, la losa de fondo, en donde parte del peso del material almacenado es transmitido directamente los muros del túnel de concreto usado para extraer el material del silo.



**Figura 4.6 Esfuerzos por cortante debidos al sismo en sentido X y Z respectivamente**

En donde los esfuerzos de tensión vertical son resistidos en su totalidad por el acero de refuerzo vertical, adicionalmente los esfuerzos debidos a los efectos de flexión por cargas de temperatura también deberán ser resistidos por el acero de refuerzo vertical en conjunto con la sección de concreto.

Estos efectos combinados de flexión y tensión vertical en los muros están definidos por la siguiente ecuación simplificada de interacción:

$$(T_u / T_n) + (M_u / M_n) \leq 1.0$$

Donde:

$T_u$ : Fuerza de tensión vertical obtenida del análisis del Staad Pro

$M_u$ : Momento de flexión obtenido del análisis del Staad Pro

$T_n$ : Capacidad a tensión vertical del muro  $T_n = f_y A_s$

$M_n$ : Capacidad a flexión del muro  $M_n = f_y A_s [d - 0.5(A_s f_y / 0.85 b f'_c)]$

La capacidad a tensión y flexión de los muros fueron determinada siguiendo las recomendaciones del ACI-313 y del ACI-318, usando los factores con valor de 0.9 para ambos casos; tensión y flexión, y usando el acero de refuerzo verticales nominal especificado en los dibujos. Considerando que la investigación de Sika no muestra una importante variación en las separaciones, ni en los diámetros del acero de refuerzo vertical de los muros del silo.

La evaluación comparativa de si el acero de refuerzo vertical es adecuado o suficiente para resistir los elementos mecánicos, a los que está sometido se presenta en la tabla 4.5 En la que las relaciones RDC calculadas mediante la ecuación de interacción antes definida muestran valores cercanos a 4, que indican que el muro fue sub-diseñado para soportar las fuerzas de tensión por lo que es necesario incrementar el acero de refuerzo vertical para que los muros del silo tengan la capacidad de resistir las fuerzas verticales a las que está sometido.

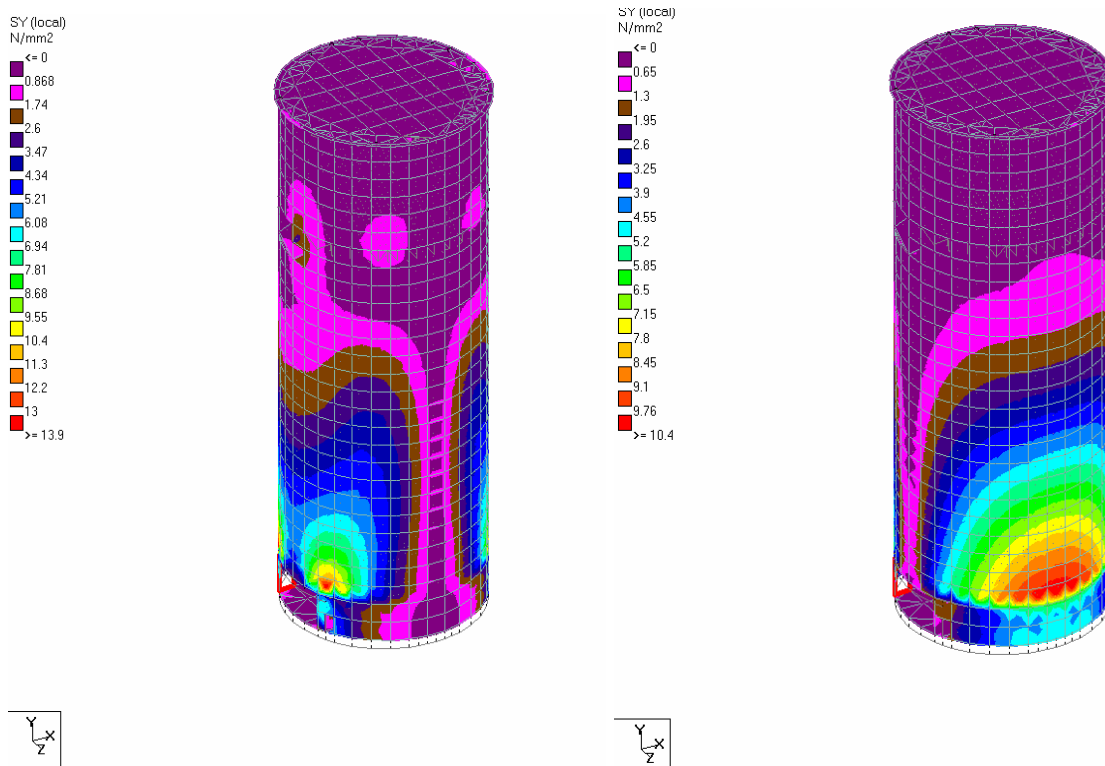
Zona	Elevación desde el nivel TCC (m)	RDC
Zona de presión	46.36 a 59.00	2.33
	37.93 a 46.36	2.28
	29.50 a 37.93	2.83
	12.64 a 29.50	1.95
	4.21 a 12.64	3.36
Bajo zona de presión	0.00 a 4.21	3.9
	0.00 a 4.21 muros transv.	1.21

TCC = Tope de concreto cabezal de cimentación

RDC = Relación demanda-capacidad

**Tabla 4.5 Relación demanda capacidad del acero de refuerzo vertical**

La figura 4.7 muestra las fuerzas de tensión verticales en los muros del silo, debidos a las fuerzas sísmicas actuando en las direcciones X y Z respectivamente, en donde el acero de refuerzo vertical debe ser capaz de resistir la combinación de fuerzas de tensión vertical y los momentos flexionantes a los que estará sometido.



**Figura 4.7 Esfuerzos verticales de tensión debidos al sismo en sentido X y Z respectivamente**

Esfuerzos de compresión en los muros de silo.

Los esfuerzos de compresión en los muros debidos al efecto combinado de las cargas sísmicas y las cargas de gravedad (peso propio, más el peso del material) se verificó a lo largo de la altura de los muros del silo, en particular en la parte inferior del muro. La capacidad de compresión del muro se calculo utilizando la ecuación:

$$P_n = 0.55 f'_c A_g$$

Donde:

$P_n$ : Capacidad a compresión vertical del muro

Factor de reducción de resistencia para esfuerzos de compresión 0.7

$A_g$ : Área de la sección de concreto

El cálculo para la obtención RDC (fuerzas de compresión actuante dividida entre la capacidad de compresión del muro) en las zonas de elevaciones críticas del muro se muestran en la tabla 4.5.

En la mayoría de los casos los esfuerzos de compresión están dentro de los valores permitidos por los códigos, en los cálculos RDC las relaciones son aceptables teniendo en cuenta que el acero de refuerzo vertical añade un poco de fuerza adicional a la capacidad de compresión del muro.

#### Estabilidad del Silo

La estabilidad del Silo de Clinker contra el momento de volteo y el deslizamiento se verificó sin considerar el efecto de las pilas. Dicha estabilidad del silo, debido a los efectos del momento de volteo está representada por un factor de seguridad dado por:

$$FS = \text{Momento de volteo resistente} / \text{Momento de volteo debido a sismo}$$

Zona	Fuerza cortante en la base 80% del analisis estatico (t)	Momento de volteo del analisis dinamico (t m)	Peso vertical: Popo + 80% material (t)	Momento de volteo resistente (t m)	RDC
Bajo cabezal de cimentacion	2,718	93,675	27,874	335,302	3.58

**Tabla 4.6 Factor de seguridad por momento de volteo**

La estabilidad del silo debido al deslizamiento está representada por un factor de seguridad dado por:

$$FS = \text{Fuerza resistente} / \text{Fuerza cortante en la base debida al sismo}$$

El momento de volteo y las fuerzas de cortante en la base debidas al sismo se obtuvieron utilizando los resultados de los análisis dinámicos por sismo en la dirección más desfavorable usando el software Staad Pro. El momento resistente se evaluó con base en el 90% del peso del silo y el 80% del peso del material almacenado, y la resistencia a cortante se obtuvo asumiendo un coeficiente de rozamiento de 0,25. Los factores de seguridad resultantes de vuelco y deslizamiento se muestran en la Tabla 4.6.

El factor de seguridad para momento de volteo debe ser  $\geq$  a 2.0 y el de deslizamiento debe ser  $\geq$  a 1,5.

## Análisis de la cimentación

El modelo utilizado para estudiar el comportamiento de la cimentación considera a las trabes del cabezal de cimentación modelado como elementos barra conectados a los muros del túnel y los muros perimetrales del silo dichas trabes cabezal se consideraron empotradas en los puntos de localización de las pilas de cimentación, las cargas verticales, las fuerzas cortantes y momentos de volteo obtenidos del análisis de la superestructura se han aplicado a la cimentación.

La revisión del acero de refuerzo en los cabezales de cimentación mostro que los valores de las relaciones RDC están por encima de 1,70 para esfuerzos de flexión en la parte inferior del acero de refuerzo de la cimentación. La capacidad de carga del suelo en las pilas fue excedida en un 10% y se considera aceptable.

### **4.3. Análisis de las deficiencias de los elementos de la estructura.**

Sobre la base de la evaluación estructural del Silo, tal como fue construido, realizada en este capítulo, se puede concluir que la estructura del Silo de Clinker no tiene la capacidad suficiente para resistir las cargas aplicadas. Específicamente se identificaron problemas de acuerdo a:

- El espesor del muro de concreto y el acero de refuerzo horizontal en la zona de presión y por debajo de la zona de presión de los muros del Silo no tiene la capacidad suficiente para resistir el nivel de esfuerzos combinados generados por el empuje y fricción del material almacenado, la temperatura y las cargas sísmicas.
- El acero de refuerzo vertical en las paredes del Silo no tiene la capacidad suficiente para resistir los esfuerzos de tensión vertical generada por los efectos del volteo sísmico.
- La capacidad de flexión de los cabezales de cimentación es excedida.
- La capacidad de carga en el suelo donde se apoyan las pilas es razonablemente excedida y por lo tanto se considera adecuado.

Proyecto de rehabilitación de un Silo de concreto  
reforzado para almacenamiento de Clinker

CAPÍTULO 5

# **PROYECTO DE REHABILITACIÓN DEL SILO**

## **Capítulo 5 Proyecto de Rehabilitación del Silo.**

En este capítulo se presenta el proyecto de rehabilitación necesario para llevar la capacidad estructural del Silo a resistir las cargas y combinaciones de carga que se presentan durante la operación.

Dentro del desarrollo de este proyecto de rehabilitación se plantean las estrategias generales para lograr llevar al silo a resistir las condiciones aplicadas, esto de acuerdo a las necesidades obtenidas después de haber realizado el análisis de los resultados obtenidos de la evaluación estructural y el diagnóstico del estado físico – químico de los materiales que componen el silo.

Se planteará un incremento de espesores para los muros de concreto y una capa adicional de acero de refuerzo embebido en este incremento de espesor; estos incrementos de espesor de concreto y de acero de refuerzo se incluyen en el modelo estructural desarrollado en el capítulo 4 y se revisa su comportamiento hasta que las condiciones de carga sean resistidas adecuadamente por las secciones de concreto y la capacidad de acero suministrada.

Para concluir el capítulo mostrando en esquema la propuesta del incremento de secciones de concreto y cantidad de acero de refuerzo.

### **5.1. Análisis de las deficiencias de los elementos de la estructura.**

De acuerdo a los datos obtenidos del análisis del estado estructural del silo para resistir las cargas a las que está sometida la estructura, la estrategia que se propone para subsanar las deficiencias es:

- Incrementar el espesor de los muros perimetrales del silo en 200 mm a lo largo de todo el silo lo que nos permitirá soportar las cargas de compresión, le dará un adecuado recubrimiento y protección al acero de refuerzo.
- A lo largo del cuerpo del silo se instalarán una serie de conectores de cortante para hacer trabajar en forma monolítica la sección de concreto existente de los muros con el incremento de espesor, que de acuerdo a la experiencia resultante de otras reparaciones de silos es muy práctico realizar a base de concreto lanzado.
- Se colocará una capa de acero de refuerzo vertical perimetral a base de varillas del # 5 @ 200 mm que es suficiente para poder tomar las fuerzas de tensión del muro producidas por el volteo sísmico, este acero de refuerzo vertical estará anclado

mediante el sistema Hilti Hyt-Re en el cabezal de cimentación y soportado por las anclas de cortante por fricción y lateralmente tendrá el soporte para evitar el pandeo del acero de refuerzo horizontal anular perimetral.

- Se adicionará una capa de acero de refuerzo horizontal anular colocada hacia la cara exterior del acero de refuerzo vertical en la que el primer tercio de la altura será con varilla # 10 @ 200, en el resto de la zona será con varilla # 8 @ 200 y en la zona de mezanine con varilla # 6 @ 200.
- Antes de la colocación del acero de refuerzo y el lanzado final de concreto se realizara una limpieza y escarificado grueso mediante chorro de agua a alta presión (hidro jet), después el retirado de material suelto de las juntas del colado y las zonas donde hubo segregación.
- La preparación, el relleno y el resanado de oquedades y fisuras con morteros epóxicos.
- Para terminar colocando sobre el concreto lanzado una capa de impermeabilizante de base cemento.

## 5.2. Análisis del modelo para la rehabilitación.

Los datos anteriores se incluyeron en el modelo matemático para verificar si los incrementos de espesor y acero de refuerzo son adecuados y óptimos para resistir las cargas aplicadas en donde se tomo como base el modelo del capítulo 4, también bajo la misma metodología cargas y conceptos ya usados.

Revisando nuevamente los valores de relación demanda capacidad (RDC) en los elementos tendremos:

Propiedades modales, desplazamientos globales y fuerzas cortantes sísmicas.

Los periodos fundamentales del silo se presentan en la tabla 5.1

Modo	Dirección	Periodo (seg)
1	Traslación sentido X	0.511
2	Traslación sentido Z	0.484
5	Distorsion cilindrica	0.339
10	Rotación	0.215

**Tabla 5.1 Periodos y modos de vibrar del silo del análisis dinámico**



Los desplazamientos máximos del silo se muestran en la tabla 5.2 y son menores que los permisibles.

Dirección	Desplazamiento elástico en zona superior ( m )	Desplazamiento inelástico en zona superior <sup>[1]</sup> ( m )	Relación de desplazamiento calculado <sup>[2]</sup> (%)	Desplazamiento permisible (%)
Traslación sentido X	0.045	0.09	0.153	1.2
Traslación sentido Z	0.041	0.081	0.137	1.2

[ 1 ] Desplazamiento inelastico = Desplazamiento elastico x Q

[ 2 ] Relacion de desplazamiento = Desplazamiento en zona superior / Hsilo

Q = 2.0

H<sub>silo</sub> = 59.00 m

**Tabla 5.2 Desplazamientos máximos en la cubierta del Silo**

En la tabla 5.3 se resumen las fuerzas cortantes sísmicas en donde se puede ver que las fuerzas calculadas con el procedimiento dinámico son menores al 75% de las calculadas por el método estático por lo que se diseñara con las calculadas por el método estático

Dirección	Fuerza cortante en la base método estático ( V <sub>b</sub> ) ton	Fuerza cortante en la base 75% método estático ( V <sub>b</sub> ) ton	Fuerza cortante en la base método dinámico ( V <sub>b</sub> ) ton
Traslación sentido X	7,747.29	5,810.47	5,869.25
Traslación sentido Z	7,747.29	5,810.47	5,888.88

Se diseñara considerando la fuerza sísmica obtenida con el método dinámico modificando las ordenadas espectrales por la relacion  $0.75 V_{be}/V_{bd}$

**Tabla 5.3 Fuerza cortante sísmica en la base del Silo**

En la tabla 5.4 se resumen los valores de de áreas necesarias de acero requerido comparado con el refuerzo existente en el que se puede observar que el incremento en el espesor de concreto y de acero de refuerzo horizontal permiten que el silo soporte adecuadamente las fuerzas a las que está sometida.

La evaluación comparativa de si el acero de refuerzo vertical es adecuado o suficiente para resistir los elementos mecánicos, a los que está sometido se presenta en la tabla 5.5

En la que las relaciones RDC calculadas mediante la ecuación de interacción antes definida muestran valores cercanos a 4, que indican que el muro fue sub-diseñado para soportar las fuerzas de tensión por lo que es necesario incrementar el acero de refuerzo

vertical para que los muros del silo tengan la capacidad de resistir las fuerzas verticales a las que está sometido.

Zona	Elevación desde el nivel TCC (m)	A <sub>s_tens</sub> requerido (cm <sup>2</sup> )	A <sub>s_flexion</sub> requerido (cm <sup>2</sup> )	A <sub>s_cortante</sub> requerido (cm <sup>2</sup> )	A <sub>s_total</sub> requerido (cm <sup>2</sup> )	A <sub>s_total</sub> existente (cm <sup>2</sup> )	RDC
Zona de presión	46.36 a 59.00	20	4	1	25	30	0.83
	37.93 a 46.36	21	13	1	35	51	0.69
	29.50 a 37.93	57	12	0	69	79	0.87
	12.64 a 29.50	106	16	0	122	159	0.77
	4.21 a 12.64	123	16	2	141	132	1.07
Bajo zona de presión	0.00 a 4.21	68	1	30	99	107	0.93
	0.00 a 4.21 muros transv.	27	3	5	35	53	0.66

TCC = Tope de concreto cabezal de cimentación

RDC = Relación demanda-capacidad

**Tabla 5.4 Relación demanda capacidad del acero de refuerzo horizontal**

Zona	Elevación desde el nivel TCC (m)	RDC
Zona de presión	46.36 a 59.00	1
	37.93 a 46.36	0.98
	29.50 a 37.93	0.85
	12.64 a 29.50	0.75
	4.21 a 12.64	0.99
Bajo zona de presión	0.00 a 4.21	1.08
	0.00 a 4.21 muros transv.	0.85

TCC = Tope de concreto cabezal de cimentación

RDC = Relación demanda-capacidad

**Tabla 5.5 Relación demanda capacidad del acero de refuerzo vertical**

De acuerdo a la revisión del modelo estructural con las secciones y cantidades de acero de refuerzo adicionales descritas en el punto 5.1 e indicadas gráficamente en la figura 5.1, es posible comprobar que las modificaciones a la estructura son adecuadas, ya que el comportamiento de la estructura mejora, quedando dentro de los límites permisibles, tanto para las condiciones de falla como de servicio; por lo que el proyecto propuesto de rehabilitación es adecuado por lo tanto se desarrollara el proyecto ejecutivo.

### 5.3. Proyecto de rehabilitación.

Como ya fue descrito el proyecto de rehabilitación contiene un incremento de espesor de concreto de 20 cm y el incremento de acero de refuerzo descrito en el punto 5.1 y en la figura 5.1.

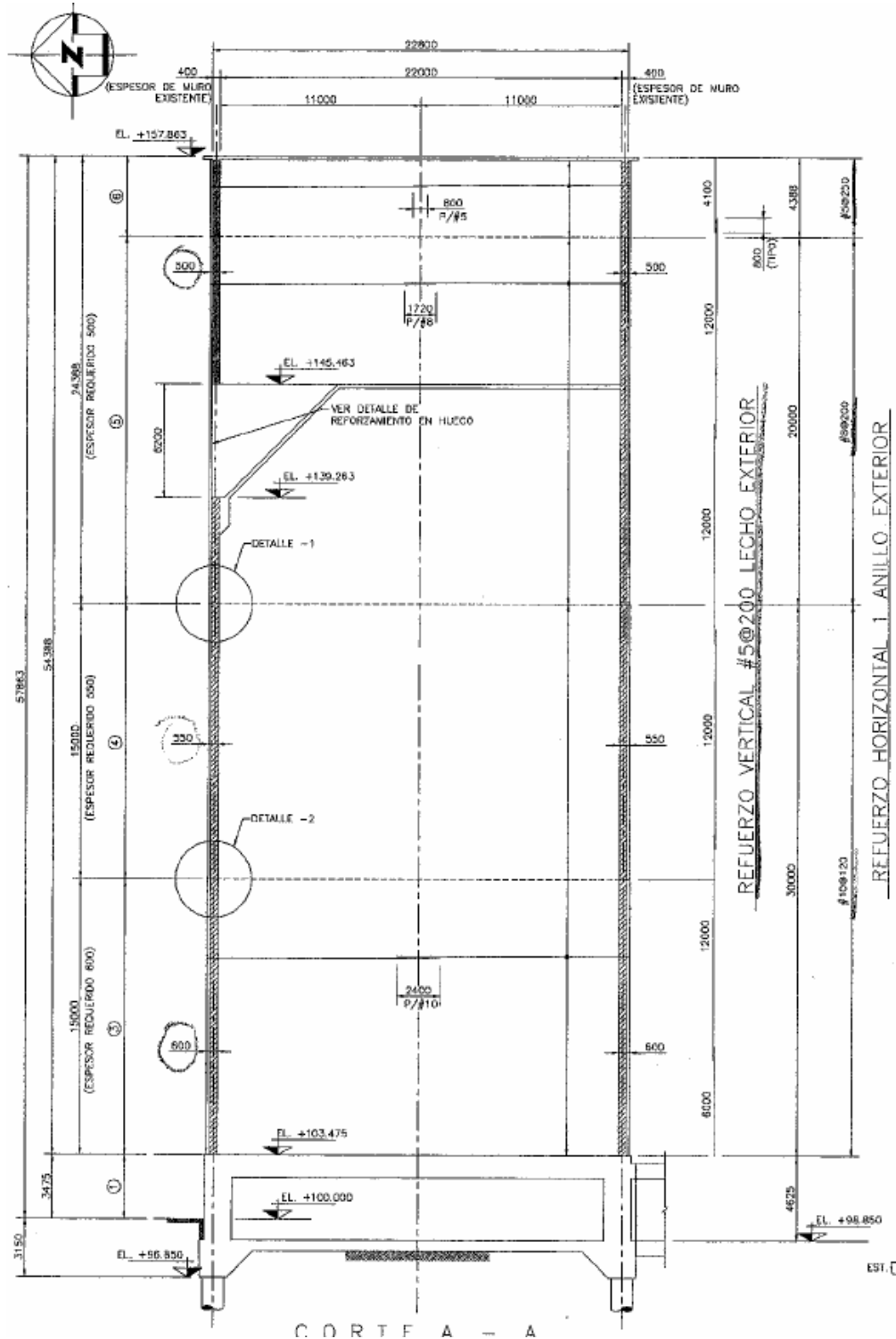


Figura 5.1 Detalle del proyecto de rehabilitación del Silo

Proyecto de rehabilitación de un Silo de concreto  
reforzado para almacenamiento de Clinker

## CAPÍTULO 6

# **PROYECTO EJECUTIVO Y PRESUPUESTO**

## **Capítulo 6 Proyecto Ejecutivo y Presupuesto.**

En este capítulo se describirá el proyecto ejecutivo que incluye el conjunto de actividades y documentos necesarios que permitirán la construcción del proyecto de rehabilitación que se ha desarrollado a lo largo de los capítulos anteriores.

Primero se hará una descripción de los procedimientos de construcción que se usarán para la rehabilitación, para seguir con los dibujos con los que se realizará la construcción. Posteriormente, se presentarán las especificaciones de rehabilitación y de los materiales que serán aplicados, también se presentará el catálogo de conceptos con los volúmenes de obra que primero será presupuestada y después será licitado para obtener los precios unitarios, así mismo se presentará el programa de ejecución de la obra con un desglose de recursos.

### **6.1. Proceso constructivo.**

El procedimiento constructivo para llevar a cabo la rehabilitación del silo es un conjunto de varios procesos de construcción necesarios para completar la construcción del proyecto:

- Colocación en todo el perímetro del silo un andamio tubular de alta resistencia llamado sistema total de fácil armado, de acuerdo a la figura 6.1 está constituido por elementos tubulares verticales de 3.00 m con rosetas de conexión @ 2.00 m que se van acoplando en forma vertical, estos postes verticales se colocan en pares unidos en forma transversal por largueros tubulares de 2.13 m y en forma longitudinal con largueros tubulares de 3.05 m lo que permite formar un entramado de marcos en el sentido transversal de un claro y en forma longitudinal o perimetral columnas y largueros @ 3.05 m entre los largueros transversales @ 3.05 m se colocan tres plataformas de rejilla con uñas a cada extremo para apoyarse en los tubos transversales, esto forma una plataforma de operación de 2.15 m por todo el perímetro, adicionalmente se colocan ménsulas de 1.0 m en el sentido de los 2.13 m que soportan dos plataformas de 3.05m lo que incrementa la plataforma de trabajo a 3.13 m, el borde de esta plataforma queda separada 0.50 m de los muros del silo para permitir la colocación de los materiales y el trabajo, normalmente se suministran plataformas en 6 niveles consecutivos @ 2.00 m que van subiendo y bajando en este caso existe en el silo una escalera metálica, por lo que no habrá que incluir una en el andamio.

- Una vez colocado el andamio perimetral se realizará la escarificación y limpieza a todo lo largo del silo a base de un chorro de agua de alta presión dejando la superficie rugosa con un perfil de rugosidad de 3.0 mm como se ve en la figura 6.2.
- Preparación de la superficie de concreto mediante la remoción con herramienta mecánica de todo el concreto suelto o débil de juntas frías, oquedades o zonas de segregación de acuerdo a la figura 6.2.
- Apertura mediante herramienta mecánica en (V) de fisuras menores a 1 mm pero mayores de 0.5 mm fisuras que no son consideradas estructurales esto puede verse en la figura 6.2.
- Apertura mediante herramienta mecánica en (V) y preparaciones mediante perforaciones para inyección de las fisuras estructurales de más de 1 mm hasta 3 mm en la figura 6.2.
- Reparación de huecos, oquedades y juntas frías con morteros y concretos con látex, especiales para rellenar los huecos, se colocará antes de los morteros o concretos un puente de adherencia que permita la mejor liga entre concreto viejo y nuevo.
- Relleno mediante espátula de un sistema epóxico de dos componentes, rellenando totalmente la fisura abierta o preparada figura 6.3.
- Inyección de resina epóxica de fisuras estructurales mediante presión para lograr rellenarlas, antes de la inyección las fisuras preparadas se deben sellar con gel como se ve en la figura 6.3.
- Colocación de anclajes horizontales en forma perpendicular al plano del muro de varillas # 4 @ 400 en toda la superficie de muros del silo ancladas con resina que trabajaran como conectores de cortante entre el concreto viejo y nuevo de acuerdo a la figura 6.4.
- Colocación de la capa de refuerzo vertical de varillas # 5 @ 200 en la cara exterior, estas varillas se anclaran en la cimentación mediante perforaciones rellenas de resina epóxica ver figura 6.4.
- Colocación de la capa de refuerzo horizontal de varillas de distinto diámetro y separación, estas varillas irán por el exterior del acero de refuerzo vertical, respetando los 50 mm de recubrimiento libre como se ve en la figura 6.4.
- Una vez colocado y armado el acero de refuerzo se lanzará concreto vía seca con un espesor de 200 mm que deberá ser curado con una membrana de curado base agua.

- La cara exterior del concreto lanzado deberá ser terminada con un acabado fino.
- Después de retirar la membrana de curado se aplicara una capa de impermeabilización de material de origen y color tipo cemento para protección de los muros de los contaminantes del medio ambiente.
- Una vez concluida la aplicación del impermeabilizante se retira el andamio y plataformas.



**Figura 6.1 Andamio de alta resistencia perimetral con plataformas de trabajo**



**Figura 6.2 Preparación, escarificación y apertura de fisuras y oquedades**



**Figura 6.3 Resanado e inyección de fisuras**



**Figura 6.4 Anclaje en cimentación y acero de refuerzo adicional en muros**



**Figura 6.5 Acabado y concreto lanzado en muros**



## 6.2. Dibujos constructivos.

Una vez seleccionado el anteproyecto definitivo, se procede a la elaboración del proyecto constructivo en su nivel ejecutivo. El procedimiento se inicia con la revisión del anteproyecto, la determinación de las secciones probables de los diversos elementos de la estructura, con esta información se procederá a la elaboración del proyecto definitivo, como se muestra en la figura 6.6.

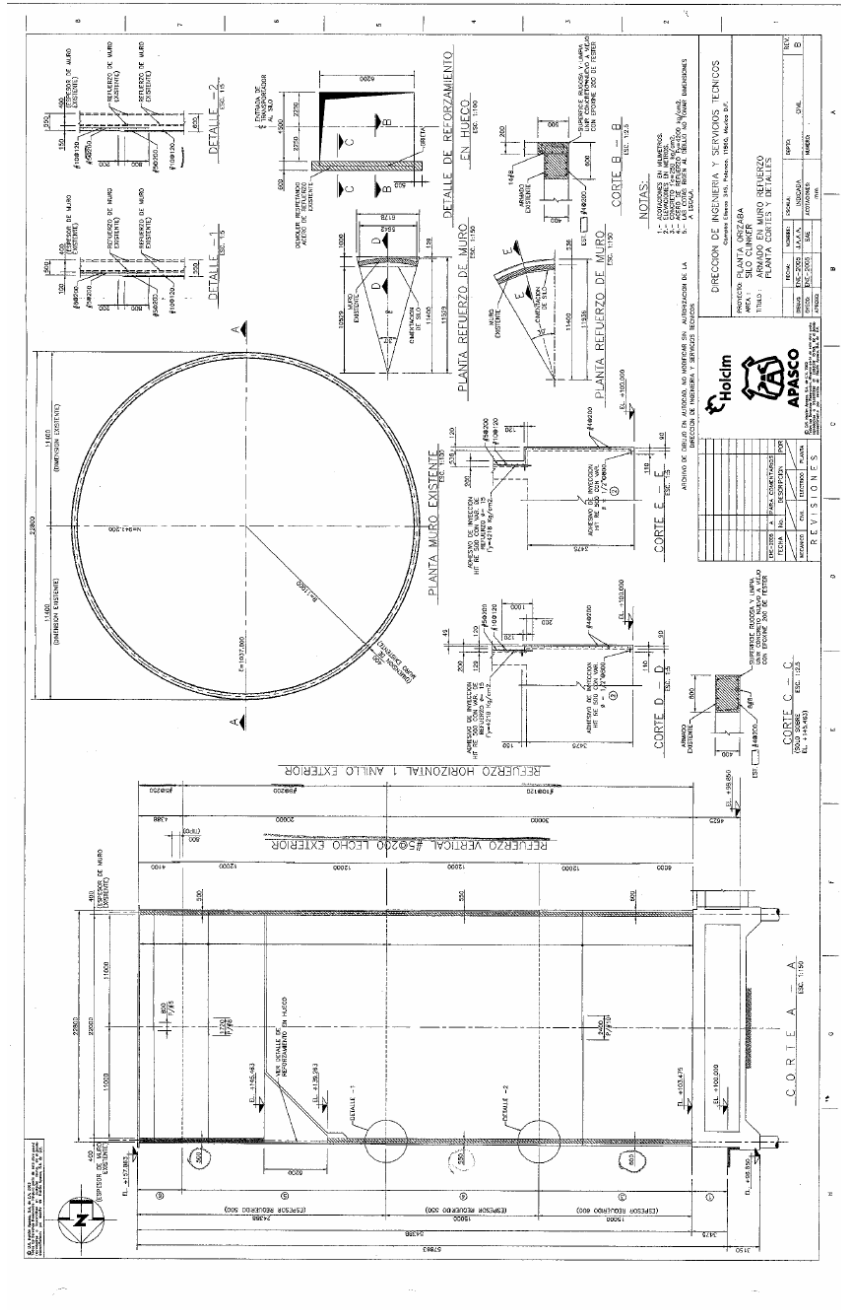


Figura 6.6 Dibujo constructivo tipo del proyecto de rehabilitación

### **6.3. Especificaciones de rehabilitación.**

Estas juegan un papel relevante dentro del proyecto ejecutivo pues complementan a los planos y al catálogo de concepto. También, establecen las técnicas constructivas con las que deberán ser efectuados los conceptos de trabajo. En estas se indica como se hará el trabajo, como se medirá para pago, la calidad que deberán de tener los trabajos y los materiales y las pruebas a las que deberán ser sometidos los materiales, por lo que a continuación se presentan dichas especificaciones para la rehabilitación del Silo:

#### **Especificaciones Generales**

##### Definiciones

Estas especificaciones forman parte integrante del contrato que otorga “la propietaria” a la compañía constructora que se hará cargo de la ejecución de las obras en cuestión.

A la empresa encargada de la ejecución del contrato de obra en lo sucesivo se le denominará “el contratista”, deberá tener un representante técnico responsable, el cual se denominará residente general y que fungirá como jefe del personal técnico de la obra.

Al representante que fije “la propietaria” para que se cumpla con el proyecto se le denominará “director de la obra” y al representante que designe para vigilar el programa de obra, especificaciones, calidad y costos, se le denomina “supervisión”.

##### Objeto de las especificaciones

El objeto de las especificaciones es la de complementar las estipulaciones contenidas en el contrato, así como las especificaciones de los planos, estableciendo técnicas o procedimientos constructivos a las que se deberá sujetar la ejecución de los diferentes conceptos del trabajo.

Así mismo, el desarrollo de los trabajos, los materiales empleados y pruebas deberán estar de acuerdo con lo que marquen los reglamentos y normas de las siguientes instituciones reconocidas:

- ACI (1997). "Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials ACI 313-97."
- ACI (2005). "Building Code and Commentary for Structural Concrete ACI 318-05."

- FEMA (2000). "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings FEMA 356", Federal Emergency Management Administration, p 4-18.
- GDF (2004), "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal".
- GDF (2004), "Diseño y construcción de estructuras de concreto", (Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal).

“La propietaria” por medio de la "supervisión" entregará el plano correspondiente al: Dibujo de reforzamiento planta, elevaciones, secciones y detalles.

#### Desarrollo de la Obra

Previamente al inicio de la obra, el “contratista” deberá corroborar el trazo en términos del proyecto, si existen discrepancias se deberá reportar a la supervisión y a la dirección de la obra, y de lo contrario, él será el único responsable y por su cuenta y riesgo se harán todos los gastos necesarios para el ajuste del proyecto al sitio de la obra.

Desde el inicio de la obra se llevará una bitácora de obra rociada y las notas que en ella se asienten serán: órdenes de trabajo, aclaraciones, cambios de especificación, órdenes de arreglo o demolición, etc.

Todas las notas de bitácora deberán ser fechadas y firmadas por el representante del contratista (residente general), por el representante de la propietaria (director de obra) y por la supervisión.

El contratista se sujetará al programa de obra, previamente revisado con la supervisión y aceptado en secuencias, tiempos, actividades y fechas de inicio y terminación total.

Las fechas de inicio y término sólo podrán ser modificadas por la “propietaria”.

En la obra siempre deberá existir un juego de planos completos, los cuales deberán ser actualizados al término de la obra por el contratista, debiendo entregar a la dirección de obra un juego de planos actualizados de como se construyó.

#### Control de Calidad

Durante el tiempo de desarrollo y ejecución de la obra la “Propietaria”, en forma directa y a través del “director de obra” o la “supervisión” cuando lo juzgue necesario tendrá derecho a solicitar pruebas normales o extraordinarias de calidad de los materiales básicos; la capacitación, concretos, acero de refuerzo, materiales de acabado, etc., así como las pruebas de carga de cualquier parte de la estructura, el costo de las pruebas positivas

será por cuenta de la “propietaria” y el costo de las pruebas negativas, así como las reposiciones, reparaciones y / o demoliciones e su caso serán por cuenta de la “contratista”.

#### Recepción de obra

La Recepción de Obra se llevará a cabo hasta la terminación al 100% de las obras y de los detalles correspondientes, así como: desmantelamiento de bodegas y oficinas provisionales, retiro de materiales sobrantes y equipo, limpieza de escombros y limpieza final de la Obra.

La Recepción de obra será firmada por un representante directo de la “propietaria”, el Director de Obra, un Representante de la Supervisión y un Representante del Contratista, precisamente en la obra, después de revisada y aceptada la cantidad de obra, así como de los detalles correspondientes.

### **Especificaciones Particulares**

#### Preliminares, preparación y reparación de superficie

- Escarificado en el área total de los silos.
  - La penetración de este trabajo es de 3 a 5 mm, espesor donde se encuentra la mayor concentración de cloruros. Este trabajo se realizará por medios mecánicos con un rompedor Target o Hilti con cabeza en posición perpendicular al muro.
  
- Trabajos de hidro blast.
  - Este trabajo se realizará después de haber realizado el 100% del escarificado con el objeto de dar una exhaustiva limpieza a presión con una presión mínima de 6 kg / cm<sup>2</sup> para eliminar del muro exterior del silo todas las adherencias ambientales existentes y así garantizar no contaminar el nuevo recubrimiento. Iniciando la proyección neumática del chorro de agua a alta presión en la superficie del muro iniciando en la zona mas alta del silo hacia abajo con movimientos circulares del chorro de agua.

- Procedimiento de tratamiento de fisuras no estructurales del Silo.
  - Objetivo. Resanar fisuras horizontales y verticales de fisuras menores a 1 mm pero mayores de 0.5 mm, fisuras que no son consideradas estructurales esto puede verse en la figura 6.2, antes de colocar mortero de reparación y lograr una superficie uniforme de contacto para la instalación del acero de refuerzo.
  - Preparación de la superficie. El concreto existente debe estar sano, limpio y bien texturizado, la trayectoria de la grieta debe estar definida y abierta con herramienta de corte a una profundidad aproximada de 0.5 a 1.0 cm.
  - Tratamiento. El tratamiento de fisuras se llevara a cabo con un sistema epóxico de dos componentes, 100% reactivo; de alto módulo y consistencia gel.
  - Mezclado. El rango de temperatura apropiado a la que todos los materiales deben estar es de 16 a 32 grados centígrados, mezcle la parte A y B (resina y endurecedor), por dos minutos como mínimo utilizando taladro eléctrico de bajas revoluciones y propelas que no generen aire al mezclar. Para facilitar el mezclado agregue la parte B a la parte A (no lo inverso). Se debe mezclar muy bien el epóxico para asegurarse que la reacción química sea la correcta. Si se va a incorporar agregado, este se mezcla después que las partes A y B se han mezclado y coloque inmediatamente.
  - Aplicación. Aplique la pasta epóxica con herramienta manual (espátula), e inmediatamente coloque el mortero cementicio para lograr una buena adherencia, si por algún motivo se retardo la aplicación y el epóxico termino su tiempo de vida, se deberá preparar la superficie y nuevamente colocar el epóxico.
  - Rendimiento. Los rendimientos de cada producto, dependen en gran medida de la textura de la superficie del concreto, la temperatura del material y del concreto. Para las reparaciones que requieren mortero, la granulometría del agregado y la trabajabilidad deseada afectan de manera importante la cantidad de epóxico necesaria.
  - Limpieza. Limpie las herramientas y el equipo con un disolvente tal como, Xileno, Xilol, Tolueno. No permita que se endurezca el epóxico en el equipo.
  
- Procedimiento de tratamiento de fisuras estructurales, en el silo.

- Objetivo. Tratar las grietas estructurales, de las fisuras estructurales de más de 1 mm hasta 3 mm en la figura 6.2, logrando la penetración del epóxico a profundidad y rehabilitar la estructura.
  - Preparación de la superficie. El concreto existente debe estar sano y limpio y bien texturizado, la trayectoria de la grieta debe estar definida y abierta con herramienta de corte a una profundidad aproximada de 0.5 a 1.0 cm.
  - Tratamiento. El tratamiento se deberá realizar con un sistema de inyección de epóxico; de baja viscosidad y alto modulo, la inyección se debe realizar a presión; insertar válvulas o puertos de polietileno de un sentido en el orificio de taladro en el frente de la grieta, las áreas alrededor del punto de entrada deben ser selladas con un gel epóxico.
  - Inyecte el material solo con una máquina de inyección de epóxico u otros medios mecánicos asegúrese que el equipo de inyección este calibrado correctamente a una dosificación de 2 a 1 (parte A a parte B) por volumen.
  - Mezclado. El rango de temperatura apropiado a la que todos los materiales deben estar es de 16 a 32 grados centígrados.  
Mezcle la parte A y B (resina y endurecedor ), por dos minutos como mínimo utilizando taladro eléctrico de bajas revoluciones y propelas que no generen aire al mezclar para facilitar el mezclado agregue la parte B a la parte A (no lo inverso). Se debe mezclar muy bien el epóxico para asegurarse que la reacción química sea la correcta y coloque inmediatamente.
  - Limpieza. Limpie las herramientas y el equipo con un disolvente tal como, Xileno, Xilol, Tolueno. No permita que se endurezca el epóxico en el equipo.
- Procedimiento de reparación de huecos, oquedades y juntas frías, con morteros especiales de reparación adicionados con látex, adicionando un puente de adherencia entre la superficie vieja y el mortero nuevo.
    - Objetivo. Lograr que los muros queden totalmente reparados de los daños...
    - Preparación de la superficie. El concreto existente debe estar sano y limpio y bien texturizado, la superficie saturada y superficialmente seca (sss).
    - Tratamiento. El tratamiento se realiza con un mortero de un solo componente, modificado con microsíllica y látex, para aplicaciones verticales, grado llana.

- El producto es polvo fluido diseñado para mezclarse con agua, añada la cantidad de agua para el tamaño de la bachada y luego agregue el producto seco, 2.4 a 2.8 l para 22.7 kg. El equipo puede ser una mezcladora o un agitador de taladro eléctrico de bajas revoluciones.
- No mezcle más material del que se pueda colocar durante un periodo de 20 minutos.
- Colocación. El producto debe ser colocado en capas de 6 a 25 mm. De espesor. Extienda con una llana y deje que endurezca antes de colocar la siguiente capa. Se pueden colocar varias capas siempre y cuando no se exceda el total de la profundidad recomendada. Si se van a colocar capas adicionales una vez que se ha endurecido el producto, ralle la superficie de la capa anterior para asegurar que la capa siguiente tenga una buena adherencia.
- Acabado. Del acabado que desee al material respecto a la textura .No agregue más agua a la superficie durante la operación de acabado. Si se necesita liquido adicional, use el auxiliar de acabado (retenedor de agua).
- Curado. Para prevenir agrietamiento de la superficie cure el mortero con un compuesto de altos sólidos.

#### Colocación del acero de refuerzo

- Colocación de anclajes horizontales en forma perpendicular al plano del muro de varillas # 4 @ 400 en toda la superficie de muros del silo ancladas con resina que trabajaran como conectores de cortante entre el concreto viejo y nuevo de acuerdo a la figura 6.4.
- Colocación de la capa de refuerzo vertical de varillas # 5 @ 200 en la cara exterior, estas varillas se anclaran en la cimentación mediante perforaciones rellenas de resina epóxica ver figura 6.4.
- Colocación de la capa de refuerzo horizontal de varillas de distinto diámetro y separación, estas varillas irán por el exterior del acero de refuerzo vertical, respetando los 50 mm de recubrimiento libre como se ve en la figura 6.4.

#### Colocación del concreto lanzado

- Una vez colocado y armado el acero de refuerzo se lanzará concreto vía seca con un espesor de 200 mm, con un  $f'c = 350 \text{ kg} / \text{cm}^2$  con una relación a/c de 0.4 y revenimiento

cero al que se le adicionara microsilica, reductor de agua que deberá ser curado con una membrana de curado emulsionada base agua.

- Antes de la colocación de la membrana de curado la cara exterior del concreto lanzado deberá ser terminada con un regleado y pulido con flota dando un acabado fino.
- Procedimiento de impermeabilización del Silo.
  - Objetivo. Impermeabilizar el concreto, con un producto líquido cementicio de penetración, para protegerlo del ataque de cloruros y agua.
  - Tratamiento. La obturación de poros capilares para brindar una excelente repelencia al agua y cloruros se logra con la penetración de la molécula de Silano en la superficie del concreto.
  - Una vez colocado y seco el producto no tiene efecto en la apariencia del concreto, el concreto tratado con Euco Guard- 100 va a provocar que el agua se "aperle" en la superficie.
  - Aplicación. Aplique con aspersor, en dos aplicaciones comenzando por la parte inferior.
  - Esta actividad deberá considerarse en un futuro como parte del mantenimiento de la estructura en cuestión
  - Rendimiento. De 3 a 4 metros cuadrados por litro.
- Una vez concluida la aplicación del impermeabilizante se retira el andamio y plataformas.

#### Procedimiento de lanzado de concreto

- Este trabajo comprende los siguientes pasos:
  - Revisión de mangueras de neopreno para asegurar que se encuentren limpias y sin residuos de concreto viejo por medio de aire a presión.
  - Lavar boquilla con agua limpia y proyectar hacia abajo hasta obtener un flujo totalmente limpio.
  - Suministro de la mezcla de concreto en unidades de 3.0 m<sup>3</sup> según los intervalos de acuerdo a la terminación de los trabajos.
  - La mezcla, en este caso es una mezcla predosificada de planta.
  - El porcentaje de humedad del agregado fino de la mezcla debe ser como máximo del 9%.



- El porcentaje de rebote del concreto aplicado será del 15 al 20% en promedio del volumen lanzado por las boquillas.
- La boquilla de proyección de este material debe ser de neopreno cónica y cilíndrica.
- Humedecimiento de la superficie lanzado agua libre de sulfatos para mejorar el proceso de adherencia del concreto lanzado.
- Aplicación de concreto lanzado vía seca sobre la pared exterior del silo con una presión mínima de  $3.0 \text{ kg/cm}^2$  y no mayor a  $4.5 \text{ kg/cm}^2$
- El equipo de lanzado deberá contar con un manómetro de 0.0 a  $7.5 \text{ kg/cm}^2$  con el objeto de controlar las presiones antes mencionadas.
- Dicho concreto deberá ser proyectado a una distancia no mayor a 1.20 m y tendrá que ser perpendicular al muro del silo con el objeto de lograr una adecuada adherencia y calidad del concreto lanzado.
- Al llegar el flujo de material, rápidamente se regulará el flujo de agua y dirigirá el chorro hacia la zona de trabajo, regulando posteriormente el agua conforme lo requiera el % de humedad de la mezcla.
- El movimiento de la boquilla será rítmicamente en forma circular con el objeto de proyectar homogéneamente el concreto.
- En caso de desviarse súbitamente el flujo del material de la boquilla, será indicio de un bloqueo parcial o desgaste en la punta de la boquilla, o que el abanico de agua sea asimétrico, por lo que deberá detenerse el lanzado y ser corregido el defecto. El lanzado defectuoso deberá limpiarse por medio de chorro de aire y a continuación se podrán realizar los trabajos de forma adecuada. Al terminar cada uno de los cinturones se retirará el material sobrante que haya salpicado el área de trabajo, así como el producto del rebote del lanzado.
- Los espesores y los plomos deberán tener un constante monitoreo topográfico para conservar el diseño de proyecto.
- A este concreto se le realizarán pruebas de control de calidad y se ensayara mediante artesa por medio del laboratorio de la concretera, en cooperación con el laboratorista designado por el contratista, estas pruebas deberán corregirse por esbeltez.

- Este procedimiento se seguirá de la misma forma para el lanzamiento de las dos capas de 10 cm cada una, teniendo cuidado de lanzar la segunda capa inmediatamente después de haber terminado la primera.
- Acabado pulido final sobre la segunda capa de concreto lanzado.
  - Inmediatamente después de aplicada la segunda capa se incorpora la brigada de albañilería para el reglado, con una regla que se apoye en las cerchas de aluminio previamente colocadas, para elaborar un cinturón horizontal de 1.80 m de altura, a continuación se procederá con otra brigada de albañilería a afinar con llana de magnesio, con el objeto de no cerrar el poro. El cierre de poro se realizará al final con llana metálica de arriba hacia abajo con movimientos circulares.
  - Inmediatamente después se procederá con el curado utilizando una membrana de curado de base agua mediante el sistema de impregnación por aspersión.
  - En caso de presentarse una lluvia intensa deberán suspenderse los trabajos de lanzamiento, se protegerá la superficie pulida, terminada y curada por medio de plásticos o yute.

#### Fabricación del concreto lanzado

- Objetivo
  - Establecer el control de calidad del concreto lanzado, desde la preparación de la materia prima, producción, suministro, muestreo y ensaye de muestras.
- Alcance
  - Información referente al concreto lanzado  $a/c = 0.40$ , con  $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2 \text{ min.}$ , que se suministrara para la reparación del silo.
- Agregados
  - Arena de río lavada procedente del banco de Cardel
  - Arena de río, mezclada con polvo de trituración, procedente del banco de Limones.
  - Grava triturada caliza de 3/16" a 5/16", procedente del banco de San Cristóbal, ubicado en Orizaba.
- Aditivos
  - Microsílica msa.
  - Fibra de polipropileno monofilamento.

- Diseño  $a/c = 0.40$ ,  $f'c = 350 \text{ kg / cm}^2$ 
  - Las mezclas de concreto lanzado se calcularon para  $1 \text{ m}^3$  de concreto incluyendo agua y en planta se le aumentara el 20% del volumen de todos los ingredientes para que se suministre  $1.2 \text{ m}^3$
  - (Finalmente se entregará  $1 \text{ m}^3$  de ingredientes sin incluir agua)
- Pruebas para controlar la calidad del concreto
  - La muestra de concreto lanzado se obtendrá por medio de artesas de madera (600 en las esquinas,  $50 \times 50 \text{ cm}$  en la base y  $12 \text{ cm}$  de altura), directamente fabricadas en el lugar de lanzado. El constructor entregara 5 artesas al laboratorio de la concretera.
  - A las 24 horas del muestreo, las artesas se trasladarán al laboratorio para su descimbrado y curado (el laboratorio cuenta con sistema de humidificación y temperatura controlada).
  - A la edad de 6 días se realizará el corte de las artesas, con disco metálico, para obtener cubos de  $10 \text{ cm}$ , que se continuarán curando hasta la fecha de los ensayos (7, 28 y 90 días). Por cada edad de prueba se ensayaran 3 núcleos.
- Frecuencia de los muestreos
  - Cada  $20 \text{ m}^3$  o cada cinturón ( $1.8 \text{ m}$  de altura)
- Almacenamiento de agregados
  - Para evitar contaminaciones, volatilización por corrientes de aire, alta humedad por lluvias, etc., las arenas se cubrirán con lonas y se propone fabricar separaciones soportadas con tablones alrededor de los materiales, para evitar el humedecimiento por las corrientes de agua.
  - La humedad de las arenas debe contener un máximo del 9 % para evitar problemas en el lanzado.
  - Los agregados se almacenaran en el patio que dispondrá el área de cementos en el centro de distribución de Veracruz.
- Preparativos y producción en planta
  - Se dispondrá de 4 tolvas en el barco de agregados, para almacenar la arena de Limones, arena de Cardel, grava de San Cristóbal y grava de Limones, con lo que no se afectará la producción convencional de la planta.

- El orden de adición de los ingredientes del concreto y los aditivos se realizará en el siguiente orden (cargas de 3 m<sup>3</sup> para evitar que se desborden los materiales de la unidad):

Grava y arena

Fibra

Microsílica

Cemento

- Cada dosificación correspondiente a cada olla contará con su respectiva impresión del sistema automatizado de la planta, que estará disponible para cuando se requiera verificar el volumen suministrado.
  - El suministro dependerá del programa que enviara el constructor 3 días antes de los colados.
  - Cada unidad llevará su respectiva remisión que ampara el volumen del concreto solicitado y que será recibida y firmada por el cliente en el momento de la descarga.
- Suministro del concreto lanzado
    - La homogenización de los ingredientes de la mezcla (cemento, arena, grava, microsíllica y fibra) se realizará en la unidad moto revolvedora. Una vez fabricado el concreto, este se descargará en seco sobre un lugar accesible, limpio y libre de contaminaciones (artesa o manta); el colocador del concreto se hará cargo de depositar el concreto en las tolvas de las lanzadoras por medio de palas.
  - Reporte de resultados
    - La concretera entregará los reportes de resultados de resistencia de cubos del concreto lanzado a la compañía constructora, cuando se alcancen las resistencias a las edades especificadas (7, 28 y 90 días).
  - Mapeo
    - El laboratorista realizará un mapeo del silo, donde se puedan localizar fácilmente los lugares donde se efectúen los muestreos, así como la ubicación de cada volumen de lanzado sobre la estructura.

## 6.4. Catálogo de conceptos y volúmenes de obra

A la relación de conceptos que serán ejecutados en la obra, con la cantidad de obra y su unidad de medición se les conoce como “Catálogo de Conceptos y Volúmenes de Obra”, estos conceptos se integran dentro de las partidas que tiene la virtud de integrar la totalidad de los conceptos en no más de 20 ó 25 obras partidas, el caso como el de las más grandes y laboriosas como en el caso de un hospital que llega a tener hasta 2 mil conceptos. Para esta obra en la figura 6.7 se puede ver una hoja típica de catalogo de conceptos, en el catálogo se tienen 5 partidas principales que agrupan a 40 conceptos de obra.

Planta Orizaba ECL												
Título: LICITACION CIVIL		CATALOGO DE CONCEPTOS						Planta: ORIZABA		Fecha: 01-Feb-		
Ubicación: PLANTA ORIZABA								Elaboró: D.C.S.		Hoja:		
Proyecto: EQE REPARACIÓN SILO DE CLINKER								Revisó: H.O.P.		Revisión:		
								Aprobó: A.S.G.		T. cambio:		
PARTIDA	CONCEPTO	CANT.	UNIDAD	PRECIO UNITARIO						P.U.	TOTAL	NOTAS
1.0	PRELIMINARES											
1.1.	DEMOLICIÓN DE CONCRETO REFORZADO EN MUROS DE SILO AL NIVEL +1 57.863 EN APOYOS DE ARMADURA A-1 Y A-3 ABRIENDO CAJAS DE 1.90 X 0.40 X 1.90 METROS. INCLUYE: RECOPIACIÓN, CARGA, ACARREOS HORIZONTALES Y VERTICALES, MANO DE OBRA, EQUIPO, HERRAMIENTA, SISTEMAS DE IZAJE Y ELEVACIÓN DE MATERIALES Y PLATAFORMAS DE TRABAJO Y LIMPIEZA EN LOS FRENTES DE TRABAJO.	14.44	M3							2,112.51	30,504.64	
1.2.	DEMOLICIÓN DE CONCRETO REFORZADO EN MUROS DE SILO AL NIVEL 157.863 EN APOYOS DE ARMADURA A-4, A-8 Y A-7 ABRIENDO CAJAS DE 1.90 X 0.40 X 0.70 METROS. INCLUYE: RECOPIACIÓN, CARGA, ACARREOS HORIZONTALES Y VERTICALES, MANO DE OBRA, EQUIPO, HERRAMIENTA SISTEMAS DE IZAJE Y ELEVACIÓN DE MATERIALES Y PLATAFORMAS DE TRABAJO Y LIMPIEZA EN LOS FRENTES DE TRABAJO.	5.32	M3							2,112.51	11,238.55	
1.3.	DEMOLICIÓN DE CONCRETO REFORZADO EN MUROS DE SILO A L NIVEL +145.463 EN APOYOS DE TRABE T-1 ABRIENDO CAJAS DE 2.0 X 0.40 X 1.10 METROS. INCLUYE: RECOPIACIÓN, CARGA, ACARREOS HORIZONTALES Y VERTICALES, MANO DE OBRA, EQUIPO, HERRAMIENTA SISTEMAS DE IZAJE Y ELEVACIÓN DE MATERIALES Y PLATAFORMAS DE TRABAJO Y LIMPIEZA EN LOS FRENTES DE TRABAJO.	7.04	M3							2,112.51	14,872.07	
1.4.	DEMOLICIÓN DE CONCRETO REFORZADO EN MUROS DE SILO A L NIVEL +145.463 EN APOYOS DE ARMADURAS ABRIENDO CAJAS DE 2.0 X 0.40 X 0.85 METROS. INCLUYE: RECOPIACIÓN, CARGA, ACARREOS HORIZONTALES Y VERTICALES, MANO DE OBRA, EQUIPO, HERRAMIENTA SISTEMAS DE IZAJE Y ELEVACIÓN DE MATERIALES Y PLATAFORMAS DE TRABAJO Y LIMPIEZA EN LOS FRENTES DE TRABAJO.	8.16	M3							2,112.51	17,238.08	

Figura 6.7 Catálogo de conceptos

## 6.5. Presupuesto y precios unitarios.

El presupuesto es la presentación ordenada de los conceptos de una obra con la descripción de alcances, después la unidad en que se miden y la cantidad que de él se ejecutará, seguida de un precio unitario estimado o esperado y el importe obtenido.

La suma de todas las partidas dará el importe de la obra como se puede ver en la figura 6.8, el cálculo del presupuesto inicia con un análisis cuidadoso del proyecto para

determinar cuáles son los conceptos por ejecutar y para cada uno analiza su costo directo, desglosándolo en materia de mano de obra, equipo y herramientas. Este costo directo afectándolo por el costo indirecto y la utilidad completa el precio unitario (PU) del concepto.

Teniendo todos los precios unitarios de los conceptos multiplicados por sus cantidades de obra, se tiene el valor de la obra que es el presupuesto.

Título: Licitación Civil										Planta:	Orizaba	Fecha:	22-Dic-11
Proy: OZ Planta Orizaba										Elaboró:		Hoja:	
Reparación Silo de Clinker										Revisó:		Revisión:	"A"
Catalogo de Conceptos										Aprobó:		T. Cambio:	\$13.50
Partida	C o n c e p t o	Cant.	Unid.	Pot.	Pes o kg	Precio Unitario					Precio	Final	Notas
						Mat.	Eqpo.	M.O.	Inst.	Flete			
<b>Resumen de Partidas:</b>													
1.0	Preliminares											\$7,224,033.85	}
2.0	Preesfuerzo Horizontal											\$6,867,156.00	
3.0	Preesfuerzo Vertical											\$1,631,883.20	
4.0	Refuerzo en Huecos y Concreto en Muros											\$18,472,361.20	
5.0	Estructura de Acero											\$663,603.50	
6.0	Limpieza											\$329,840.64	
	Ingeniería												
	Permisos												
	Andamios												
<b>Total (Pesos)</b>											<b>\$35,188,878.39</b>		
<b>Total (USD)</b>											<b>\$2,606,583.58</b>		
<b>Reserva Estrategica</b>											<b>\$8,797,219.60</b>		
<b>Total (Pesos)</b>											<b>\$43,986,097.99</b>		
<b>Total (USD)</b>											<b>\$3,258,229.48</b>		

**Figura 6.8 Presupuesto de obra**

### Análisis de precios unitarios

El análisis de precios unitarios es muy similar en cualquier tipo de construcción. Para calcularlos se requiere conocer los alcances de cada concepto, los insumos desglosados en materiales, mano de obra y equipo como ejemplo se puede ver la figura 6.9, en donde la cantidad de cada uno, su costo de adquisición así como la cantidad que de ellos se ejecutará en la obra.

Cuando estos precios se calculan para insumos realizados en la obra, su análisis se conoce como costo básico como el concreto, los costos básicos no se afectan de indirecto, pues al participar dentro de otro precio se duplicaría.

### Integración del Precio Unitario

Los precios unitarios se componen de: costo directo, costo indirecto y la utilidad.

En el primer costo intervienen los insumos, en la segunda los cargos por administración y en la tercera la utilidad bruta al valor de aplicar impuestos sobre la renta (ISR) y el cargo por participación de los trabajadores en la utilidad (PTU).

La primera se da en valores absolutos, la segunda y la tercera como porcentaje de la primera.


$$PU = CD + CI + U$$

Donde:

CD: materiales + mano de obra + equipo y herramientas

CI: porcentaje (administración + financiamiento + impuestos + otros)

U:  $(CD + CI) + (\% (U_{\text{neto}} / (ISR + PTU)))$

						
Análisis de Precio Unitario						
Descripción						
Clave: 1.8						
Suministro y aplicación de adhesivo desde la superficie exterior del muro del silo a base de resina epóxica sikadur n 35 o similar, a una altura variable de 0.0 hasta 57.863 m, incluye: suministro, aplicación, desperdicio, almacenamiento, operación, mantenimiento, traslados, movimientos, mano de obra, equipo, herramienta, equipo de seguridad, sistema de izaje y elevación de materiales, plataformas de trabajo y limpieza.			Unidad:	ml		
			Cantidad:	25,000.00		
			P. U.:	\$ 179.53		
			Total:	\$ 4'488,250.00		
C	Clave	D: R Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Total
<b>Materiales</b>						
	2010-003	Sikadur 35.	unidad	0.02783	\$3,250.00	\$90.45
<b>Total de Materiales</b>						<b>\$90.45</b>
<b>Mano de Obra</b>						
	+ 02-0410	X Cuadrilla No. 41 (1 Albañil + 1 Ayudante).	jor	0.02395	\$1,892.85	\$45.33
<b>Total de Mano de Obra</b>						<b>\$45.33</b>
<b>Equipo</b>						
	11-2012	Balsa.	dia	0.02395	\$656.36	\$15.72
<b>Total de Equipo</b>						<b>\$15.72</b>
					<b>Costo Directo</b>	<b>\$151.50</b>
					<b>Indirectos ( 18.500%)</b>	<b>\$28.03</b>
					<b>Precio Unitario</b>	<b>\$179.53</b>
** CIENTO SETENTA Y NUEVE PESOS 53/100 M.N. **						

**Figura 6.9 Detalle de análisis de precios unitarios**


## Integración de cuadrillas

Para el cálculo de precios unitarios es conveniente manejar cuadrillas, denominación con la que se conoce a un grupo de trabajadores que desarrollaran una actividad específica.

El importe de cada cuadrilla está en función de los salarios vigentes en el mercado multiplicados por el factor de salario real, como se puede ver en la figura 6.10.

### Factor de salario real

A un trabajador se le contrata por una cantidad mensual, semanal o diaria, pero esta cantidad se incrementará con los diversos cargos que por prestaciones obligatorias o voluntarias recibirá, como las que fija la Ley Federal del Trabajo (LFT), las del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), las del Instituto Nacional para la Vivienda de los Trabajadores (Infonavit), las del Sistema de Ahorro para el Retiro (SAR), el pago de impuestos sobre nóminas y alguna otra prestación convenida con el trabajador como los días festivos tradicionales no obligatorios. La cantidad real con que se contrata al trabajador se denomina Factor de Salario Real (FSR).



**P**ROMOTORA Y  
**D**ESARROLLADORA DE  
**C**ONSTRUCCION, S.A. DE C.V.

Catálogo de Mano de Obra							
C	Clave	D: R	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Total
+	02-0020		Cuadrilla No. 2 ( 2 Ayudantes ).	jor			
	00-0010		Ayudante.	jor	2.00000	\$432.65	\$865.30
	01-1000		Cabo.	jor	0.10000	\$1,297.95	\$129.80
	01-2000		Promotor de seguridad.	jor	0.10000	\$865.30	\$86.53
	00-0001		Herramienta menor.	(%)mo	0.05000	\$1,081.63	\$54.08
	00-0003		Equipo de seguridad.	(%)mo	0.20000	\$1,081.63	\$216.33
						<b>Suma</b>	<b>\$1,352.04</b>

**Figura 6.10 Análisis de precio de Integración de cuadrillas**



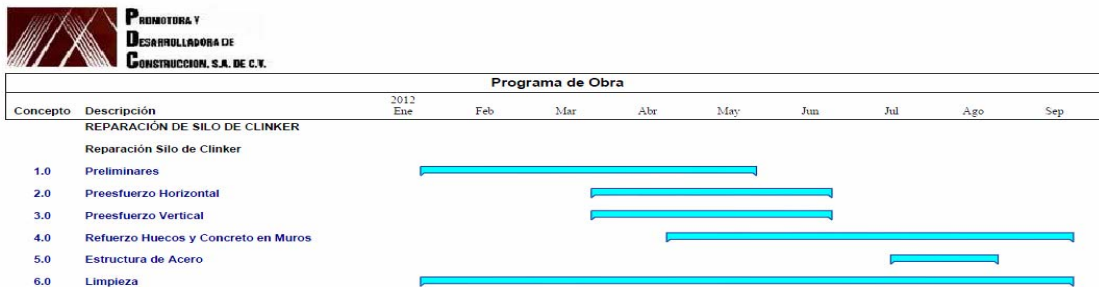
## 6.6 Programa de ejecución y recursos

El sistema que más frecuentemente se usa para determinar los tiempos de inicio y término de una obra y los de cada una de sus actividades es la ruta crítica, que equivale a la mínima duración de la construcción; se compone de la suma del menor tiempo de ejecución de las actividades que no aceptan holgura y que forzosamente se deberán realizar de manera secuencial desde el inicio hasta el final de la obra.

Para elaborar un programa de este tipo, se hará un diagrama de flujo del proceso constructivo en el se ordenen y sigan las actividades conforme a la secuencia que seguirán, se les asigna duración y se obtienen los tiempos de inicio y fin, que se convierten en fechas de ejecución.

El diagrama se estructura a base de actividades y precedencias que se ligan en función de buscar el trabajo simultáneo.

Para el cálculo de este programa de ejecución mediante el método de la ruta crítica se usan paquetes de software de programación como el Microsoft Project, en estos programas se incluye presupuesto, programación y control de obra así como el control administrativo de la obra.



1

## 6.11 Programa resumido de obra

## Ruta crítica

Para programas por ruta crítica es conveniente seguir las siguientes actividades:

1. Determinar para cada actividad las que son consecuentes o subsecuentes.
2. Elaborar el diagrama de flujo.
3. Determinar mediante una tabla que incluya los rendimientos, volúmenes de obra, los tiempos de ejecución para cada actividad.
4. Con los datos anteriores, obtener las fechas de inicio y terminación de las actividades de la obra.
5. Verificar que el tiempo de ejecución sea igual o menor que el requerido
6. Ajustar, reduciendo el tiempo de ejecución si es necesario
7. Expresar las fechas de inicio y terminación en días calendario.
8. Los resultados se presentarán gráficamente en forma comprensible mediante el diagrama de barras o Gantt como ejemplo se puede ver la figura 6.11.
9. También mediante esta presentación grafica se pueden tener programas usando la gráfica de Gantt como los programas de ejecución de recursos ver figura 6.12.

C Descripción		Total	2012								
			Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
<b>REPARACIÓN DE SILO DE CLINKER</b>											
Reparación Silo de Clinker											
1.0	Preliminares	\$7'224,033.85	\$647,175.28	\$1'978,310.00	\$1'757,766.06	\$1'079,310.00	\$1'632,270.21				
2.0	Preesfuerzo Horizontal	\$6'867,156.00			\$628,242.78	\$2'209,016.21	\$2'401,103.60	\$1'728,794.61			
3.0	Preesfuerzo Vertical	\$1'631,883.20			\$126,629.00	\$624,811.44	\$670,658.63	\$410,822.74			
4.0	Refuerzo Huecos y Concreto en Muros	\$10'472,361.20				\$992,316.00	\$2'516,603.66	\$2'637,607.33	\$2'663,939.40	\$2'516,603.66	\$2'696,207.42
5.0	Estructura de Acero	\$663,603.50							\$2'419.66	\$402,182.74	
6.0	Limpieza	\$329,840.64	\$12,860.03	\$39,409.53	\$41,079.72	\$39,409.63	\$42,836.16	\$40,266.16	\$41,122.99	\$42,836.16	\$39,128.78
<b>TOTAL PARCIAL:</b>		<b>\$30'188,878.39</b>	\$660,126.21	\$2'117,720.43	\$2'483,517.94	\$6'443,994.03	\$8'363,602.86	\$8'767,491.84	\$2'966,481.96	\$4'261,623.94	\$2'624,419.20
<b>TOTAL ACUMULADO:</b>			\$660,126.21	\$2'777,846.64	\$4'761,364.58	\$10'705,358.61	\$18'568,961.46	\$24'236,453.30	\$28'302,935.26	\$32'564,559.19	\$35'188,978.39
<b>% PARCIAL:</b>			1.592%	4.881%	7.068%	16.471%	23.767%	16.390%	11.272%	11.111%	7.468%
<b>% ACUMULADO:</b>			1.592%	6.473%	13.531%	29.002%	52.769%	69.159%	80.431%	92.542%	100.000%

## 6.12 Programa de ejecución de recursos

Proyecto de rehabilitación de un Silo de concreto  
reforzado para almacenamiento de Clinker

CAPÍTULO 7

# **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## Capítulo 7 Conclusiones y recomendaciones.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, se pueden considerar algunas conclusiones importantes para orientar a los diseñadores y constructores de las estructuras de almacenamiento conocidas como silos, con respecto a los daños y deficiencias que se encuentran comúnmente debido a que regularmente el diseño, construcción y mantenimiento de estas estructuras se realiza muy someramente sin considerar la complejidad que presentan por sus dimensiones, variabilidad de cargas, grandes masas sísmicas que producen fuerzas laterales muy grandes, procedimientos constructivos que requieren de mucha supervisión por la velocidad de construcción, falta de mantenimiento preventivo, mismos que provocan la necesidad de establecer casi como parte integral del proyecto procesos de análisis, diseño y construcción que permitan rehabilitar (reparación y refuerzo), para restituir y mejorar la capacidad de la estructura de soportar las cargas gravitacionales, dinámicas y sísmicas a las que estará sometida durante su vida útil.

Conclusiones:

- Diseño: los problemas principales que producen daños en silos.

La mayoría de los silos se diseñan tomando en consideración los reglamentos convencionales tomando en cuenta sólo las fuerzas de tensión anulares, sin considerar los efectos de los momentos flexionantes y cortantes producidos por las condiciones de operación como carga y descarga excéntrica del material.

La mayoría de los silos diseñados antes del 2005 no toman en consideración la excentricidad en la descarga que produce sobrecargas y efectos de momentos y cortantes en el plano de los muros.

Hasta antes de 1997 las cargas de empuje de los materiales estaban sub estimadas, ya que los reglamentos consideraban un factor de empuje  $k = (1 - \text{sen } \rho / 1 + \text{sen } \rho)$  a partir de este año se usa un factor de empuje  $k = (1 - \text{sen } \rho)$  donde se obtiene un factor de empuje mayor y por lo tanto la fuerza de tensión calculada con él es mayor, que refleja claramente buena parte de los daños por fisuramiento y a su vez por contaminación ambiental que produce corrosión.

Antes de 1985 las fuerzas sísmicas de diseño eran también sub estimadas, ya que los coeficientes sísmicos eran menores y por lo tanto las fuerzas obtenidas actualmente son

mayores, lo que produce un daño similar al mencionado por efecto de las cargas de tensión anular.

Los métodos de análisis y de diseño no consideraban la evaluación de todas las condiciones de carga a la que los silos se encuentran sometidos durante su vida útil, ahora con los métodos de análisis y diseño mediante métodos finitos se pueden obtener diseños de silos que cubran la mayoría de las condiciones y por lo tanto se tomen en consideración los esfuerzos de descarga excéntrica, momentos flexionantes y cortantes en el plano anular del muro.

- Construcción, los problemas principales en este tema son:

Es muy común que durante el deslizado de los muros no se coloquen aditamentos especiales para lograr que el acero de refuerzo cumpla con el recubrimiento de concreto especificado.

Frecuentemente se considera que el deslizado de la estructura es una carrera contra el tiempo lo que produce una serie de defectos, falta de tiempo para el vibrado adecuado del concreto, mala colocación del acero de refuerzo, flotado de varillas, falta de tiempo para acabar y curar correctamente el concreto.

Aplicación de membranas de curado a base de parafina y de mala calidad, que producen cambios de color en el concreto.

- Mantenimiento, siendo los problemas principales en este tema:

Falta de inspección como mantenimiento predictivo que logre detectar a tiempo fisuras y fallas que permitan la entrada al interior del concreto de elementos ambientales tales como agua, azufre, cloro que modifiquen el PH y produzcan corrosión en el acero de refuerzo.

La falta de conocimiento y el pensamiento de que las estructuras de concreto son eternas y no requieren mantenimiento regular de reparación, como sellado de fisuras y daños para evitar que la estructura requiera de la realización en corto tiempo de mantenimiento mayor.

Recomendaciones:

De lo anterior se puede considerar sin riesgo a equivocarse que los diseñadores y constructores de silos están involucrados con frecuencia en la realización de proyectos de rehabilitación (reparación, refuerzo y mantenimiento).

Esto, como ya se menciona, se debe principalmente a las condiciones particulares de estas estructuras que están sometidas directamente a la intemperie, construidas en su

mayoría con reglamentos, códigos y prácticas que ya no son vigentes y con condiciones de cargas que son menores que las que en la realidad soportan durante su vida útil.

Por lo que ante la gran cantidad de daños y fallas que van desde fisuramientos hasta fallas catastróficas de silos que durante los últimos años se han presentado en México y en el mundo las recomendaciones que resultan del trabajo aquí desarrollado son:

- En todas las empresas que son propietarias de silos, se debe establecer un plan de inspección detallado con el que se puedan detectar y localizar todos los daños potenciales de producir fallas en la estructura.
- Con esta información, en los casos necesarios, desarrollar los proyectos de ingeniería para la rehabilitación (reparación y reforzamiento) que cumplan con las necesidades de nuevas cargas de acuerdo con los reglamentos y códigos vigentes, considerando también las acciones de tipo sísmico.
- Ejecutar con el debido cuidado y supervisión los mencionados proyectos, aplicando los mejores estándares de calidad de materiales y procedimientos constructivos, siguiendo a detalle las especificaciones y cuidando como punto primordial en la actualidad la seguridad de los trabajadores que ejecutaran la construcción.
- Es importante aplicar en la rehabilitación de la estructura una protección adecuada contra la intemperie, como puede ser; la aplicación de mezclas de concreto que cumplan con requisitos de durabilidad, o la protección de productos impermeabilizantes en la superficie de los muros del silo.

Proyecto de rehabilitación de un Silo de concreto  
reforzado para almacenamiento de Clinker

# **BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CONSULTADAS**

## **Bibliografía y referencias consultadas**

- ACI (1997). "Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials ACI 313-97".
- ACI (2005). "Building Code and Commentary for Structural Concrete ACI 318-05".
- México (2002). " Manual de Diseño de Obras Civiles Diseño por Sismo".
- México (2002). " Manual de Diseño de Obras Civiles Diseño por Viento".
- Bentley (2005). "Staad-Pro Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures", Bentley Systems.
- EN 1991-4 (2006). "Eurocode 1: Actions on Structures, Part 4: Actions on Silos and Tanks", Central Secretariat: rue de Stassart 36, B-1050 Brussels.
- FEMA (2000). "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings FEMA 356", Federal Emergency Management Administration, p 4-18.
- Safarian S.S. (1985). "Design and Construction of Silos and Bunkers", Van Nostrand Reinhold Company.
- IBC (2006). "International Building Code", International Code Council.
- "Estudio de diagnosis de la super estructura del Silo para almacenamiento de Clinker", Sika Mexicana, S.A. de C.V. Centro de diagnóstico del concreto.
- "Estudio de Mecánica de suelos para el Silo de Clinker", Geotec, S.A. de C.V.