

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**

**Facultad de Ingeniería**

**Implicaciones en el diseño de silos de concreto  
con cono invertido para cemento**

Mario Vinicio López Quijada

Guatemala,  
2009



## **Implicaciones en el diseño de silos de concreto con cono invertido para cemento**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**

**Facultad de Ingeniería**

**Implicaciones en el diseño de silos de concreto  
con cono invertido para cemento**

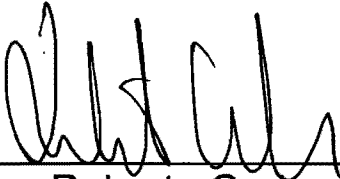
Trabajo de graduación presentado por  
Mario Vinicio López Quijada  
para optar al grado de Maestría en Ingeniería Estructural

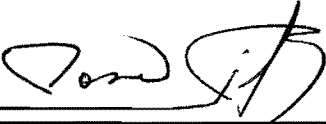
Guatemala,  
2009

Vo. Bo.:

(f)   
Arq. María Elena Ortiz

Tribunal Examinador:

(f)   
Ing. Roberto Godo

(f)   
Ing. José Carlos Gil

(f)   
Arq. María Elena Ortiz

Fecha de aprobación: Guatemala, 29 de Mayo de 2009.

## **PREFACIO**

El siguiente trabajo de investigación fue elaborado luego de años de estudio e investigación de varios ingenieros estructurales especializados en el campo del diseño y construcción de silos de concreto para cemento.

Sin embargo, el mismo está limitado al estudio de los silos de concreto con cono invertido, utilizados en todo el mundo para el almacenamiento y vaciado de cemento.

Gran parte de los conocimientos expresados provienen de estudios realizados por ingenieros de países como Australia, Inglaterra, Irlanda y Estados Unidos de América y son interpretados y referidos a situaciones reales.

## ÍNDICE GENERAL

	Página
PREFACIO	v
LISTA DE CUADROS	viii
LISTA DE ILUSTRACIONES	ix
RESUMEN	x
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
3. SILOS DE CONO INVERTIDO	5
3.1 Sistema de descarga del silo	5
3.2 Aplicabilidad del Eurocode 1991-4 para silos de cono invertido	8
4. PRESIONES DESARROLLADAS DURANTE EL LLENADO DE UN SILO	12
4.1 Naturaleza de las presiones de llenado	12
4.2 Parámetros del material recomendados por códigos	14
5. PRESIONES DE CIRCULACIÓN DURANTE LA DESCARGA DE UN SILO	18
5.1 Naturaleza general de las presiones de descarga	18
5.2 Modelos de carga definidos en tres códigos diferentes	20
6. CASO DE ESTUDIO; SILO DE CEMENTO DE 10,000 TONELADAS DE CAPACIDAD	22
6.1 Antecedentes del caso de estudio	22
6.2 Suposiciones en la que está basada la investigación de diseño comparativo	23
6.3 Comparación de los resultados del análisis	26
6.4 Comparación de los resultados del diseño para el refuerzo en la dirección de aro	32
6.5 Esfuerzos de corte	36
6.6 Cálculo de fuerzas verticales y presiones horizontales en el silo utilizando el Eurocode EN1991-4	38
7. SEÑALES DE ADVERTENCIA PARA OPERADORES DE PLANTA	47
7.1 Silos con mucho riesgo de falla	47
7.1.1 Silos de celda sencilla con refuerzo convencional (Opuestos al post-tensado)	48
7.1.2 Silos homogenizadores	48
7.1.3 Silos viejos	49
7.1.4 Silos que tienden a estar llenos	49
7.1.5 Silos CI a diferencia de silos ME	49

7.2 Procedimientos a seguir	Página
8. CONCLUSIONES	50
9. RECOMENDACIONES	52
10. BIBLIOGRAFÍA	54
APÉNDICE	56
	57

## LISTA DE CUADROS

Cuadro:	Página
1. Número típico de segmentos de aire radiales en silos ME	6
2. Parámetros recomendados del material en códigos	15
3. Datos tabulados de cálculo de fuerzas verticales	41
4. Datos tabulados de cálculo de presiones horizontales	44

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración:	Página
1. Silo típico tipo ME	6
2. Silo típico tipo CI	7
3. Presiones de pared no uniformes resultantes de la continua extracción de material de un solo punto excéntrico de descarga. (Elevación)	8
4. Presiones de pared no uniformes resultantes de la continua extracción de material de un solo punto excéntrico de descarga. (Planta)	9
5. Presiones de pared no uniformes resultantes de la formación de canales de circulación encima del punto de descarga. (Elevación)	10
6. Presiones de pared no uniformes resultantes de la formación de canales de circulación encima del punto de descarga. (Planta)	10
7. Variación de la presión horizontal de pared de llenado como es predicha en todos los códigos	13
8. Modelos de presión de descarga definidos por cuatro códigos diferentes	20
9. Detalles del silo utilizado como base para el caso de estudio	24
10. Comparación en 2D de las presiones cerca de la base de la pared	25
11. Desplazamientos radiales	26
12. Tensiones de aro	27
13. Momentos flexionantes en la dirección de aro	28
14. Fuerzas de corte en un plano vertical a través de la pared de silo	30
15. Diagrama comparativo de la fuerza de corte del patrón de carga del Eurocode y el código australiano	31
16. Diagrama comparativo del momento flexionante, del patrón de carga del Eurocode y el código australiano	31
17. Comparación del requerimiento de refuerzo en la dirección de aro	34
18. Delaminación de la pared del silo de la Planta Höver	37
19. Gráfica de las fuerzas verticales en una profundidad z	42
20. Gráfica de las presiones horizontales en una profundidad z	45

## RESUMEN

En la actualidad muchos silos de concreto existentes se han modificado para tener un vaciado más rápido. Este proceso se realiza por medio de descargas excéntricas, lo que ha provocado problemas estructurales en los mismos. Existe una diferencia sobre este tema entre el código ACI y el Código Europeo (Eurocode), por lo que se pretende ilustrar la manera de realizar los cálculos que sugiere cada uno de éstos, con el presente trabajo de graduación. El enfoque de estudio e investigación en el mismo, son los silos de concreto con cono invertido para cemento, los cuales garantizan la descarga excéntrica, que produce cargas asimétricas en las paredes de dichos silos.

Los silos han sido diseñados con normas DIN, código ACI 313 y normas estándar australianas, y la mayoría de éstos se han comportado de manera satisfactoria durante años, pero en la actualidad han crecido evidencias que las cargas sugeridas en estos códigos para el diseño de los silos, no proveen una predicción realista donde las descargas son excéntricas. Este es el caso particular de los silos con cono invertido. La más reciente norma europea, Eurocode EN 1991-4, 2006, difiere significativamente de los códigos anteriores en los patrones de carga y las tensiones, así como de momentos altos y cortes, extendiéndose en la totalidad de la altura de la pared del silo.

Este trabajo de graduación pretende hacer una investigación analítica de las cargas en el silo, comparando el código ACI 313 y el Eurocode EN 1991-4, 2006. El mismo se realizará tomando como caso de estudio un silo de concreto con cono invertido para cemento con una capacidad de 10,000 toneladas y una relación altura/diámetro de alrededor 2, con lo que se pretende dar lineamientos para el análisis y diseño de este tipo de silos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Recientes trabajos de investigación, publicaciones y observaciones, sugieren que los métodos recomendados para determinar las cargas aplicadas sobre los silos, descritos en los códigos "tradicionales", incluyendo El Código Australiano AS3774, el Código Alemán DIN1055 y el Código Estadounidense ACI313-97, podrían ser peligrosamente no conservadores, particularmente respecto al vaciado excéntrico. De especial preocupación, son los silos de cemento y silos de alimentos sin procesar que poseen un cono de descarga invertida.

Por su naturaleza, los silos de cono invertido garantizan una descarga excéntrica con cargas asimétricas impuestas sobre la pared de silo durante dicha descarga.

Los códigos tradicionales describen en primer lugar, cargas simétricas en las paredes del silo, las cuales transmiten grandes tensiones axiales de aro, mientras los momentos flexionantes y la fuerza de corte aplicadas a la pared son reducidas. Los códigos alemanes y estadounidenses refieren que las cargas asimétricas pueden generar momentos de pared, pero ninguno de ellos provee orientación definitiva sobre cómo evaluar tal carga. El Código Australiano AS3774-1996 especifica un método para describir cargas asimétricas, pero los momentos generados por esta carga, son relativamente pequeños y están restringidos a la región más baja del silo.

Desde que el concepto de diseño fue desarrollado por Ibau Hamburg en 1977, literalmente miles de silos de cono invertido han sido diseñados de acuerdo con la DIN, ACI y Códigos Australianos, y la mayoría han funcionado satisfactoriamente por años.

A pesar de esto, hay una creciente evidencia que indica que estos códigos no predicen realmente cargas donde la descarga es excéntrica, que es particularmente el caso de los silos de cono invertido.

El código recientemente publicado, el Eurocode EN1991-4 2006, difiere significativamente de los códigos previos respecto a los patrones de carga que resultan de las bajas tensiones de aro, pero mucho más altos valores de momentos y cortes, extendidos sobre la altura total de la pared de silo.

Este trabajo de graduación documenta investigaciones analíticas emprendidas para comparar el cálculo de carga de este tipo de silos, entre el tradicional Código Australiano (AS), el DIN y el ACI, en comparación con el nuevo Eurocode EN1991-4 2006. El trabajo de graduación utiliza un silo de cemento de 10,000 toneladas como caso de estudio, sin embargo los resultados de esta investigación son aplicables a cualquier silo de cono invertido con una proporción de altura/diámetro de alrededor 2.

El trabajo de graduación compara los resultados de análisis para las deformaciones, las tensiones de aro, los momentos y cortes. En la última parte sin embargo, se realiza la comparación más importante, se relaciona la cantidad de refuerzo requerido para satisfacer la carga especificada por los diferentes códigos. Además se presenta un ejemplo práctico en el cual se desarrolla el procedimiento adecuado de cálculo para determinar las presiones sobre la pared del silo, las cuales permiten consecuentemente poder calcular los cortes y momentos para obtener el refuerzo que deben tener las paredes del silo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 General:**

- Enlistar, analizar y demostrar las diferencias entre el código Eurocode EN1991-4 2006 y los códigos ACI 313-97, código Australiano AS3774 y el código Alemán DIN1055-6, en todo lo concerniente al diseño de silos de concreto con cono invertido para cemento.

### **2.2 Específicos:**

- Proveer lineamientos adecuados para el análisis y diseño estructural de silos para cemento con descarga excéntrica, específicamente con cono invertido.
- Recomendar el seguimiento de una norma específica luego de la comparación de parámetros de diseño de cada uno de los códigos.
- Analizar de manera integral, todos los efectos a los que está supeditado un silo de cono invertido, sobre todo los efectos de corte y momento flexionante que ocurren cuando la descarga del material del silo es de forma excéntrica.
- Comprender por medio del caso de estudio, la elaboración de los cálculos correspondientes a las fuerzas verticales y presiones horizontales que se producen en los silos de cono invertido durante la descarga excéntrica, para el posterior diseño estructural de dicha estructura, utilizando como material principal elementos de concreto armado.

- Establecer los lineamientos complementarios a los de diseño estructural en silos de cono invertido, específicamente los constructivos. Con ello se espera que dichas estructuras se comporten de manera satisfactoria en su período de vida útil.
- Ejemplificar la teoría expuesta sobre silos de cono invertido en un caso real de aplicación.

### **3. SILOS DE CONO INVERTIDO**

#### **3.1 Sistema de descarga del silo**

El concepto del silo de cono invertido fue desarrollado por Ibau Hamburg en 1976 y ahora el sistema domina la industria de cemento con más de 2,500 silos de cono invertido que existen a nivel mundial. El sistema de Ibau Hamburg involucra la construcción de una estructura de cono de 60° dentro del silo que moldea la parte inferior de la zona de almacenamiento y transfiere la carga del producto a la circunferencia del silo.

En silos de gran diámetro, específicamente de más de 12 y 13 metros, el cono invertido es estructuralmente muy eficiente, y la combinación de la geometría del cono y la aireación del silo, permiten que el cemento almacenado sea recuperado casi totalmente.

La relación óptima de altura/diámetro para silos de cono invertido es alrededor de 2.0 en silos de menos de 12 metros de diámetro (capacidad de 4,000 toneladas), el tamaño más económico.

Existen dos tipos de silos de cono invertido que se diferencian entre ellos por sus sistemas de almacenaje y aireación. En primer lugar está el silo de Multi-Extracción (ME); en este silo, el cemento en la zona de almacenamiento es ventilado por segmentos, lo que significa una serie de segmentos de aire recorriendo circunferencialmente alrededor de la base del cono y siendo descargado a través de dichos segmentos de aire, los cuales transfieren el producto a un silo central localizado abajo del cono. (Ver Cuadro 1).

El número de los segmentos ventilados y segmentos radiales de aire dependen del diámetro de silo, pero típicamente deben ser como se enlista en el siguiente cuadro:

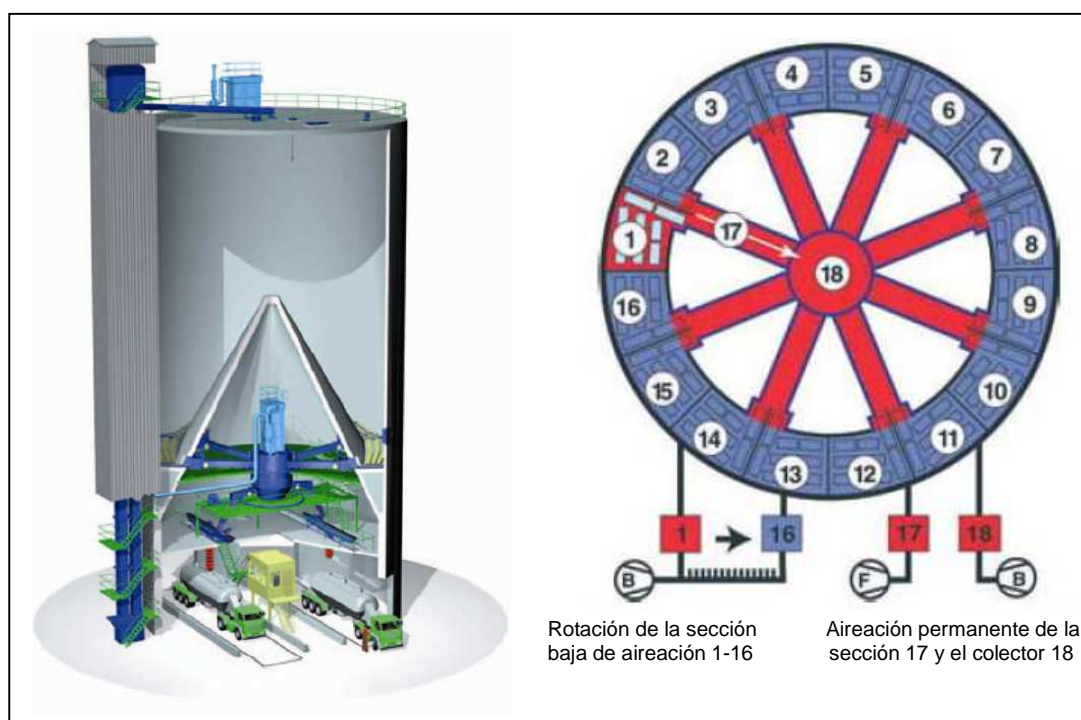
**Cuadro 1. Número típico de segmentos de aire radiales en silos ME**

Capacidad del Silo (Toneladas)	Diámetro del Silo (Metros)	Número de Segmentos de Aire Radiales
10,000	18	6
20,000	24	9
30,000	30	12

Fuente: Hugh McKay y James Durack. Cemtech 2006.

Una característica importante del silo tipo ME es que la circulación desde la zona de almacenamiento arriba del cono se controla a través de las puertas de control de circulación sobre cada segmento de aire radial.

**Ilustración 1. Silo típico tipo ME**

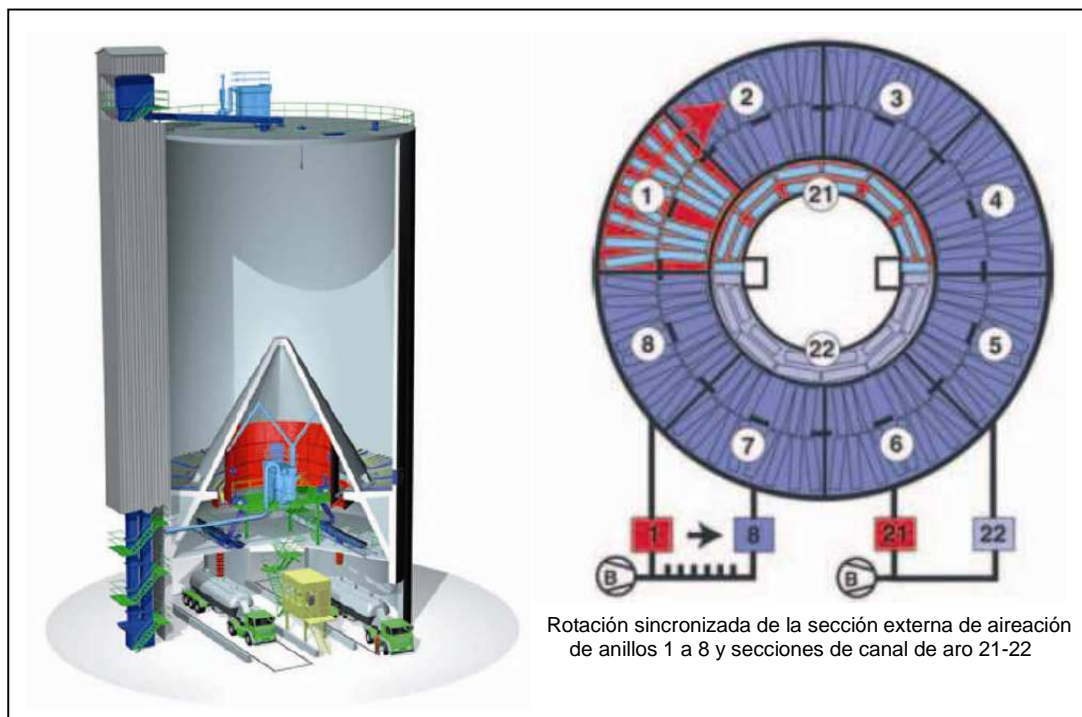


Fuente: Hugh McKay y James Durack. Cemtech 2006.

Como una alternativa para el concepto original de descarga del silo tipo ME, se desarrolló el concepto de los silos con Cámara de Inspección (CI), concepto mostrado en la Ilustración 2. El flujo de la zona de almacenamiento a la cámara de inspección es lograda por medio de una gran cantidad de segmentos de aire radiales, una vez más ventilada en segmentos.

Una vez en la cámara de inspección, el cemento es colectado en una zanja y descargado en ubicaciones discretas, quizás dos puntos solamente. Los diseñadores reclaman ahorros en costo a través de unos pocos segmentos de aire cubiertos y una reducción del número de puertas de control y puertas de circulación. Sin embargo, estos ahorros son generalmente compensados por el costo de la cámara de inspección y el más complejo diseño estructural del cono.

**Ilustración 2. Silo típico tipo CI**

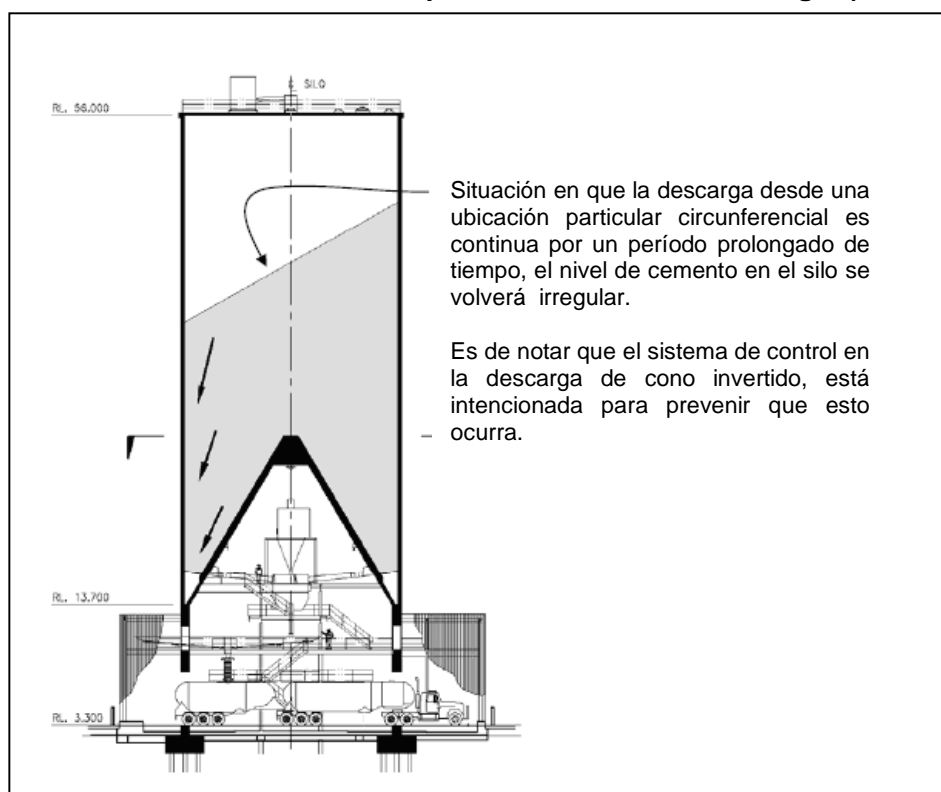


Fuente: Hugh McKay y James Durack. Cemtech 2006.

### 3.2 Aplicabilidad del Eurocode 1991-4 para silos de cono invertido

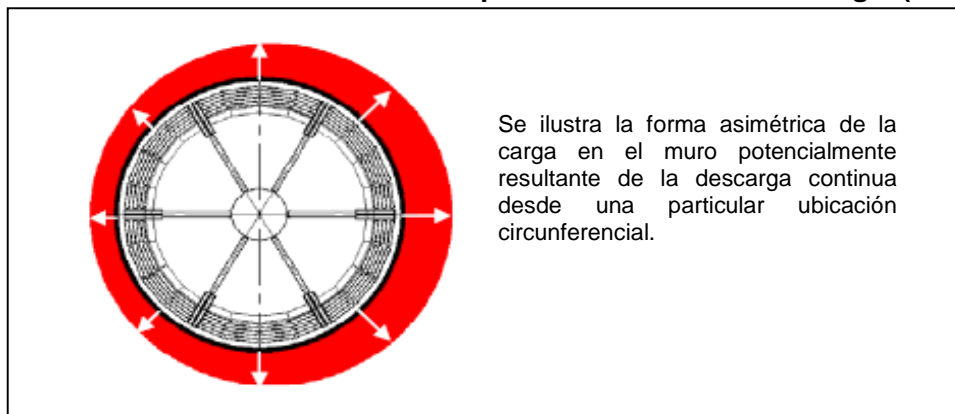
Los fabricantes de silos de cono invertido Ibau Hamburg y Claudius Peters han sostenido que la ventilación del silo y la descarga, son cuidadosamente controladas y aplicadas en ciclos predeterminados alrededor del perímetro del silo, para asegurar que el nivel de cemento dentro del silo, quede razonablemente uniforme y evite el desarrollo de cargas asimétricas en la pared del silo, como se ilustra en las Ilustraciones 3 y 4. Esto puede haber engañado a la mayoría de propietarios y diseñadores en la creencia que los silos de cono invertido no experimentan cargas asimétricas.

**Ilustración 3. Presiones de pared no uniformes resultantes de la continua extracción de material de un solo punto excéntrico de descarga. (Elevación)**



Fuente: Hugh McKay y James Durack. Cemtech 2006.

**Ilustración 4. Presiones de pared no uniformes resultantes de la continua extracción de material de un solo punto excéntrico de descarga. (Planta)**

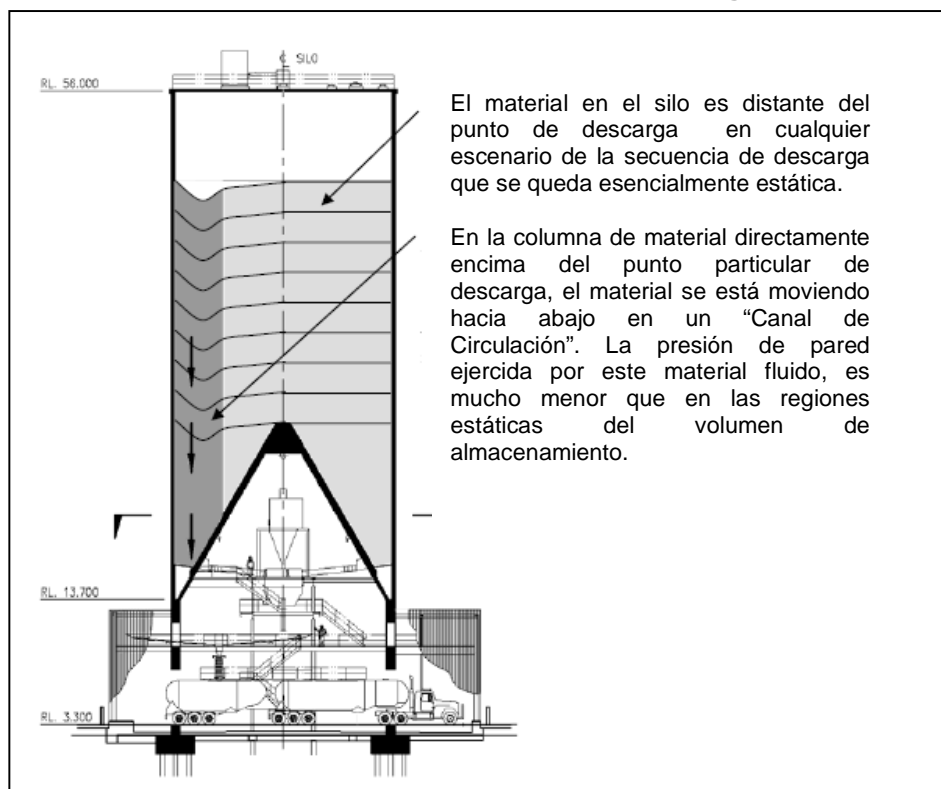


Fuente: Hugh McKay y James Durack. Cemtech 2006.

Sin embargo, esto resalta una falta fundamental del conocimiento del asunto. El problema de la descarga excéntrica en silos de cono invertido no tiene nada para ver con la totalidad de la simetría del contenido del silo durante la descarga. Se relaciona con la formación de canales de circulación inmediatamente más arriba del punto de descarga que resulta en las presiones no uniformes sobre la pared de silo, como se muestra en las Ilustraciones 5 y 6. Esta forma de carga asimétrica no está impedida por el continuamente cambiante punto de descarga.

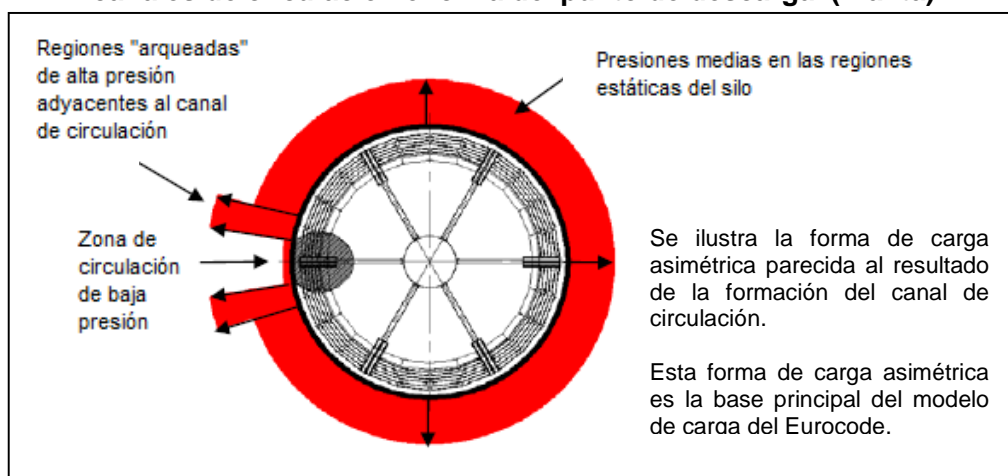
Evidentemente, por su geometría, los silos de cono invertido producen de manera garantizada una descarga excéntrica. La cláusula 1.1.2(3) del Eurocode 1991-4 2006 específicamente excluye silos de cono invertido del alcance del código. Esto era aparentemente el resultado de la oposición de miembros alemanes del comité del código a su inclusión, debido a la falta de pruebas experimentales directamente relevantes a silos de cono invertido.

**Ilustración 5. Presiones de pared no uniformes resultantes de la formación de canales de circulación encima del punto de descarga. (Elevación)**



Fuente: Hugh McKay y James Durack. Cemtech 2006.

**Ilustración 6. Presiones de pared no uniformes resultantes de la formación de canales de circulación encima del punto de descarga. (Planta)**



Fuente: Hugh McKay y James Durack. Cemtech 2006.

El comité del Eurocode 1991-4 2006 hizo el siguiente comentario: «Nuestro comité tiene el punto de vista, que un silo de cono invertido debe cubrir todas nuestras previsiones (del comité) y algunas adicionales que deben estar a la discreción entendida del Ingeniero diseñador».

Ésta es aparentemente también la opinión de muchos ingenieros diseñadores de silos de cono invertido alrededor del mundo incluyendo a los ingenieros de Claudius Peters Technologies, que recomiendan a los diseñadores civiles de estructuras de silos, en una de sus publicaciones recientes, tomar en consideración el código Eurocode 1991-4 2006, además de cualquier código nacional u otro criterio de diseño civil que sea relevante y que podría elegir para aplicar.

Basado en muchas investigaciones hasta la fecha, se puede afirmar que el código Eurocode EN1991-4 2006, representa un modelo más racional para la descarga excéntrica que los códigos previos existentes y no debe ser ignorado para silos de cono invertido.

## 4. PRESIONES DESARROLLADAS DURANTE EL LLENADO DE UN SILO

### 4.1 Naturaleza de las presiones de llenado

Con el llenado concéntrico, las presiones horizontales de pared desarrolladas son relativamente simples y simétricas.

Todos los códigos comunes de carga de silos, incluyendo el Eurocode 1991-4 2005, pronostican las mismas presiones de llenado y usan la "Fórmula de Janssen", presentada por primera vez por Janssen en 1895. En los diferentes códigos, esta fórmula se expresa en diferentes formas algebraicas y con diferentes simbologías, pero es importante reconocer el parecido. La fórmula de Janssen puede ser expresada como:

$$p_h = \left(\frac{\gamma}{\mu}\right) \times \left(\frac{r}{2}\right) \times \left(1 - e^{-2(\mu K)(z/r)}\right) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

- $p_h$  = Presión horizontal de pared en la profundidad  $z$  (metros), expresada en kPa.
- $\gamma$  = Peso específico del material almacenado, expresado en kN/m<sup>3</sup>
- $\mu$  = Coeficiente de fricción (una medida de la rugosidad de la pared)  
=  $\tan(\phi_x)$  donde  $\phi_x$  es el ángulo de fricción de la pared
- $K$  = Coeficiente de presión lateral (medida de la fluidez del material almacenado)
- $r$  = El radio interno del silo, expresado en metros

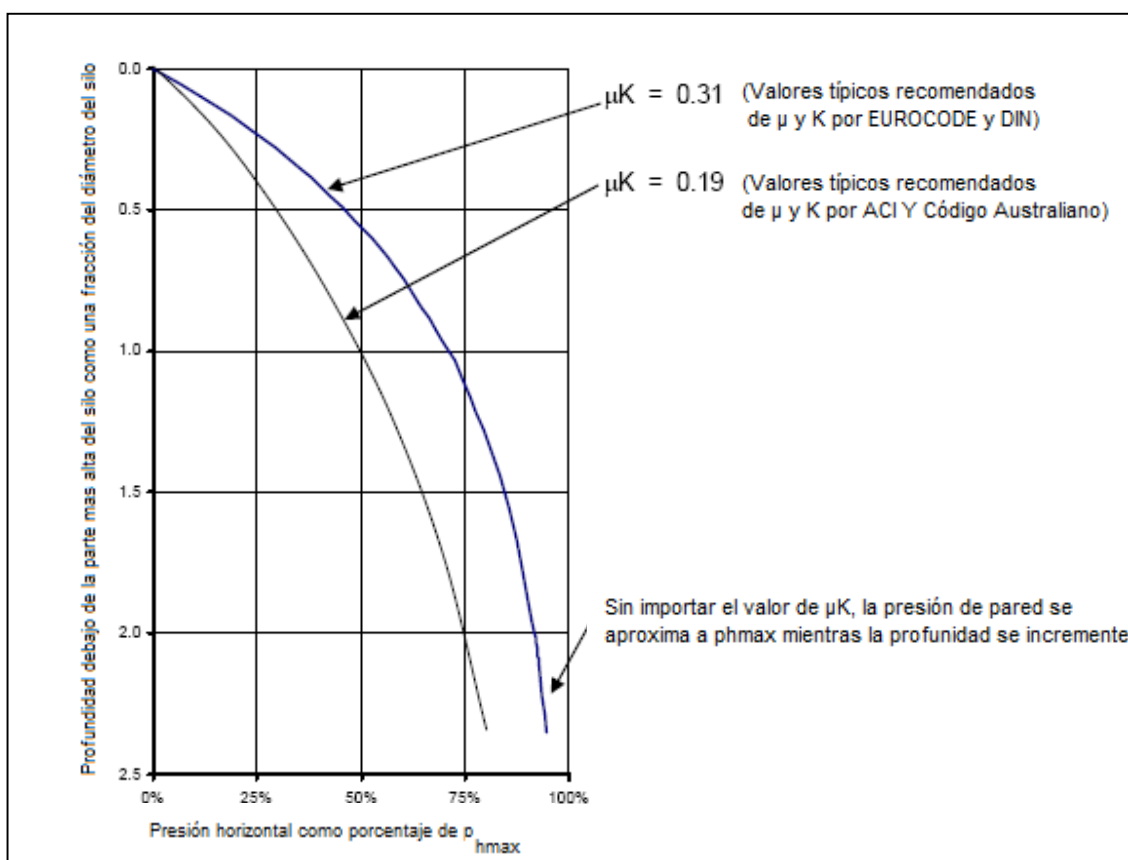
Con  $p_{h,max} = \left(\frac{\gamma}{\mu}\right) \times \left(\frac{r}{2}\right)$  la ecuación anterior puede ser escrita como:

$$p_h = p_{h,max} \times \left(1 - e^{-2(\mu K)(z/r)}\right) \quad (\text{Ec. 1a})$$

Si los mismos parámetros del material  $\gamma$ ,  $\mu$  y  $K$  son usados, entonces todos los códigos considerados pronostican las mismas presiones horizontales de pared de llenado.

La Ilustración 7 muestra la variación de  $p_h$  con la profundidad, para un silo típico. La distribución de presión es mostrada para dos valores diferentes de  $\mu K$  para ilustrar el efecto que  $\mu K$  tiene sobre la cantidad de desarrollo de la carga con la profundidad.

**Ilustración 7. Variación de la presión horizontal de pared de llenado como es predicha en todos los códigos**



Fuente: Hugh McKay y James Durack. Cemtech 2006.

De la ecuación 1 e Ilustración 7, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- La máxima presión de llenado  $p_{h,max} = \left(\frac{\gamma}{\mu}\right) \times \left(\frac{r}{2}\right)$  se incrementa mientras la relación  $\frac{\gamma}{\mu}$  se incremente.

- La cantidad del incremento en la presión se incrementa mientras la relación  $\mu K$  se incremente.

La máxima presión horizontal de llenado será el resultado de una cantidad de parámetros del material, dando valores altos de ambos  $\frac{\gamma}{\mu}$  y  $\mu K$ . El Eurocode especifica que éstos deben ser tomados como  $\frac{\gamma_{\max}}{\mu_{\min}}$  y  $\mu_{\min} K_{\max}$ .

#### 4.2 Parámetros del material recomendados por códigos

El Cuadro 2 presenta una comparación de los parámetros fundamentales del material  $\gamma$ ,  $\mu$  y  $K$ , como es recomendable por cuatro códigos diferentes, junto con valores medidos. (Valores de harina sin procesar correspondientes a polvo de piedra caliza). Los valores de  $\frac{\gamma}{\mu}$  y  $\mu K$  también son registrados debido a su importancia principal en determinar las presiones horizontales.

Como parte de la investigación de respaldo de este trabajo, se presentan pruebas de materiales elaboradas por TUNRA Bulk Solids Handling, una división de la Universidad de Newcastle en los Estados Unidos de América. Las pruebas fueron hechas en seis muestras de cemento y cinco muestras de harina sin procesar, de tres plantas de cemento australianas y una irlandesa. Sorprendentemente, todos los resultados para los dos materiales mostraron poca variación entre las cuatro plantas. Por esta razón, solamente una cantidad de parámetros es presentada en el Cuadro 2 para cemento y para harina sin procesar. Estos resultados son referidos como los resultados de TUNRA (con el parámetro  $\gamma$  se muestra una sobrecarga en la presión de 50 kPa y los otros parámetros para una sobrecarga en la presión de 100 kPa).

Los códigos recomiendan ambos valores mínimos y máximos para los parámetros del material, pero solamente los valores de  $\gamma_{max}$ ,  $\phi_{w.min}$ ,  $\mu_{min}$ ,  $\phi_{i.min}$  y  $K_{max}$  son mostrados como críticos en la determinación de las presiones horizontales. Algunos códigos directamente especifican los valores de  $\mu$  y  $K$ .

**Cuadro 2. Parámetros recomendados del material en códigos**

CÓDIGO	$\gamma_{max}$	$\phi_{w.min}$	$\mu_{min}$ = $\tan \phi_{w.min}$	$\frac{\gamma_{max}}{\mu_{min}}$	$\phi_{i.min}$ "efectivo" (1)	$K_{TUNRA}$ (2)	$K_{CÓDIGO}$ (3)	$\mu_{min}K_{max}$ usando $K_{CÓDIGO}$
	kN/m <sup>3</sup>	Grados	Relación	kN/m <sup>3</sup>	Grados	Relación	Relación	Relación
<b>Cemento</b>								
TUNRA	17.7	33.9	0.67	26.4	38, 33.5	N.A.	N.A.	N.A.
AS3774	16	28	0.53	30.2	40	0.35	0.35	0.19
DIN1055	16	N.E.	0.45	35.6	N.E.	N.F.	0.65	0.29
ACI313	15.7	N.E.	0.4	39.2	24	0.29	0.42	0.17
EURO 1991-4	16	N.E.	0.48	33.3	24.6	0.49	0.65	0.31
<b>Harina</b>								
TUNRA	16.4	33.8	0.67	24.5	38.1, 32.0	N.A.	N.A.	N.A.
AS3774	13	28	0.53	24.5	40	0.35	0.35	0.19
DIN1055	13	N.E.	0.5	26.0	N.E.	N.F.	0.65	0.33
ACI313	12.5	N.E.	0.5	25.0	30	0.31	0.33	0.17
EURO 1991-4	13	N.E.	0.52	25.0	24.6	0.52	0.65	0.34

(1) Para el código AS3774 es estático

(2) Factor calculado basado en la medición de TUNRA del parámetro  $\phi_i$

(3) Factor basado en el valor  $\phi_i$ , especificado directamente en el código.

N.E. = No especifica

N.A. = No aplica

N.F. = No existe fórmula

Fuente: Hugh McKay y James Durack. Cemtech 2006.

El Cuadro 2 demuestra que existe una discrepancia considerable entre los parámetros recomendados por los diferentes códigos y una discrepancia mayor entre los valores recomendados por los códigos y los resultados experimentales. Lo siguiente es importante:

- Todos los valores recomendados del peso específico del material  $\gamma$ , por los códigos, no son conservadores respecto a los valores medidos por TUNRA en un 11% y 26% respectivamente para el cemento y la harina sin procesar.

- Todos los valores recomendados del coeficiente de presión de pared  $\mu$  por los códigos, son conservadores respecto a los valores medidos por TUNRA, tanto para cemento como para la harina sin procesar en un 25%.
- Para la harina sin procesar, las diferencias entre  $\gamma$  y  $\mu$  son canceladas por la relación  $\frac{\gamma}{\mu}$ , la cual es esencialmente constante en todos los códigos y valores medidos por TUNRA.
- Para el cemento, las relaciones  $\frac{\gamma}{\mu}$  varían considerablemente, con la recomendación de valores hasta 50% conservadores con respecto al valor de TUNRA.
- Hay una variación considerable en los valores recomendados para el valor de ángulo de fricción interna  $\phi_i$ . Esto resulta en la variación de valores de la relación de presiones laterales K de 0.35 a 0.65.
- Tanto para el cemento como para la harina cruda, el valor de la relación  $\mu_{min}K_{max}$ , varía considerablemente entre los valores del Eurocode y el DIN, siendo bruscamente el doble del valor en el código Australiano y el ACI.

La amplia cantidad de parámetros presentados en el Cuadro 2, hace dificultoso que cualquier diseñador tenga confianza en cualquiera de los códigos de los parámetros recomendados del material.

Generalmente el problema no puede ser superado basando el diseño en los parámetros medidos del material porque para una nueva planta de cemento, los silos serán diseñados y construidos prioritariamente para el comienzo de la producción y no habrá ningún material almacenado representativo para hacer un ensayo.

En el caso de estudio presentado después en este trabajo, una sola cantidad de parámetros del material ha sido usada en la aplicación de los diferentes códigos con la finalidad de evitar este problema y para concentrarse en las diferencias fundamentales entre los diferentes códigos.

## **5. PRESIONES DE CIRCULACIÓN DURANTE LA DESCARGA DE UN SILO**

### **5.1 Naturaleza general de las presiones de descarga**

Como se estableció en el capítulo anterior, las presiones que se asumen con el llenado concéntrico, son uniformes y simétricas.

A pesar del sistema de descarga, las presiones horizontales de pared desarrolladas durante la descarga son fundamentalmente complicadas con las siguientes características:

- Durante la circulación, el material almacenado inicialmente estático, debe movilizarse hacia el punto de descarga. Para complacer esto, los planos de corte deben desarrollarse dentro del material y las "avalanchas internas" ocurren en un modo relativamente aleatorio e imprevisible.
- Tal comportamiento aleatorio es dificultoso de analizar teóricamente y se ha demostrado que es muy dificultoso obtener datos confiables con respecto a las presiones de circulación desarrolladas sobre las paredes del silo durante la descarga.
- Es conocido que, por lo menos a nivel local, las presiones durante la descarga podrían ser dos o más veces, más altas que las presiones estáticas de llenado.

Las presiones desarrolladas durante la descarga aumentarán con la profundidad, pero tienden a ser variables alrededor del perímetro del silo, que pueden involucrar incrementos locales altos asociados a los planos de corte y varían indudablemente con el tiempo.

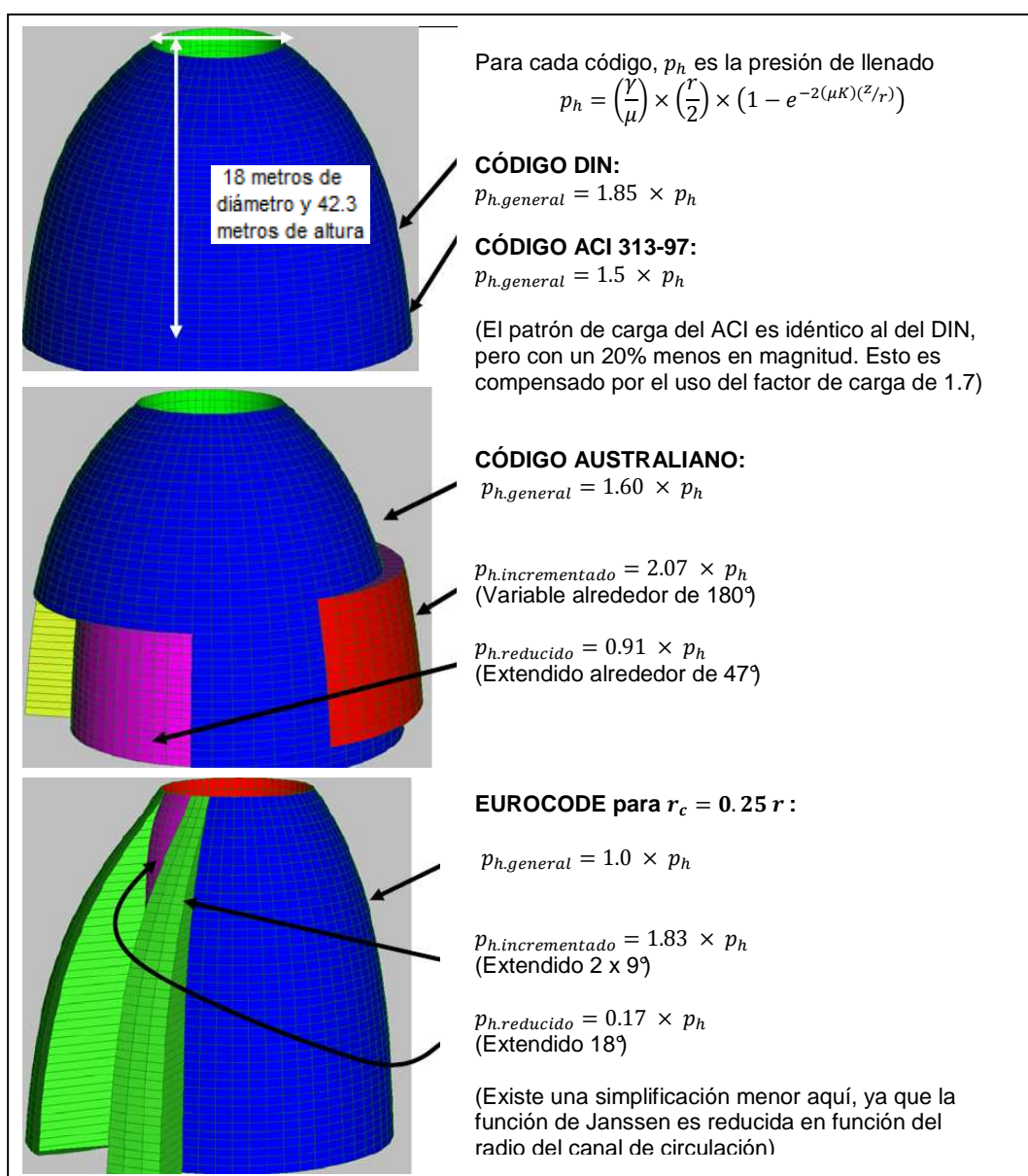
Todos los códigos reconocidos para silos, incluyendo el Eurocode usan la misma fórmula de Janssen, basada en la presión de llenado como el punto de partida para el pronóstico de las presiones de descarga. Tres diferentes enfoques han sido usados para modificar la presión de llenado para pronosticar las presiones de descarga:

- Los códigos Estadounidenses y Alemanes simplemente aplican un "Multiplicador de circulación" a las presiones de llenado. La presión durante la descarga es asumida para tener la misma forma simétrica como la presión de llenado, que simplemente incrementado el valor por un factor, que en el código Alemán depende de la excentricidad del punto de descarga, y tiene un valor de alrededor 2.0.
- El código Australiano de nuevo aplica un "Multiplicador de circulación", pero además, especifica una no simétrica "Corrección de carga" sobre la pared, dependiente del grado de excentricidad de la descarga. Esta corrección de carga es solamente aplicada en la mitad más baja de del silo, que vuelve la carga simétrica.
- El Eurocode no aplica un "Multiplicador de circulación". En vez de eso, aplica una muy onerosa "Corrección de carga", que se extiende sobre la altura total del silo. Esto da como resultado momentos muy altos y fuerzas de corte en la pared de silo, pero con tensiones de arco reducidas.

## 5.2 Modelos de carga definidos en tres códigos diferentes

La Ilustración 8 muestra los modelos de presión de descarga definidos en el código alemán, ACI, el código australiano y el Eurocode para un silo típico.

**Ilustración 8. Modelos de presión de descarga definidos por cuatro códigos diferentes**



Fuente: Hugh McKay y James Durack. Cemtech 2006.

No es obvio entre los modelos de carga presentados en la Ilustración 8, cuál produce los esfuerzos más onerosos en el silo, pero a primera vista se pueden hacer las siguientes observaciones:

- La carga simple y simétrica definida por el DIN, podría ser la más conservadora cuando especifica la presión general más alta de  $1.85p_h$ .
- El código australiano puede ser el más conservador cuando especifica la presión mayor de  $2.07p_h$ .
- La carga definida por el Eurocode puede ser la menos conservadora cuando especifica la presión general más baja de  $1.0p_h$  con un incremento de presión sobre solamente una región pequeña.

Como se demuestra en el caso de estudio, la carga definida por el Eurocode es significativamente más onerosa que en otros códigos debido a su corrección dramática de carga que genera momentos y cortes muy grandes.

## **6. CASO DE ESTUDIO; SILO DE CEMENTO DE 10,000 TONELADAS DE CAPACIDAD**

### **6.1 Antecedentes del caso de estudio**

Muchos diseños de silos de cono invertido alrededor del mundo en los últimos 25 años se han hecho, los cuales han sido variables en tamaño, desde 4,000 a 35,000 toneladas de capacidad.

Los doce silos más grandes de los mencionados, están ubicados en Australia, Malasia, Singapur, Irlanda y Colombia. La mayoría fueron construidos de concreto armado, y los más grandes son de concreto post-tensado. El procedimiento de diseño está basado principalmente con el patrón de carga para silos presentado en el código australiano AS3774. Antes del lanzamiento de este código en 1985, se utilizaba el código alemán DIN1055, y se hacía referencia también al código estadounidense ACI-313. El silo en Colombia fue diseñado en 1997 con del código estadounidense ACI, por pedido del cliente. Todos estos silos continúan funcionando satisfactoriamente.

En 2001, fueron diseñados varios silos de cono invertido en la nueva planta de cemento Lagan Cement en la república de Irlanda. Esta planta tiene dos silos de cemento de 10,000 toneladas de capacidad de doble pared y un silo homogenizador de harina sin procesar de 10,000 toneladas. Todos los silos fueron construidos de concreto reforzado, con diámetros de 18 metros y usan el equipo de descarga Claudius Peters. Los silos fueron diseñados con el código australiano AS3774, cuando no existía ningún código británico apropiado en ese momento.

Luego del lanzamiento del Eurocode EN1991-4 en 2005 y la mala publicidad dirigida a la falla de dos silos de cemento en la Planta Höver de Holcim en Alemania, idénticos en tamaño a los silos de cemento de Lagan Cement y también utilizando equipo de descarga de Claudius Peters, se decidió emprender una evaluación del Eurocode en comparación con otros códigos.

El silo escogido como base para esta evaluación es esencialmente similar a siete silos de 10,000 toneladas.

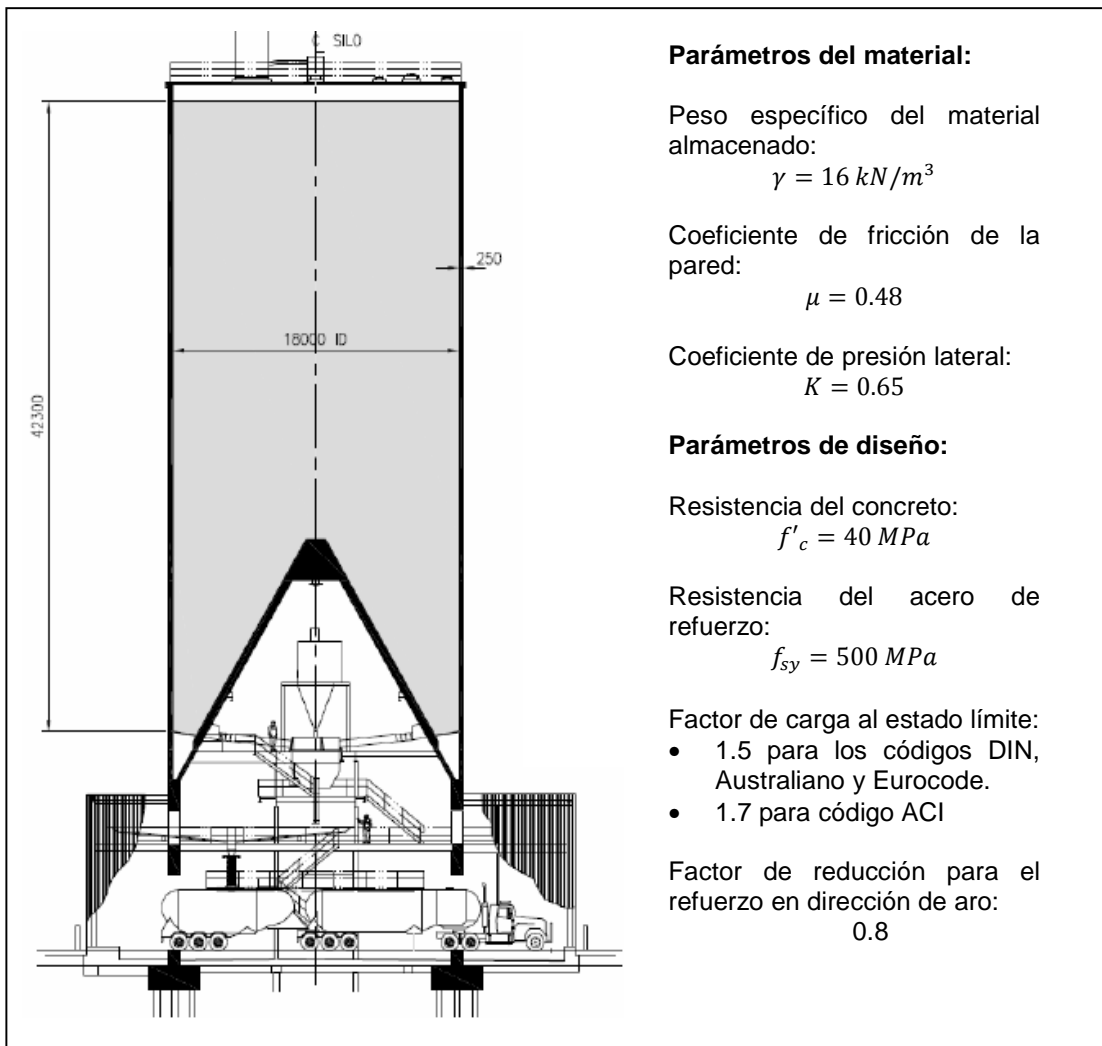
## **6.2 Suposiciones en la que está basada la investigación de diseño comparativo**

El silo del caso de estudio está construido de concreto reforzado (no pretensado) con una pared alta de 250 mm de espesor, un diámetro interno de 18 metros y una altura de material almacenado de 42.3 metros. La pared del silo ha sido asumida como rígidamente soportada en su base y con un techo reparado. Ninguna consideración ha sido asignada a las cargas aparte de la carga del material almacenado. Los problemas relacionados con la selección de una cantidad apropiada de los parámetros de diseño del material, han sido discutidos en el capítulo 2. Para la investigación comparativa de diseño, una sola cantidad de parámetros del material basados en las recomendaciones del Eurocode son adoptados. La correspondiente presión horizontal máxima es:

$$p_{h.max} = \left(\frac{\gamma}{\mu}\right) \times \left(\frac{r}{2}\right) = 150 \text{ kPa}$$

Aplicando el Eurocode, la determinación de la excentricidad del canal de circulación, referente a la Cláusula 5.2.4.3.1, requiere el uso del ángulo de fricción interna, para el cual el Eurocode recomienda usar el valor de 36.6°.

**Ilustración 9. Detalles del silo utilizado como base para el caso de estudio**



Fuente: Hugh McKay y James Durack. Cemtech 2006.

Aplicando el código alemán, los siguientes parámetros adicionales del material, específicos de ese código, que han sido utilizados son los siguientes:

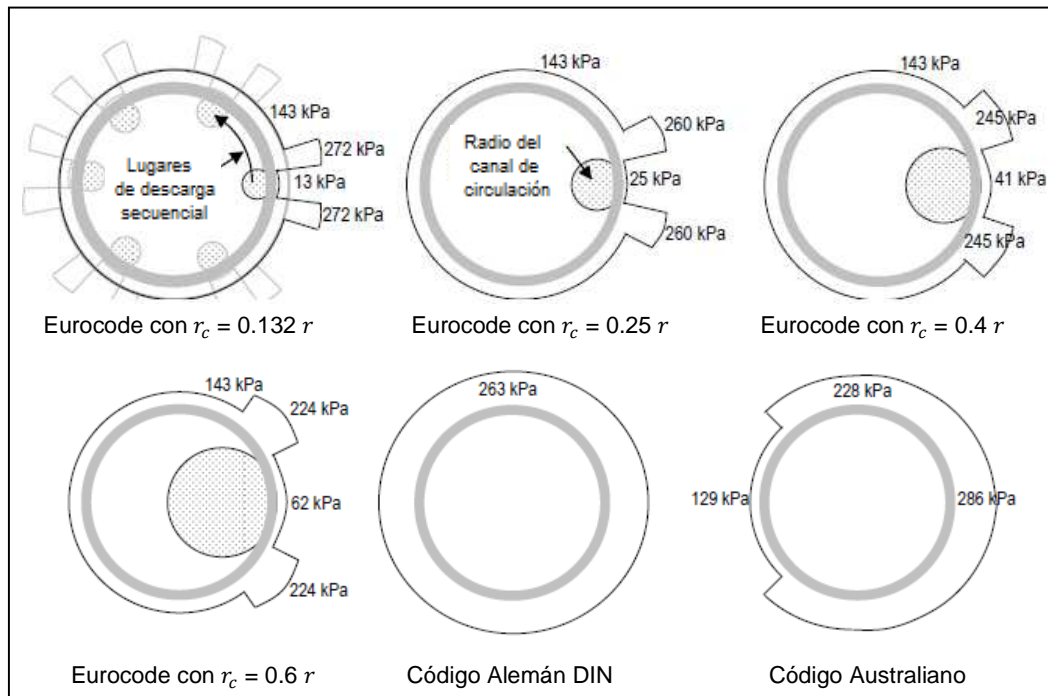
$$e_h = 1.2$$

$$\beta_G = 0.5$$

Al aplicar el código alemán, el método de la Cláusula 3.3.3.3 ha sido aplicado en lugar de "la presión parcial" basada en el método de Cláusula 3.3.3.2. Para calcular la pérdida de rigidez debido al agrietamiento en la pared, los módulos de elasticidad de dirección de aro fueron tomados como  $0.3 \times 34.3 \times 10^3$  en todos los análisis. Combinado con el uso análisis geométrico no lineal, esto tiene el efecto de reducir los momentos pronosticados. Modelado con elemento finito se utilizó el software Strand7 Release 2.3.5 y un análisis geométrico no lineal.

Para propósitos de análisis, modelos en tercera dimensión de las distribuciones de carga han sido desarrollados. Para propósitos de comparación, la Ilustración 10 presenta en dos dimensiones, las presiones horizontales cerca de la base de las paredes por los tres diferentes códigos.

**Ilustración 10. Comparación en 2D de las presiones cerca de la base de la pared**

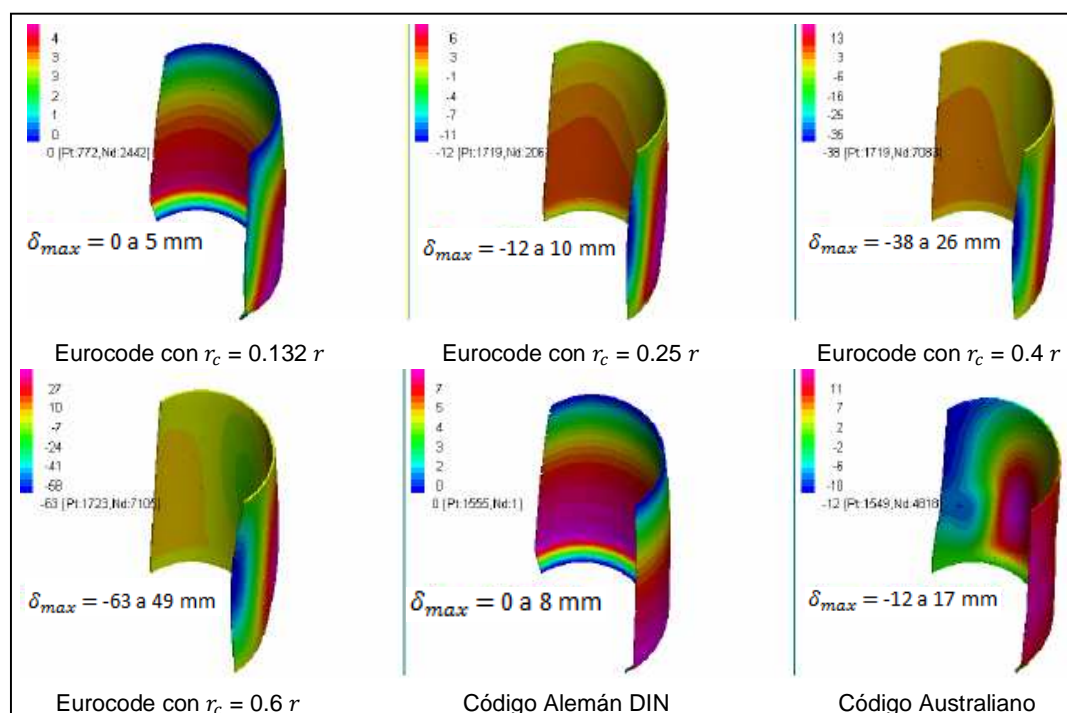


Fuente: Hugh McKay y James Durack. Cemtech 2006.

En la Ilustración 10, cuatro distribuciones de carga diferentes del Eurocode son mostradas, correspondientes al radio del canal de circulación requerido por la Cláusula 5.2.4.3.1. No es inmediatamente obvio cuál de estos representa el caso de diseño crítico porque con el radio del canal de circulación más grande, el área de presión asimétrica es más grande, pero la magnitud de las cargas es más pequeña. El caso de  $r_c = 0.132 r$  no es requerido por el Eurocode pero ha sido incluido para investigar el efecto de un canal muy pequeño de circulación que podría ser desarrollado en un silo de cono invertido.

### 6.3 Comparación de los resultados del análisis

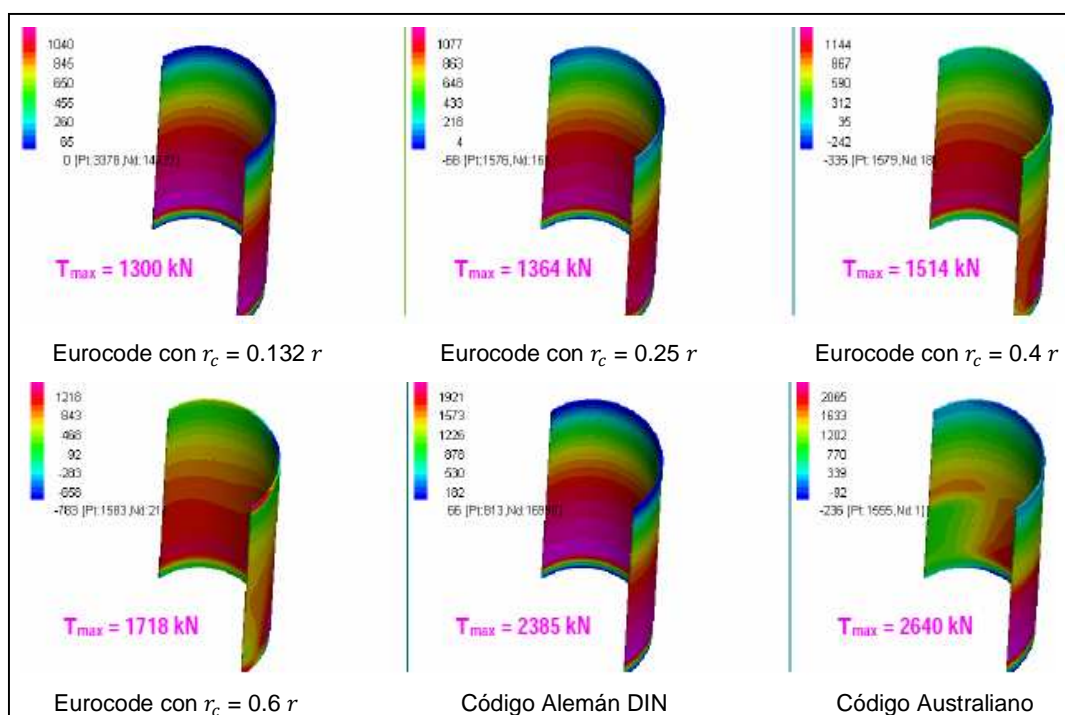
Ilustración 11. Desplazamientos radiales



Fuente: Hugh McKay y James Durack. Cemtech 2006.

- Como se esperaba, la carga simétrica del DIN da un aumento a una distribución simétrica de los desplazamientos, en donde el radio del silo sólo aumenta por un máximo de 8 mm cerca de la base del silo.
- Los desplazamientos por carga del código australiano, son similares en magnitud a los proporcionados por el Eurocode en el caso  $r_c = 0.25 r$
- El caso del Eurocode,  $r_c = 0.6 r$ , resulta como el desplazamiento más grande pronosticado de los tres códigos.

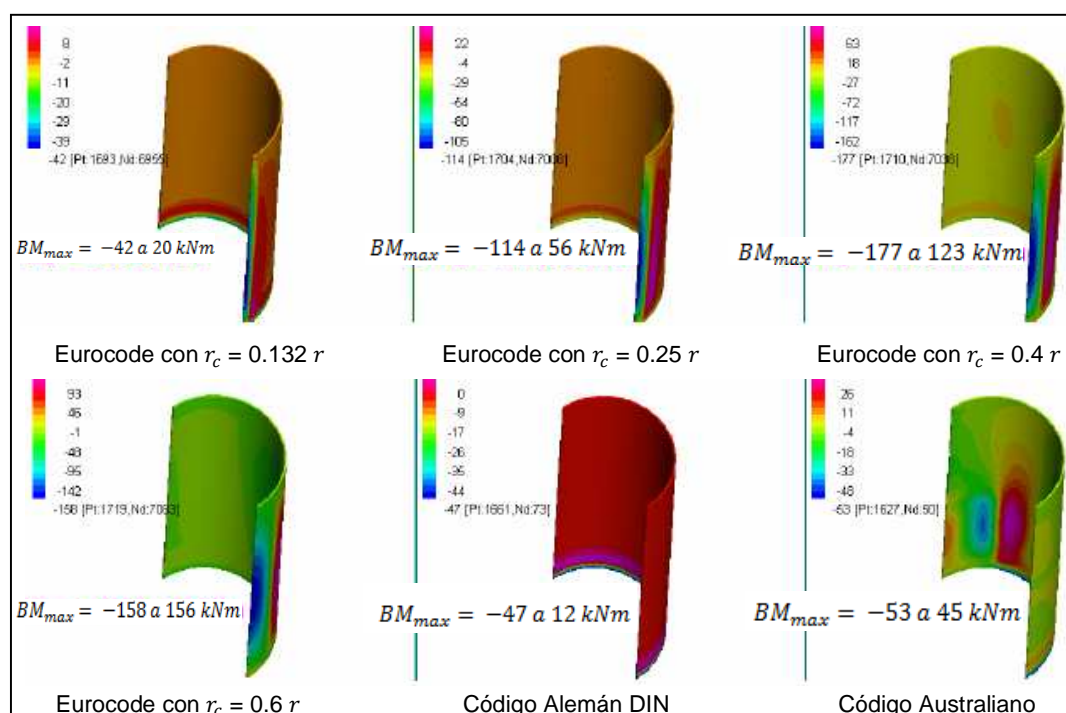
Ilustración 12. Tensiones de aro



Fuente: Hugh McKay y James Durack. Cemtech 2006.

- Las tensiones de aro que corresponden a las cargas del Eurocode, son significativamente más bajas que las que corresponden tanto al código alemán como al australiano.
- Para los canales de circulación más pequeños, las tensiones de aro del Eurocode son solamente 50% del de los otros códigos. Esto es consistente con la información de carga indicada en la Ilustración 6, donde la presión general del Eurocode se iguala a la presión de llenado  $p_h$ , mientras que para los otros códigos, la presión general se acerca al doble de este valor.

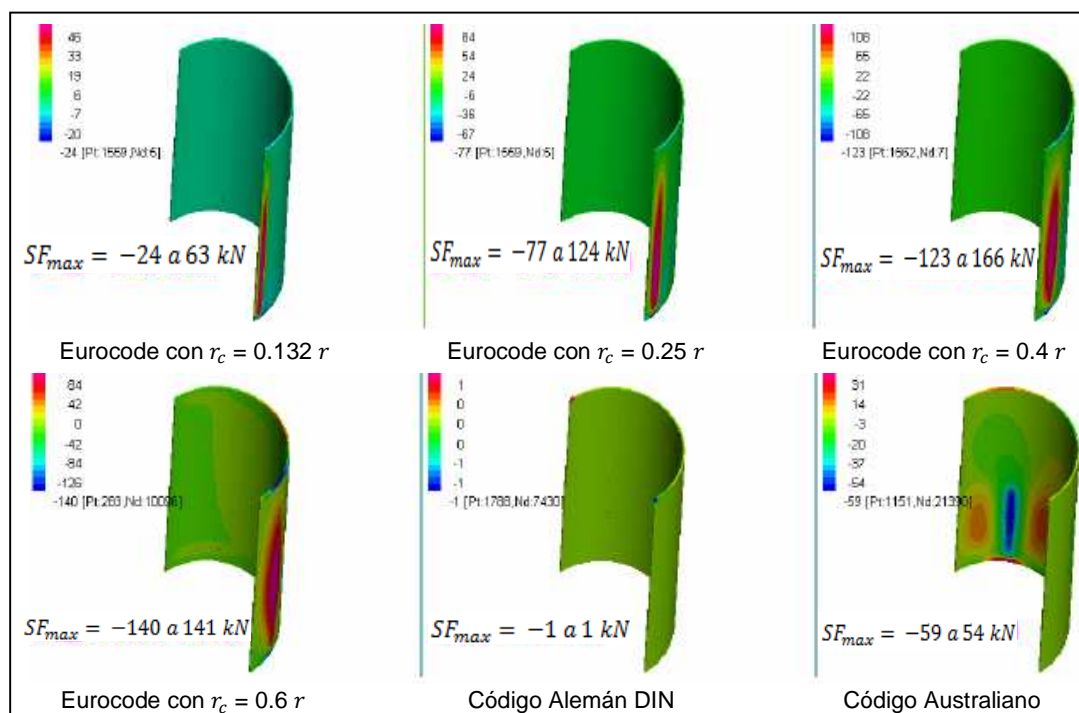
**Ilustración 13. Momentos flexionantes en la dirección de aro**



Fuente: Hugh McKay y James Durack. Cemtech 2006.

- Los momentos flexionantes más altos fueron desarrollados por la carga del Eurocode, con un canal de circulación de radio  $r_c$  de 0.4 por el radio del silo. Esto significa que el caso de las tensiones más altas de aro, no son las mismas como en el caso de los momentos más altos.
- Los momentos flexionantes, evidentes por la carga del DIN, pueden parecer contradictorios a la naturaleza simétrica de la carga del DIN. Los momentos de dirección de aro están restringidos a la base del silo y representan la componente de "Poisson" de la dirección más alta vertical de los momentos en esta área.
- Los momentos de dirección de aro pronosticados por el código australiano son solamente 30% de los momentos más grandes del Eurocode. Además, los momentos significativos calculados por el código australiano, son en gran parte restringidos a la mitad más baja del silo (siendo el límite del código australiano la región asimétrica de carga). En comparación, los momentos del Eurocode permanecen altos para la altura total del silo.
- El más bajo (sin especificación de código) canal de circulación produce los momentos de similar magnitud al código australiano, pero de nuevo estos momentos se extienden en la altura total del silo.

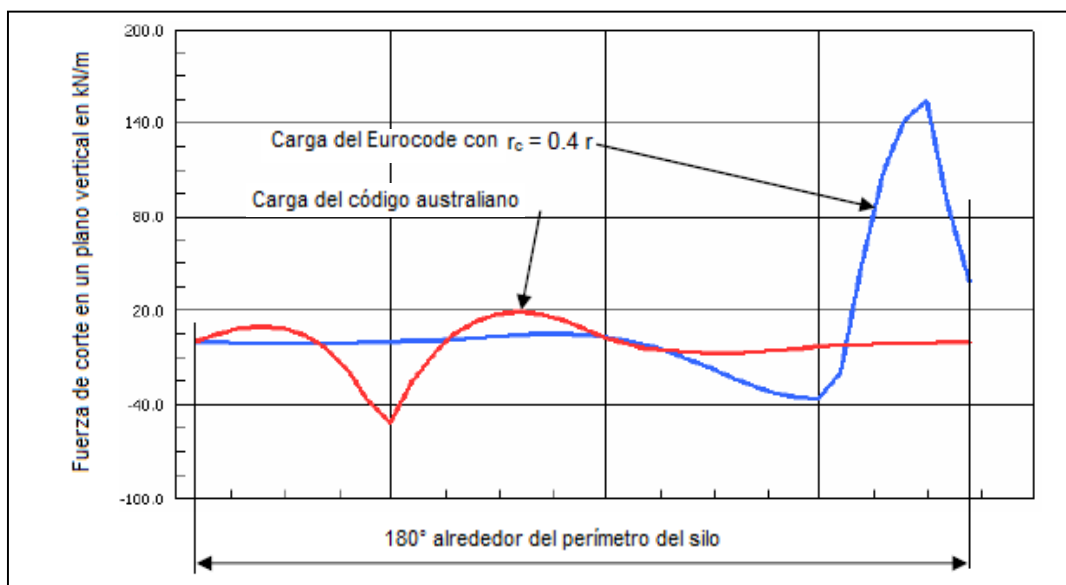
**Ilustración 14. Fuerzas de corte en un plano vertical a través de la pared de silo**



Fuente: Hugh McKay y James Durack. Cemtech 2006.

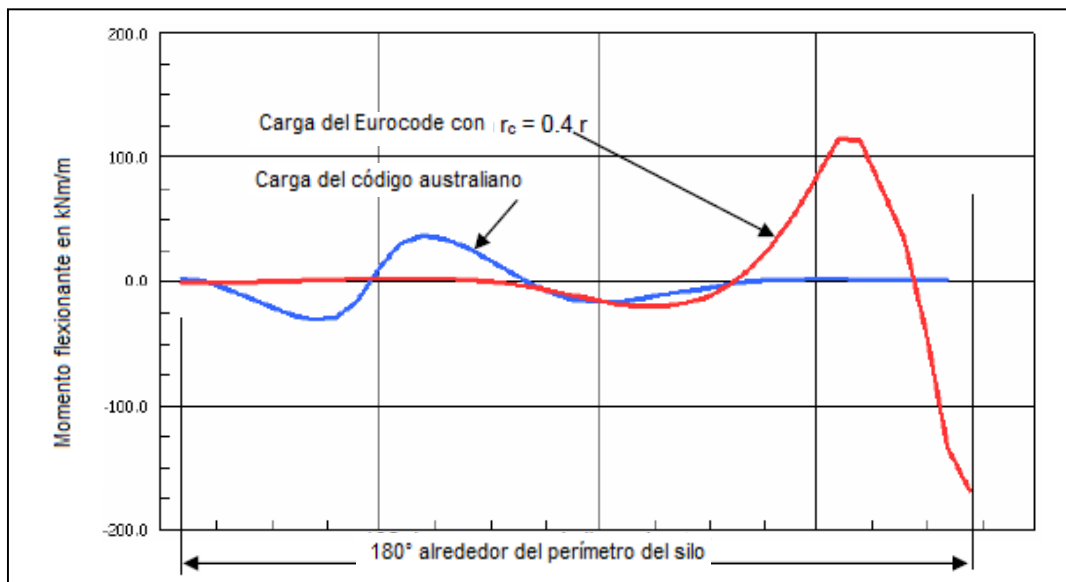
- La fuerza de corte más alta desarrolla por el Eurocode, el caso  $r_c = 0.4 r$  y las altas fuerzas de corte, continúan hasta la altura total de la pared del silo.
- Para la carga simétrica del DIN, el plano vertical de corte es cero, como se esperaba.
- Las fuerzas de corte por las cargas del código australiano, son solamente un tercio de la más altas fuerzas de corte del Eurocode y están grandemente restringidas a la mitad más baja del silo, siendo el límite de la región de carga asimétrica en el código australiano.
- El más bajo (sin especificación de código) canal de circulación produce las fuerzas de corte de similar magnitud al código australiano, pero de nuevo estas fuerzas de corte se extienden en la altura total del silo.

**Ilustración 15. Diagrama comparativo de la fuerza de corte del patrón de carga del Eurocode y el código australiano**



Fuente: Hugh McKay y James Durack. Cemtech 2006.

**Ilustración 16. Diagrama comparativo del momento flexionante, del patrón de carga del Eurocode y el código australiano**



Fuente: Hugh McKay y James Durack. Cemtech 2006.

La Ilustración 15 y la Ilustración 16 proveen el ejemplo adicional de la diferencia importante entre las fuerzas de corte y los momentos flexionantes para patrones de carga del código australiano y el Eurocode.

#### **6.4 Comparación de los resultados del diseño para el refuerzo en la dirección de aro**

Los resultados de análisis de la sección previa todavía no identifican cuál de los modelos de carga produce los resultados más críticos para los propósitos de determinar el refuerzo en la dirección de aro que deben soportar los efectos combinados de:

- La tensión de aro que es más grande por el patrón de carga del código DIN y el código australiano.
- Los momentos flexionantes que son más grandes por el patrón de carga del Eurocode.

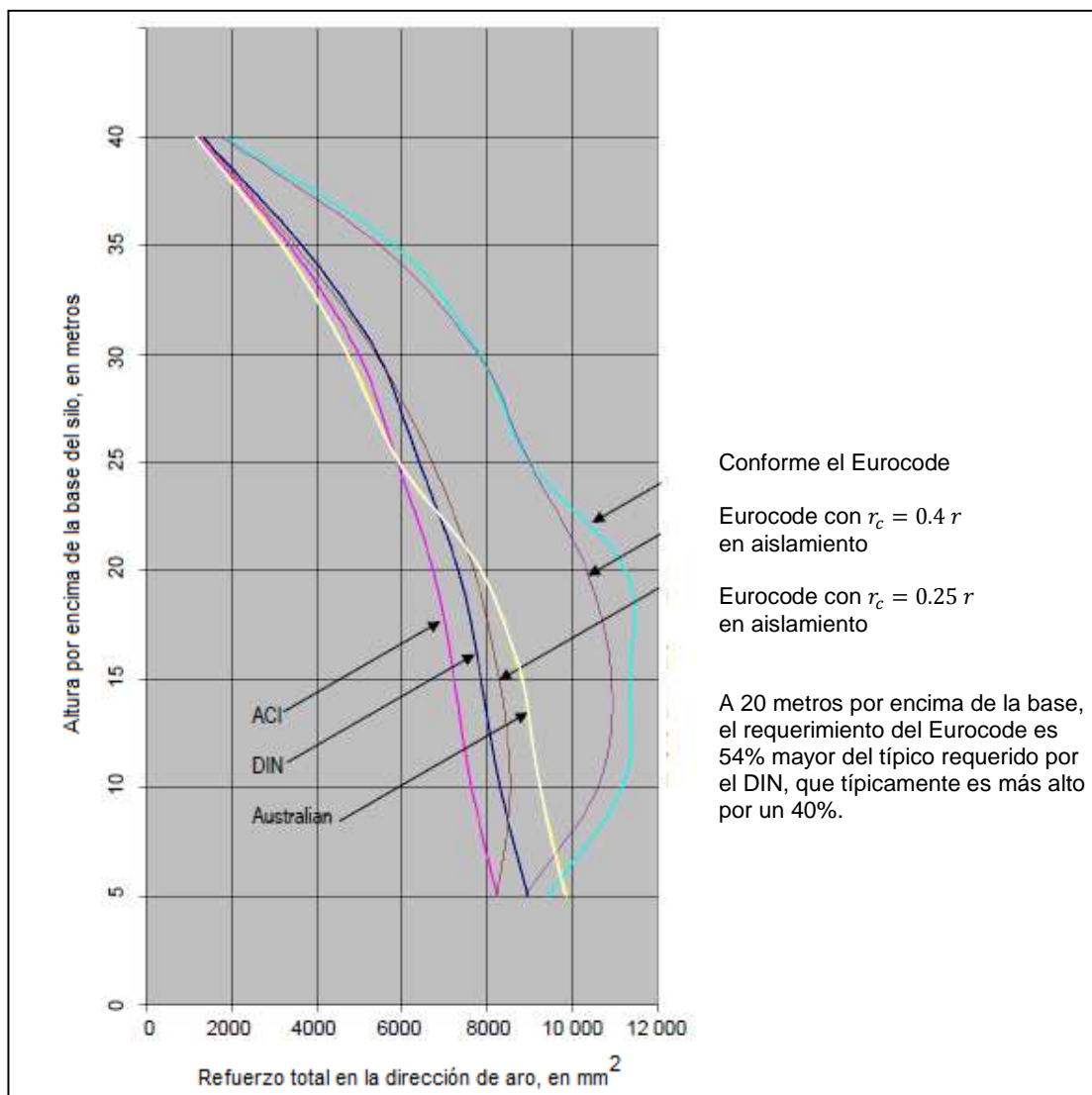
Para determinar los requerimientos de refuerzo en la dirección de aro, el método recomendado en el código ACI y luego más profundamente definido en el "Manual de Ingeniería del Concreto", han sido utilizados.

El refuerzo es tomado como de grado 500 y el concreto de grado 40 con 40 mm de recubrimiento en ambos sentidos. Un factor límite de carga de 1.5 es aplicado a todo el análisis nominal que resulta de la sección previa, exceptuando el código ACI, donde se especifica el uso de un factor de 1.7. Un factor de reducción de capacidad de 0.8 se aplica en todo. Los requerimientos de refuerzo en secciones críticas son determinados por separado para ambas caras y el refuerzo total, representa la suma de los requerimientos de refuerzo para las dos caras.

La Ilustración 17 compara el refuerzo en la dirección de aro requerido para satisfacer el requerimiento del DIN, del ACI, del código australiano y del Eurocode. Los siguientes comentarios son hechos con relación a la información presentada:

- En la aplicación del Eurocode, la sección vertical crítica para el refuerzo en la cara interior está en el centro de la región de presión reducida para la condición  $r_c = 0.4 r$ , mientras que la sección vertical crítica para el refuerzo en la cara exterior está en la región adyacente de la presión más alta para la condición de carga  $r_c = 0.6 r$ . Esta interpretación estricta del Eurocode resulta en el requerimiento de refuerzo en la dirección de aro alrededor de 50% incrementado del que requiere el código DIN.
- Para el Eurocode, si pudiera ser establecido para un sistema de descarga de cono invertido, que el máximo radio de canal de circulación fuera 0.4 del radio del silo, entonces habrá una reducción menor en los requerimientos de refuerzo por el Eurocode.
- Si pudiera ser establecido para un sistema de descarga de cono invertido, que el máximo radio de canal de circulación fuera menos de 0.25 del radio del silo, entonces el diseño (modificado) del Eurocode requeriría solamente alrededor de 5% más del requerimiento de refuerzo en la dirección de aro que el código DIN. Sin embargo debido a los diferentes requisitos de refuerzo para las dos caras para este caso  $r_c = 0.25 r$ , el refuerzo de la cara interior sería hasta 25% más grande que el refuerzo correspondiente por el código DIN.

Ilustración 17. Comparación del requerimiento de refuerzo en la dirección de aro



Fuente: Hugh McKay y James Durack. Cemtech 2006.

- Como es notable en la Ilustración 8, el código de carga ACI es idéntico en forma al código de carga DIN, pero en menor magnitud. El ACI especifica un factor de carga límite de 1.7 que compensa esto en parte. Los requerimientos de refuerzo del ACI (usando la misma cantidad de parámetros del material) son 92% de los requerimientos especificados en el código DIN.

- En la aplicación del código Australiano, mientras se podría esperar que la sección crítica estuviera en la región máxima del momento, éste no era el caso. La sección crítica estaba en el área de la tensión de aro más alta donde los momentos que coexisten son insignificantes.

El máximo requerimiento de refuerzo del código DIN para este silo en  $8950 \text{ mm}^2$  o  $4475 \text{ mm}^2$  para cada cara, puede ser cubierto con 32 barras de diámetro a 180 centros. Este requerimiento de refuerzo está dentro de la clausula 4.3.9 del ACI, que recomienda que «el centrado mínimo para el espaciado de las barras del centro no debe ser menos de 5 veces su diámetro».

Cualquier aumento importante en requerimientos de refuerzo más allá de los especificados por el código DIN, no pueden ser cubiertos en un silo de concreto no pretensado sin usar barras más grandes o contradiciendo la recomendación del ACI.

Como se discute más extensamente en el próximo capítulo, esto sugiere que si es tomado el diseño realizado por el Eurocode (incluso con diámetros de canal de circulación limitados), entonces la alternativa de concreto reforzado no es viable para un silo de este tamaño y un sistema pretensado tendría que ser adoptado.

## 6.5 Esfuerzos de corte

De acuerdo con el código de concreto australiano AS3600, la capacidad de corte (fuera del plano) de una pared no pretensada puede ser calculada como:

$$\phi V_{cu} = \phi \beta_1 \beta_2 \beta_3 b_v d_0 \left( \frac{A_{st} f'_c}{b_v d_0} \right)^{0.33}$$

Considerando una sección a 20 metros de la base del silo y tomando  $A_{st} = 3660 \text{ mm}^2$ , la fórmula anterior puede ser evaluada como:

$$\begin{aligned} \phi V_{cu} &= 0.7 \times 1.1 \times (1 - N^*/3.5A_g) \times 1 \times 1000 \times 198 \times \left( \frac{3660 \times 40}{1000 \times 198} \right)^{0.33} \\ \phi V_{cu} &= (1 - N^*/3.5A_g) \times 138 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

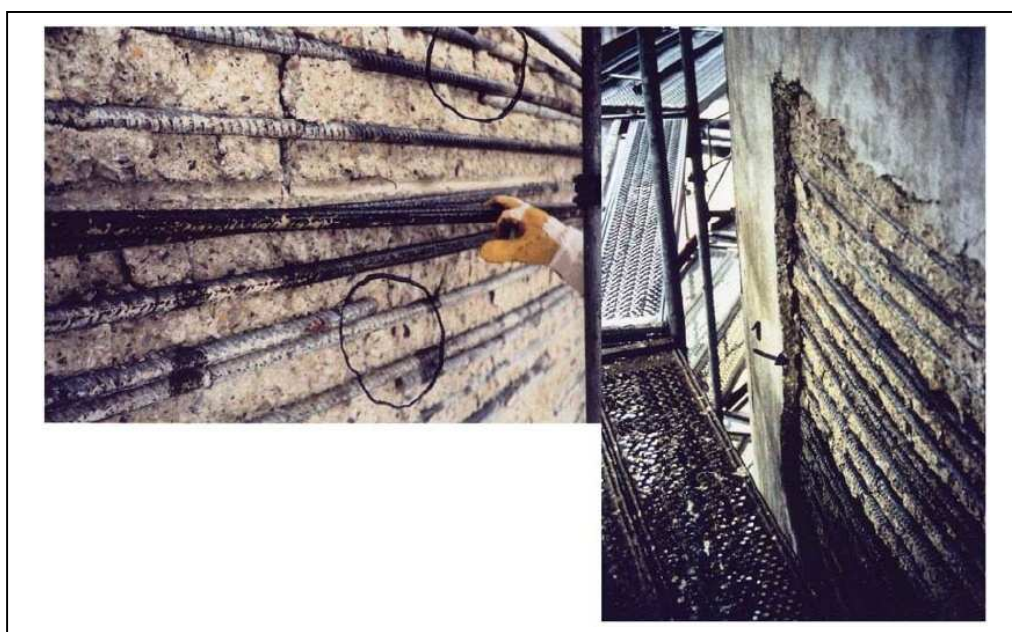
La predicción del Eurocode de la tensión de aro  $N^*$  en la altura de 20 metros es alrededor de 1500 kN. Para estos valores el término  $(1 - N^*/3.5A_g) = \left( \frac{1 - 1500 \times 10^3}{3.5 \times 1000 \times 250} \right) = -0.714$  con el resultado negativo que indica que la presencia de la tensión de aro ha reducido la capacidad de corte a cero. La capacidad de corte de la pared se reduce a cero para  $N^* = 875 \text{ kN}$  correspondiente a  $N = 583 \text{ kN}$ .

Tradicionalmente, los diseñadores de silos han ignorado el corte en la pared de silo. La fuerza de corte de acuerdo con el DIN y el ACI es cero, mientras que para el código australiano, el corte es relativamente bajo; alrededor de 60 kN/m, y es restringido a la región más baja de la pared. Para el caso  $r_c = 0.4 r$  del Eurocode, la fuerza de corte alcanza el máximo valor en 166 kN/m y mantiene valores altos arriba la altura total de la pared. Incluso para el caso  $r_c = 0.25 r$ , la fuerza de corte pronosticada casi duplica al valor del código australiano.

Si el Eurocode se adopta, entonces el problema del corte se hace una preocupación considerable. Las magnitudes pronosticadas de la fuerza de corte son tales, que ignorar la práctica tradicional del corte es incorrecto e insostenible.

La causa de fallas en silos es a menudo difícil de determinar con precisión y las deficiencias de construcción tienen participación indudablemente en la mayoría de los casos. A pesar de esto, en algunos casos y particularmente en la falla que se produjo en la Planta de Höver, se puede sugerir que la falla puede ser asociada con la "Delaminación" que se puede dar como resultado directo de las altas fuerzas de corte dentro de la pared, proporcionando un aumento generoso a las altas tensiones de corte longitudinales dentro de la pared. Si esta suposición es correcta, entonces la única solución viable es incrementar la capacidad de corte de la pared, cambiando de paredes de concreto reforzado a sistemas pretensados.

**Ilustración 18. Delaminación de la pared del silo de la Planta Höver**



Fuente: Noticias de Holcim, Enero de 2006

## 6.6 Cálculo de fuerzas verticales y presiones horizontales en el silo utilizando el Eurocode EN1991-4

Se procede a calcular las fuerzas verticales y presiones horizontales para el diseño del silo con cono invertido utilizando el Eurocode EN1991-4. Los datos del silo del caso de estudio, como fueron enlistados con anterioridad son los siguientes: (Geometría del silo en la Ilustración 9, ubicada en la página 20)

- Espesor de la pared del silo:  $250 \text{ mm}$
- Diámetro interno del silo:  $d = 18 \text{ metros}$ ,  $r = 9 \text{ metros}$
- Altura del material acumulado:  $z = 42.3 \text{ metros}$
- Peso específico del material almacenado:  $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$
- Coeficiente de fricción de la pared:  $\mu = 0.48$
- Coeficiente de presión lateral:  $K = 0.65$
- Ángulo de fricción interna:  $\phi_i = 36.6^\circ$
- Resistencia del concreto:  $f'_c = 40 \text{ MPa}$
- Resistencia del acero de refuerzo:  $f_{sy} = 500 \text{ MPa}$

Procedimiento ejemplificado utilizando  $r_c = 0.132 r$ , se debe calcular la excentricidad del canal de circulación, la cual debe ser determinada como:

$$e_c = r \{ \eta (1 - G) + (1 - \eta) \sqrt{1 - G} \}$$

En donde:

$$G = \frac{r_c}{r} = \frac{0.132 r}{r} = 0.132$$

$$\eta = \frac{\mu}{\tan \phi_i} = \frac{0.48}{\tan(36.6^\circ)} = 0.6463$$

Por lo tanto, la excentricidad es:

$$e_c = r \{ \eta (1 - G) + (1 - \eta) \sqrt{1 - G} \}$$

$$e_c = (9) \{ 0.6463 (1 - 0.132) + (1 - 0.6463) \sqrt{1 - 0.132} \}$$

$$e_c = 8.01 \text{ metros}$$

La longitud angular del contacto de la pared con el canal de circulación debe ser encontrada por las coordenadas circunferenciales  $\theta = \pm \theta_c$  donde:

$$\cos \theta_c = \frac{r^2 + e_c^2 - r_c^2}{2 r e_c}$$

$$\cos \theta_c = \frac{(9)^2 + (8.01)^2 - (0.132 \times 9)^2}{2 (9)(8.01)}$$

$$\cos \theta_c = 0.997$$

$$\theta_c = 4.43 \text{ rad}$$

La longitud de arco del contacto entre el canal de circulación y la pared del silo debe ser determinado como:

$$U_{wc} = 2 \theta_c r$$

$$U_{wc} = 2 (4.43) (9)$$

$$U_{wc} = 79.74 \text{ metros}$$

Y la longitud de arco de contacto entre el canal de circulación y el sólido estático es:

$$U_{sc} = 2 r_c (\pi - \Psi)$$

En donde:

$$\text{sen } \Psi = \frac{r}{r_c} \text{sen } \theta_c$$

$$\text{sen } \Psi = \frac{9}{(0.132 \times 9)} \text{sen } 4.43$$

$$\text{sen } \Psi = 0.5851$$

$$\Psi = 35.81 \text{ rad}$$

Por lo tanto, longitud de arco de contacto entre el canal de circulación y el sólido estático es:

$$U_{sc} = 2 r_c (\pi - \Psi)$$

$$U_{sc} = 2 (0.132 \times 9)(\pi - 35.81)$$

$$U_{sc} = -77.63 \text{ metros}$$

El área seccional en cruz del canal de circulación debe ser determinada como:

$$A_c = (\pi - \Psi) r_c^2 + \theta_c r^2 - r r_c \sin(\Psi - \theta_c)$$

$$A_c = (\pi - 35.81)(0.132 \times 9)^2 + (4.43)(9)^2 - (9)(0.132 \times 9) \sin(35.81 - 4.43)$$

$$A_c = 307.16 \text{ m}^2$$

Luego se procede a calcular las presiones de muro bajo la descarga excéntrica. La fuerza vertical en el muro en la zona de circulación depende de la distancia  $z$  debajo de la superficie del sólido equivalente y debe ser determinada como:

$$P_{hce} = P_{hco}(1 - e^{-z/z_{oc}})$$

Y la tracción friccionante en la pared al nivel  $z$  es:

$$P_{wce} = \mu P_{hce} = \mu P_{hco} (1 - e^{-z/z_{oc}})$$

En donde:

$$P_{hco} = \gamma K z_{oc}$$

$$z_{oc} = \frac{1}{K} \left( \frac{A_c}{U_{wc} \mu + U_{sc} \tan \phi_i} \right)$$

Por lo tanto:

$$z_{oc} = \frac{1}{0.65} \left[ \frac{307.16}{(79.74)(0.48) + (-77.63)(\tan 0.6387)} \right]$$

$$z_{oc} = 12.63 \text{ metros}$$

$$P_{hco} = \gamma K z_{oc}$$

$$P_{hco} = (16)(0.65)(12.63)$$

$$P_{hco} = 131.35 \text{ kPa}$$

Por lo tanto, la fuerza vertical en el muro en la zona de circulación es:

$$P_{hce} = P_{hco}(1 - e^{-z/z_{oc}})$$

$$P_{hce} = (131.35)(1 - e^{-42.3/12.63})$$

$$P_{hce} = 126.73 \text{ kPa}$$

Y la tracción friccionante en la pared al nivel z es:

$$P_{wce} = \mu P_{hce}$$

$$P_{wce} = (0.48)(126.73)$$

$$P_{wce} = 60.83 \text{ kPa}$$

A continuación se calcula las fuerzas verticales para diferentes profundidades hasta 42.3 metros:

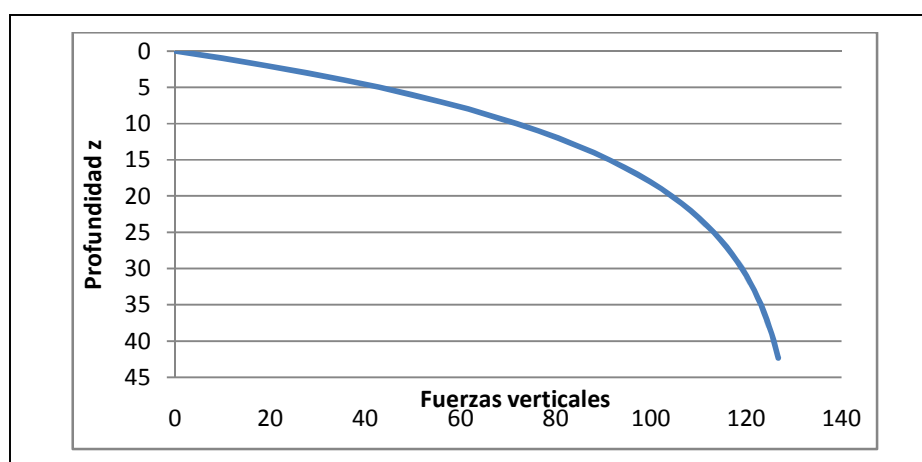
**Cuadro 3. Datos tabulados de cálculo de fuerzas verticales**

$P_{hco}$	$z_{oc}$	$P_{hce}$	$z$
131.35	12.63	0	0
131.35	12.63	9.99878404	1
131.35	12.63	19.23642851	2
131.35	12.63	27.77087381	3
131.35	12.63	35.6556497	4
131.35	12.63	42.94021112	5
131.35	12.63	49.67024832	6
131.35	12.63	55.88797346	7
131.35	12.63	61.63238539	8
131.35	12.63	66.93951422	9
131.35	12.63	71.84264736	10
131.35	12.63	76.37253824	11
131.35	12.63	80.55759928	12
131.35	12.63	84.42408002	13
131.35	12.63	87.99623183	14
131.35	12.63	91.29645996	15
131.35	12.63	94.34546413	16
131.35	12.63	97.1623683	17
131.35	12.63	99.76484067	18
131.35	12.63	102.1692045	19
131.35	12.63	104.3905404	20
131.35	12.63	106.4427811	21

Continuación Cuadro 3.

$P_{hco}$	$z_{oc}$	$P_{hce}$	$z$
131.35	12.63	108.3387986	22
131.35	12.63	110.0904852	23
131.35	12.63	111.7088278	24
131.35	12.63	113.2039769	25
131.35	12.63	114.5853105	26
131.35	12.63	115.8614925	27
131.35	12.63	117.0405275	28
131.35	12.63	118.1298105	29
131.35	12.63	119.1361738	30
131.35	12.63	120.0659295	31
131.35	12.63	120.9249092	32
131.35	12.63	121.7185006	33
131.35	12.63	122.4516813	34
131.35	12.63	123.1290499	35
131.35	12.63	123.754855	36
131.35	12.63	124.3330219	37
131.35	12.63	124.8671768	38
131.35	12.63	125.3606701	39
131.35	12.63	125.8165972	40
131.35	12.63	126.2378176	41
131.35	12.63	126.6269733	42
131.35	12.63	126.7378373	42.3

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 19. Gráfica de las fuerzas verticales en una profundidad  $z$ 

Fuente: Elaboración propia en base a cálculos

Los valores de la presión horizontal  $P_{hf}$  y la tracción friccionante de pared  $P_{wff}$  a cualquier profundidad después del llenado deben ser calculados como:

$$P_{hf} = P_{ho} Y_R$$

$$P_{wff} = \mu P_{hf}$$

En donde:

$$P_{ho} = \gamma K z_o = \gamma \frac{1}{\mu} \frac{A}{U}$$

$$Y_R = \left( 1 - \left\{ \left( \frac{z - h_o}{z_o + h_o} \right) + 1 \right\}^n \right)$$

$$z_o = \frac{1}{K \mu} \frac{A}{U}$$

$$z_o = \frac{1}{(0.65)(0.48)} \frac{\frac{\pi}{4}(18)^2}{\pi(9)}$$

$$z_o = 28.85 \text{ m}$$

Donde:

$h_o$  = el valor de  $z$  al contacto más alto de la pared del sólido

Para un silo simétrico circular lleno de radio  $r$ ,  $h_o$  debe ser determinado como:

$$h_o = \frac{r}{3} \tan \phi_r$$

$$h_o = \frac{9}{3} \tan(0.6387)$$

$$h_o = 0.0334 \text{ m}$$

$$n = -(1 + \tan \phi_r) \left( 1 - \frac{h_o}{z_o} \right)$$

$$n = -(1 + \tan 0.6387) \left( 1 - \frac{0.0334}{28.85} \right)$$

$$n = -1.0099$$

$$Y_R = \left( 1 - \left\{ \left( \frac{z - h_o}{z_o + h_o} \right) + 1 \right\}^n \right)$$

$$Y_R = \left( 1 - \left\{ \left( \frac{42.3 - 0.0334}{28.85 + 0.0334} \right) + 1 \right\}^{-1.0099} \right)$$

$$Y_R = 0.5977$$

$$P_{ho} = \gamma K z_o$$

$$P_{ho} = (16)(0.65)(28.85)$$

$$P_{ho} = 300.04 \text{ kPa}$$

$$P_{hf} = P_{ho} Y_R$$

$$P_{hf} = (300.04)(0.5977)$$

$$P_{hf} = 179.32 \text{ kPa}$$

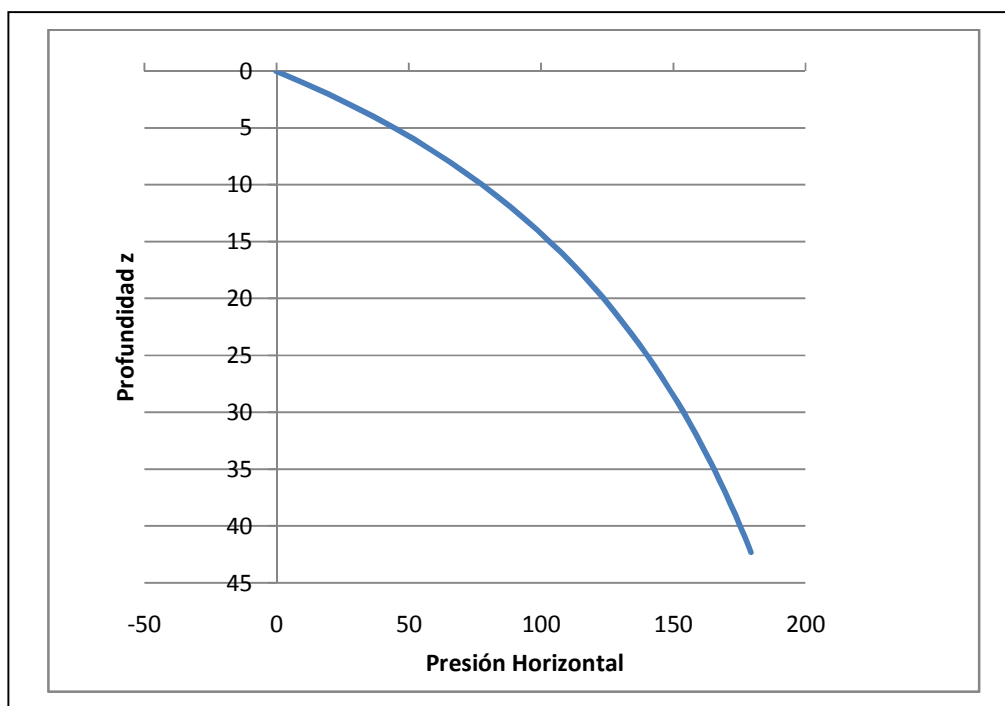
**Cuadro 4. Datos tabulados de cálculo de presiones horizontales**

$z_o$	$h_o$	$P_{ho}$	$Y_R$	$P_{hf}$	$z$
28.85	0.0334	300.04	0.5976562	179.32077	42.3
28.85	0.0334	300.04	0.5959357	178.80454	42
28.85	0.0334	300.04	0.5900932	177.05158	41
28.85	0.0334	300.04	0.5840803	175.24744	40
28.85	0.0334	300.04	0.5778891	173.38985	39
28.85	0.0334	300.04	0.5715118	171.47641	38
28.85	0.0334	300.04	0.5649399	169.50457	37
28.85	0.0334	300.04	0.5581643	167.4716	36
28.85	0.0334	300.04	0.5511753	165.37464	35
28.85	0.0334	300.04	0.5439628	163.21061	34
28.85	0.0334	300.04	0.536516	160.97625	33
28.85	0.0334	300.04	0.5288231	158.66809	32
28.85	0.0334	300.04	0.5208719	156.2824	31
28.85	0.0334	300.04	0.5126491	153.81523	30
28.85	0.0334	300.04	0.5041406	151.26234	29
28.85	0.0334	300.04	0.4953312	148.61918	28
28.85	0.0334	300.04	0.4862048	145.88089	27
28.85	0.0334	300.04	0.476744	143.04226	26
28.85	0.0334	300.04	0.4669299	140.09766	25
28.85	0.0334	300.04	0.4567427	137.04107	24
28.85	0.0334	300.04	0.4461605	133.86598	23
28.85	0.0334	300.04	0.4351599	130.56539	22
28.85	0.0334	300.04	0.4237158	127.1317	21
28.85	0.0334	300.04	0.4118008	123.55672	20
28.85	0.0334	300.04	0.3993853	119.83156	19
28.85	0.0334	300.04	0.3864371	115.94658	18
28.85	0.0334	300.04	0.3729212	111.89127	17
28.85	0.0334	300.04	0.3587995	107.65421	16
28.85	0.0334	300.04	0.3440305	103.22292	15

Continuación Cuadro 4.

$z_o$	$h_o$	$P_{ho}$	$Y_R$	$P_{hf}$	$z$
28.85	0.0334	300.04	0.3285687	98.583748	14
28.85	0.0334	300.04	0.3123642	93.721751	13
28.85	0.0334	300.04	0.2953623	88.620507	12
28.85	0.0334	300.04	0.2775028	83.261941	11
28.85	0.0334	300.04	0.2587192	77.626115	10
28.85	0.0334	300.04	0.2389381	71.690979	9
28.85	0.0334	300.04	0.2180779	65.432081	8
28.85	0.0334	300.04	0.196048	58.822236	7
28.85	0.0334	300.04	0.1727474	51.831129	6
28.85	0.0334	300.04	0.1480631	44.424853	5
28.85	0.0334	300.04	0.1218683	36.565362	4
28.85	0.0334	300.04	0.0940202	28.209822	3
28.85	0.0334	300.04	0.0643575	19.309826	2
28.85	0.0334	300.04	0.0326972	9.8104654	1
28.85	0.0334	300.04	-0.001169	-0.350801	0

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 20. Gráfica de las presiones horizontales en una profundidad  $z$ 

Fuente: Elaboración propia en base a cálculos

El cálculo de las fuerzas verticales y las presiones horizontales también debe de realizarse con los valores  $r_c = 0.25 r$ ,  $r_c = 0.4 r$ ,  $r_c = 0.6 r$ , los cuales son utilizados en el caso de estudio y están enlistados en la sección 5.2.4.3.1, en la página 54 del Eurocode 1991-4: 2006.

El valor de los cortes y momentos que producen las presiones, deben ser calculados por el método de análisis por elemento finito en diferentes puntos de la pared del cuerpo del silo. Dicho procedimiento es bastante laborioso y está fuera del alcance de este documento, ya que el mismo está enfocado a estudiar las implicaciones de diseño de los silos de cono invertido y no directamente el diseño estructural que este conlleva.

## **7. SEÑALES DE ADVERTENCIA PARA OPERADORES DE PLANTA**

Como se mencionó antes, miles de silos homogenizadores de cono invertido de cemento y harina sin procesar han sido diseñados desde 1977 y la mayoría se han comportado satisfactoriamente. No es la intención de este trabajo ser alarmista, sin embargo existe un incremento de silos de cono invertido que han fallado a nivel mundial. Mientras generalmente la causa de estas fallas es la mala calidad de construcción, hay una gran recopilación de pruebas que indican que muchos códigos de diseño de silos, incluyendo a los muy respetados códigos alemán y australiano, no pueden pronosticar realmente las reacciones producidas por las descargas excéntricas de los silos, como es el caso de los silos de cono invertido.

Es probable que con el pasar de los años, muchos silos de cono invertido de cemento, reforzados convencionalmente, muestren señales de fatiga, las cuales si se quedan desprovistas de tratamiento, pueden resultar en la falla del mismo.

### **7.1 Silos con mucho riesgo de falla**

Mientras no es posible comentar sobre el adecuado diseño de un silo en particular, sin una evaluación completa del mismo, es posible categorizar los silos con más peligro de falla. Estos parámetros son enlistados:

7.1.1 Silos de celda sencilla con refuerzo convencional (Opuestos al post-tensado): La mayoría de silos de menos de 20 metros de diámetro (de 12,000 a 15,000 toneladas de capacidad, o menos) son reforzados convencionalmente porque las tensiones de aro determinadas por la aplicación de códigos convencionales pueden ser resistidas por el refuerzo convencional, los cuales por el tamaño del silo, son más baratos que el post-tensado circunferencial. Lo malo es que las paredes son más delgadas, y como están sujetas a la tensión de aro, la pared agrietada de concreto tiene poca o ninguna capacidad de resistir corte. El recubrimiento interno y externo para el refuerzo puede ser perdido por los esfuerzos de corte que resiste.

7.1.2 Silos homogenizadores: Los silos homogenizadores de cono invertido que utilizan equipo de Ibau, Claudius Peters o Polysius por ejemplo, están particularmente en peligro debido al proceso de homogenización utilizado. Después de la trituración, la harina sin procesar se transporta para almacenamiento mecánicamente o neumáticamente, y las variaciones químicas se reflejan en las capas del silo homogenizador. El proceso de homogenización involucra la creación deliberada de "Ratoneras" o canales de circulación, que corren desde la parte inferior a la superior de la zona de almacenamiento, para cortar completamente las capas de del material con la función de mezclar u homogenizar la harina sin procesar. Para crear deliberadamente una ratonera y maximizar la mezcla se puede implicar la descarga desde un punto discreto (excéntrica) para un período más largo que tradicionalmente es el caso en silos de de cono invertido de cemento, resultando en un potencial canal de circulación con diámetro más largo, resultante de las diferentes presiones de pared.

7.1.3 Silos viejos: La presión reducida adyacente al punto de descarga y las presiones más altas inmediatamente sobre cualquier lado de la zona de presión baja (Ver Ilustración 10) da como resultado esfuerzos de flexión que cambian continuamente de tensión a compresión, ambos sobre el interior y exterior de la superficie de la pared, dependiendo en qué segmento del silo ocurre la descarga. Los silos también están expuestos a la sobre fatiga (asumiendo que los patrones de carga del Eurocode son realistas), entonces esto puede conducir a una falla por fatiga.

7.1.4 Silos que tienden a estar llenos: Obviamente, mientras más lleno esté el silo, son mas grandes las cargas que se producen y por lo tanto existirán más problemas.

7.1.5 Silos CI a diferencia de silos ME: La experiencia en diseño de silos de cono invertido indica que los silos ME, la tasa de circulación de la zona de almacenamiento es precisamente controlada por un control de circulación y la formación del canal de circulación dentro de la zona de almacenamiento es por lo tanto más controlada.

En el caso de los silos CI, el material circula desde la zona de almacenamiento, donde la cámara de inspección debajo del cono es controlada, aparte del nivel de ventilación del segmento en cuestión.

En su trabajo de investigación, Rothfuchs y Jantzen describieron cómo lograron medir la circulación a corto plazo del material, más grande que 2,000 tph, desde la zona de almacenamiento a la cámara de inspección, aunque solamente 400 tph fueron requeridas para el llenado simultáneo de dos camiones.

Los silos CI son considerablemente más propensos estar supeditados a sismos que los silos ME y nuestro punto de vista es que el tamaño y la tasa de formación de los canales de circulación resultarán en cantidades más altas de carga sobre los silos CI.

## **7.2 Procedimientos a seguir**

Si algún silo cae en alguna de las categorías de la sección anterior, se recomienda lo siguiente:

- Una meticulosa inspección visual debe ser realizada por un ingeniero experimentado.
- Se debe considerar el chequeo del diseño del silo de acuerdo al Eurocode 1991-4.
- El sistema de control de la descarga debe ser modificado para asegurar que el tiempo de descarga desde un punto se reduzca a la mayor brevedad posible, preferiblemente no más de 5 minutos. De acuerdo con trabajo de análisis elaborado hasta la fecha, si el tamaño del canal de circulación puede ser controlado para no exceder alrededor de 2.5 metros el diámetro, entonces las cargas sobre la pared de silo son

manejables. Esto sugiere que el tiempo de descarga desde un punto puede ser minimizado. Esta conclusión contradice directamente el consejo de Rothfuchs y Jantzen de Holcim, que en su publicación, indican que el tiempo de descarga debe ser incrementado en cada punto.

- Un silo de cono invertido nunca debe ser operado con el conocimiento que uno o más puntos de descarga son obstruidos o están en mal funcionamiento.
- Finalmente, ningún productor de cemento que considere construir un nuevo silo de cemento o un silo homogenizador de harina sin procesar debe considerar instrumentar el silo con el propósito de que las presiones de pared puedan ser medidas directamente.

## 8. CONCLUSIONES

1. El código Eurocode EN1991-4 presenta un modelo más racional para el análisis de la descarga excéntrica que los presentados en códigos como el DIN1055, el ACI313 y el AS3774 y no debe ser ignorado para silos de cono invertido.
2. Hay una considerable discrepancia entre los parámetros del material recomendados por los diferentes códigos y los resultados experimentales, específicamente en el diámetro de canal de circulación del silo. La gran diferencia entre los parámetros produce dificultad para el diseñador en tener confianza de los parámetros recomendados en cualquiera de los códigos analizados.
3. Basado en pruebas sobre muestras de silos de cemento y harina sin procesar, el Eurocode puede ser innecesariamente conservador en los valores recomendados de  $\theta_i$  – ángulo de fricción interna y  $\mu$  – coeficiente de fricción de la pared. Sin embargo, los valores de  $\gamma$  – peso específico recomendados por todos los códigos, no son conservadores.
4. La aplicación de los patrones de carga del Eurocode introducen momentos flexionantes significativos y cortes en la pared de silo, mientras que la magnitud de las tensiones de aro son considerablemente menores que las especificadas por otros códigos. En definitiva, es el corte, en lugar de los momentos flexionantes, el que crea el problema más grande para los diseñadores y conduce a la conclusión que todos los silos de cédula sencilla de cono invertido deben ser post-tensados circunferencialmente en lugar de ser del convencional concreto reforzado.

5. La derivación del patrón de carga del Eurocode es complicada e involucra el chequeo de varios escenarios de diferentes tamaños de canales de circulación. Investigación adicional que incluya instrumentación a escala natural de los silos de cono invertido es necesaria antes de que el Eurocode vuelva a ganar aceptación incondicional.
  
6. El caso aplicativo ejemplifica de manera precisa y exacta la teoría expuesta del comportamiento estructural de los silos de cono invertido. Al momento de calcular las presiones producidas por la descarga excéntrica, se observa un incremento de la presión con respecto al incremento de la altura del silo analizada.

## 9. RECOMENDACIONES

1. Diseñar de acuerdo al Eurocode EN1991-4, los silos con descarga excéntrica, incluyendo a los silos con una relación de H/D (altura/diámetro) más grandes que 2, además de cualquier otro código nacional aplicable en el país en que se elabora el diseño. La exclusión de los silos de cono invertido de la cobertura del Eurocode es una decisión irracional.
2. De acuerdo con el trabajo de investigación realizado en este documento y con base a trabajos terminados por otros ingenieros, es probablemente razonable asumir un diámetro pequeño de canal de circulación (0.25 D o incluso menos) cuando se aplica el Eurocode a silos de cono invertido.
3. Utilizar valores conservadores de los parámetros recomendados por el Eurocode, específicamente valores de  $\delta_i$  – ángulo de fricción interna, valores de  $\mu$  – coeficiente de fricción de la pared, y valores de  $\gamma$  – peso específico.
4. En los sistemas de post-tensado circunferencial en los silos de cono invertido, debe hacerse todo lo posible para asegurar la calidad de los trabajos durante la construcción, particularmente en la falla de conexión. Las vueltas sobre el refuerzo horizontal de aro deben ser eficaces y escalonadas. Los estribos deben ser suministrados entre el acero de aro interior y exterior en todas vueltas para evitar la posible falla de conexión. Éste es un requisito usual del código de concreto alemán, pero general no requerido en otro código.

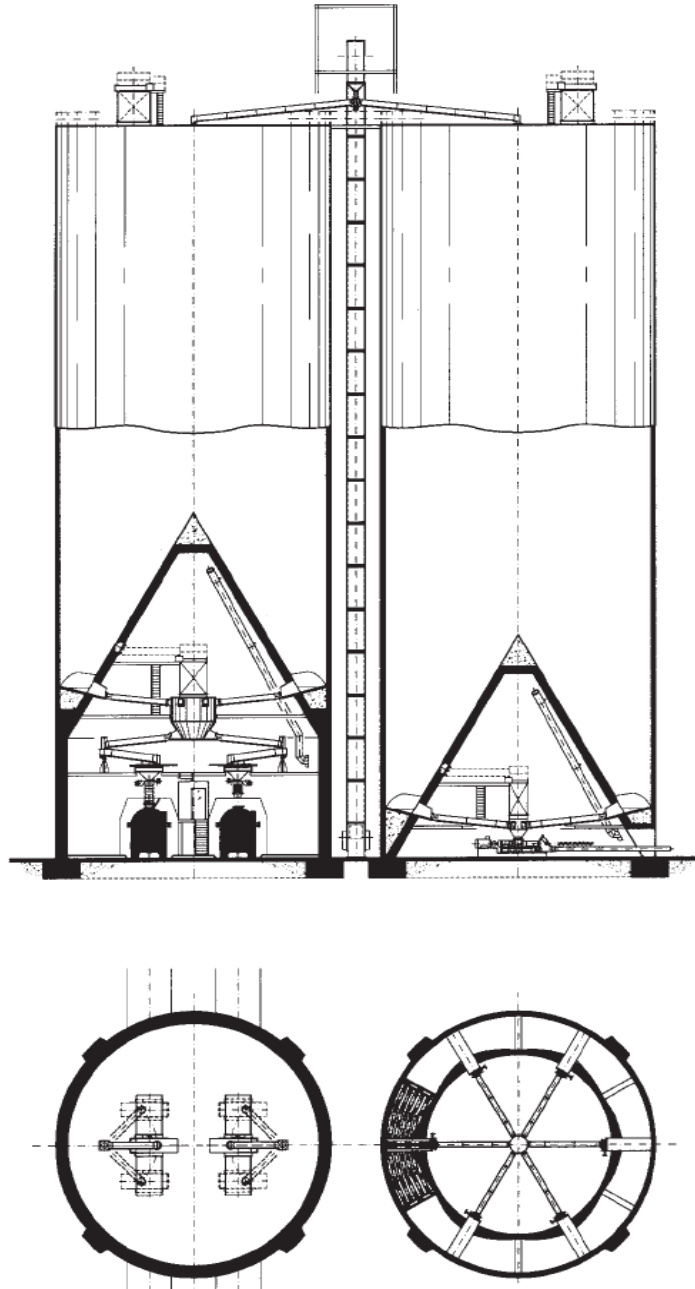
5. Tradicionalmente los silos de cono invertido de cédula sencilla de alrededor de 18 a 20 metros de diámetro, son diseñados utilizando el refuerzo convencional. Debido a las significativas fuerzas de corte que resultan de la aplicación de los patrones de carga del Eurocode, serias consideraciones deben ser dadas a todos los silos de cono invertido con pots-tensiones circunferenciales. Esto debe ser asumido sin los problemas como pérdidas por fricción en la tubería de la curvatura ajustada. Sin embargo, un silo de concreto reforzado supeditado a tensiones de aro, tiene poca o ninguna capacidad de resistir corte, y tendrá una falla por corte según el patrón de carga del Eurocode.
  
6. Auxiliarse de software u hojas de cálculo electrónicas para calcular las presiones producidas en la pared del silo. Estas herramientas permiten un cálculo más exacto de las presiones y permiten obtener gráficas que rectificarán que el trabajo hecho es preciso y que los cálculos tienen lógica para el análisis de la descarga excéntrica.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

1. American Concrete Institute -ACI-. 1997. Código ACI 313-97. Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials. Michigan, Estados Unidos de América. 40 páginas.
2. British Standard EN Eurocode 1991-4:2006. 2006. *-Actions on structures-, Part 4: Silos and tanks*. Londres, Inglaterra. 107 páginas.
3. Claudius Peters Technologies. 2006. Silo with inverted cone – Principle function and basic structure. Berlín, Alemania. Technical Publication No. 619.0015.0022A/01. 24 páginas.
4. Deutsches Institut für Normung -DIN- (Instituto Alemán de Normalización). 2005. Norma Alemana, DIN1055-6. *Loads in silo bins*. Berlín, Alemania. 104 páginas.
5. Durack, James y McKay, Hugh. 2006. *Comparison of Design Implications of Alternate Silo Loads Derived from DIN1055, AS3774 and the new Eurocode 1991-4, as they apply to a 10,000 Tonne Inverted Cone Cement Silo*. Connell Wagner Pty Ltd Internal Publication. Melbourne, Australia. 36 páginas.
6. Durack, James y McKay, Hugh. 2006. *Implications of the new Eurocode EN1991-4 on the design of Cement and Raw Meal Storage Silos*. Cemtech 2006. Melbourne, Australia. 28 páginas.
7. Hamburg, Ibau. 2008. *Central Cone Silos, from the structural point of view*. Ibau Hamburg Technologies. Stuttgart, Alemania. 28 páginas.
8. Rothfuchs y Jantzen. 2006. *Big Silos Under Pressure*. Stuttgart, Alemania. Publicación interna de Holcim. 52 páginas.
9. Standards Australia Committee BD-002. 2001. Código Australiano AS3600. *Concrete structures*. Melbourne, Australia. 165 páginas.
10. Standards Australia Committee BD/65. 1996. Código Australiano AS3774. *Loads on bulk solids containers*. Melbourne, Australia. 81 páginas.
11. TUNRA Bulk Solids Handling Research Associates. 2006. *Material Properties of Eleven Cement & Raw Meal Samples for Structural Load Estimations*. Reporte No. 6626. Callaghan, Australia. 42 páginas.

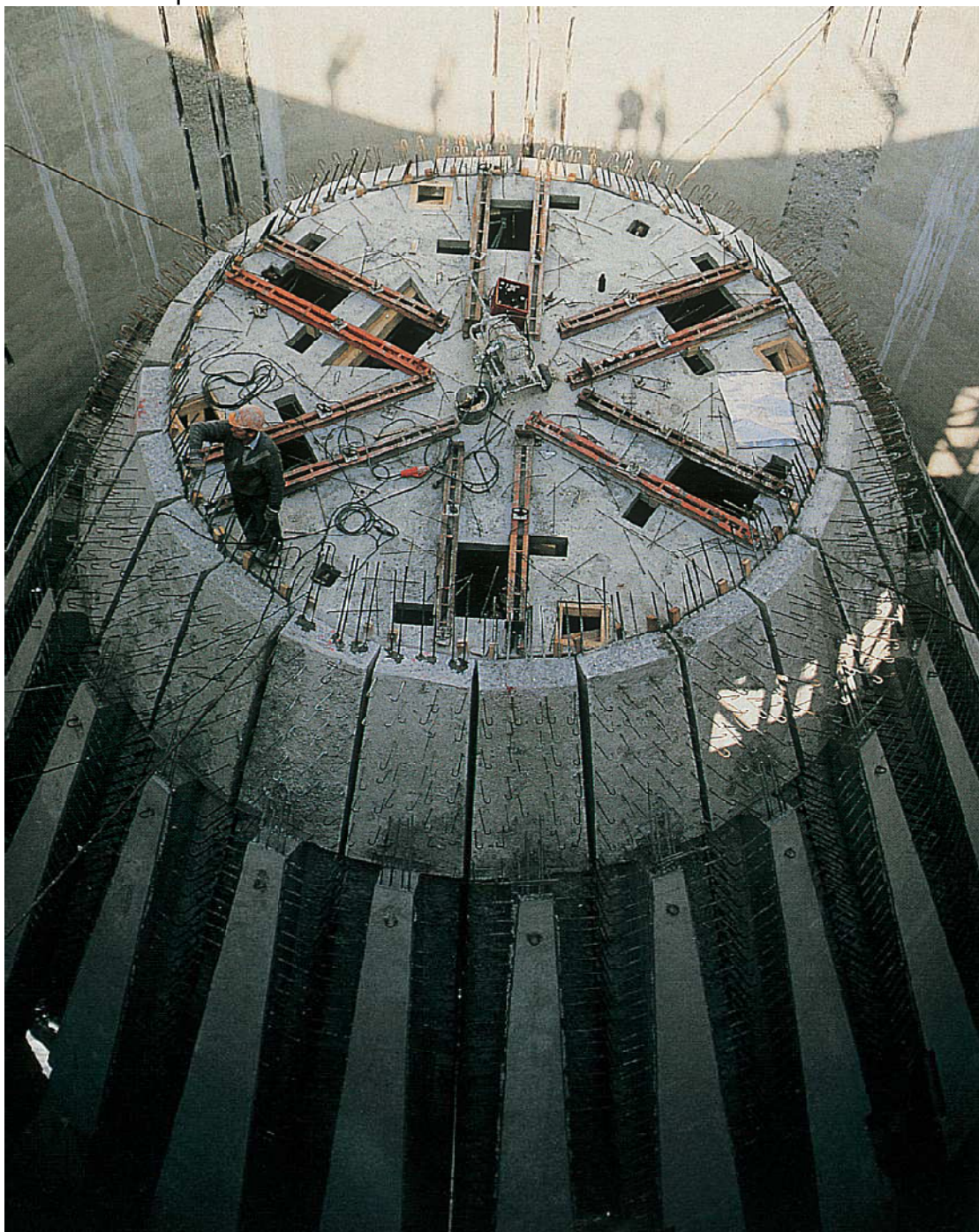
## APÉNDICE

Apéndice 1. Esquema del silo de almacenamiento de Ibau Hamburg



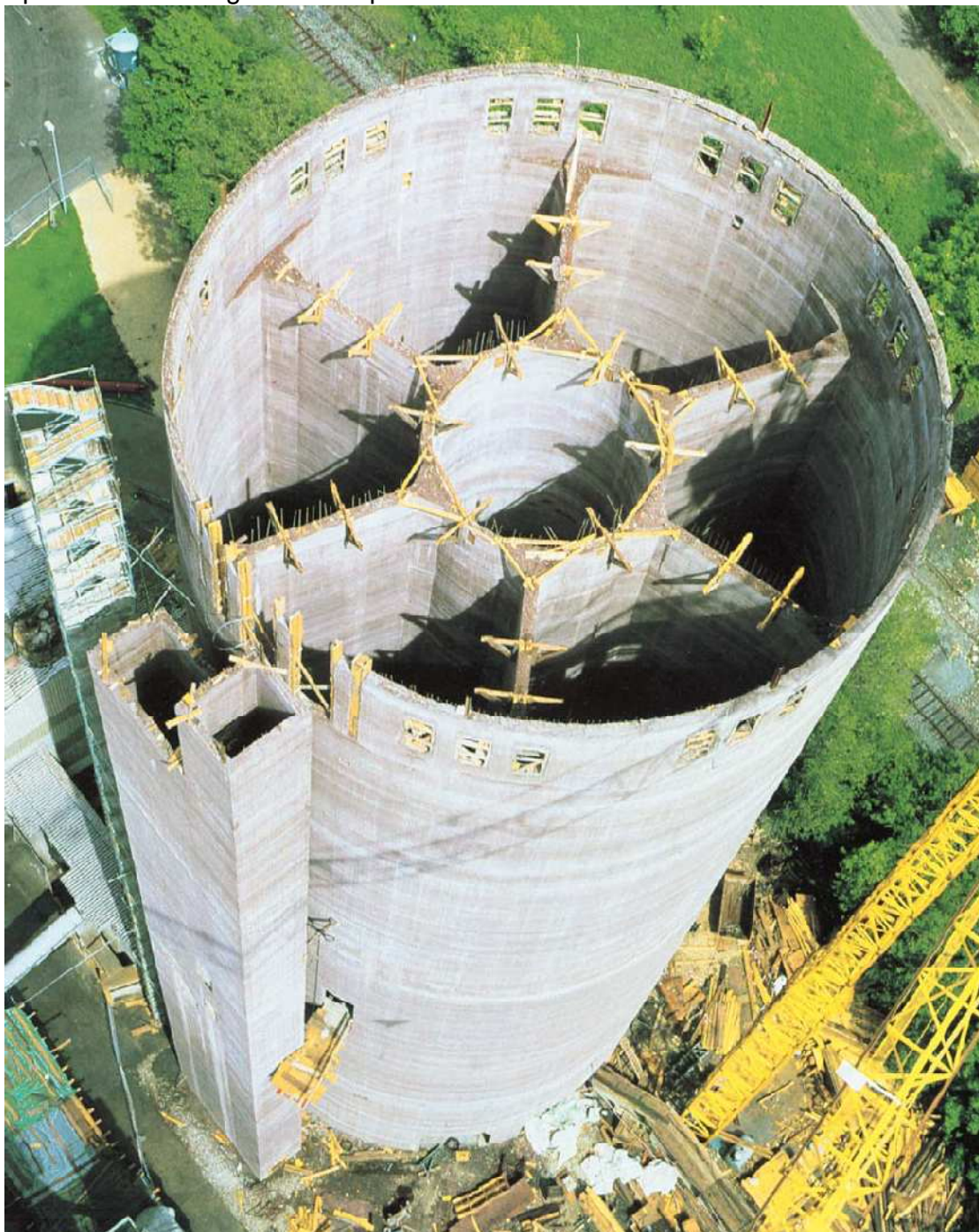
Fuente: Ibau Hamburg. Central Cone Silos, from the structural point of view. Enero 2008.

## Apéndice 2. Proceso de construcción del cono invertido



Fuente: Ibau Hamburg. Central Cone Silos, from the structural point of view. Enero 2008.

Apéndice 3. Vista general del proceso de construcción del silo de cono invertido



Fuente: Ibau Hamburg. Central Cone Silos, from the structural point of view. Enero 2008.

Apéndice 4. Vista general del cono invertido



Fuente: Ibau Hamburg. Central Cone Silos, from the structural point of view. Enero 2008