

ANÁLISIS PARA EL DISEÑO DE UN SILO DE CLINKER Y SU IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL

Norma L. Ercoli^{*}, Patricia M. Ciancio^{*}, y Carlos M. Berardo^{*}

^{*} Area de Estructuras, Departamento de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires
Av. Del Valle 5737, Olavarría, B7400JWI, Argentina
e-mail: nercoli@fio.unicen.edu.ar, web page: <http://www.fio.unicen.edu.ar>

Palabras clave: silo, modelización, proyecto, diseño, implementación computacional, clinker.

Resumen. *El objetivo fundamental del presente trabajo consiste en efectuar el estudio de un proyecto correspondiente a un silo de clinker, tipología estructural de gran aplicación en las industrias de proceso continuo, como es el caso de la operatoria de las industrias cementeras. El problema tratado abarca varios aspectos: estudio teórico del problema, implementación del modelo computacional, interpretación de resultados; contando con la documentación correspondiente al proyecto del mismo.*

Para el diseño se tuvieron en cuenta las disposiciones del Código ACI 313 y el Reglamento CIRSOC, dada la exigencia de cumplimentar algunos requisitos para el silo en cuestión, de manera de permitir que la planta del mismo sea tal que permita que el material ensilado pierda temperatura y debe también cumplir la condición de estanqueidad, a los fines de que el material ensilado no entre en contacto con la humedad.

Los resultados alcanzados, a través de la implementación del modelo computacional, se encuentran en una satisfactoria aproximación con los resultados obtenidos de la aplicación de la teoría clásica. Asimismo del análisis computacional efectuado se visualiza la importancia relevante que guardan consigo las condiciones de borde, las cuales deben representar lo más fielmente a las diseñadas para la estructura en cuestión.

1 INTRODUCCIÓN

Los silos son tipologías estructurales construidas con el propósito de almacenar material granular o pulverulento, u otra sustancia líquida, y forman parte de operaciones de plantas industriales en las cuales son utilizados como almacenamiento de granos y productos de la manufactura.

Existen varios criterios para clasificar los silos; según su geometría, se pueden establecer silos de planta rectangular o cuadrada y silos circulares. A su vez pueden ser aislados o formar conjuntos conectados, los cuales se denominan silos multicelulares.

Para el caso particular, motivo de análisis en el presente trabajo, se analiza una estructura de silo perteneciente a la obra civil de una planta cementera del partido de Olavarría, que forma parte del proceso de fabricación de cemento y cuya finalidad es almacenar clinker. Debido a los requerimientos del proceso y capacidad surge la geometría del silo. Se trata de un silo cilíndrico aislado de hormigón, con las siguientes dimensiones: diámetro 35 m, altura 34 m y con una capacidad de 42.000 ton. Se encuentra apoyado en el terreno y su fundación es a través de un anillo de fundación. El hormigón que se utiliza para su construcción, es de calidad H 30, y de baja permeabilidad, resistente a la acción del medio ambiente, dado que el silo debe ser una estructura herméticamente cerrada al aire y al agua con la finalidad de proteger el material almacenado de las inclemencias atmosféricas. Otra consideración importante en los silos de hormigón es el control de la fisuración en condiciones de servicio.

2 FILOSOFÍA DEL ANÁLISIS Y DISEÑO DE SILOS DE HORMIGÓN

El diseño de silos no solo requiere que el diseñador cumpla con requisitos de capacidad, sino que también se consideren las condiciones de serviciabilidad. El silo debe ser capaz de resistir las cargas aplicadas sin que ocurran agrietamientos que puedan ocasionar filtraciones y/o contacto del material con humedad. Para cumplir con estos requisitos es indispensable proveer una cantidad y una distribución óptima del refuerzo a utilizar, además de un buen diseño y control durante la ejecución y la utilización de hormigón de buena calidad.

Las cargas para las cuales se realiza el análisis y diseño del silo varían, dependen de varias razones, entre ellas: lugar donde se construyó el silo, destino o función principal del mismo, importancia de la estructura y de las consecuencias de ocurrencia de una falla en la misma. En base a estos criterios, se pueden identificar los estados de carga para los cuales se debe analizar y diseñar el silo. Es así que se consideran cargas gravitatorias, cargas por presiones internas de acuerdo a las características del material a ensilar, cargas de viento y cargas sísmicas. Las cargas gravitatorias incluyen el peso de la estructura, como también todas las tuberías y accesorios que estén asociados al silo como la cubierta y sistema de cintas transportadoras con la que se efectúa el llenado del silo en su parte superior. Las cargas de presión interna son ocasionadas por el material sólido o líquido que se almacena en el silo. Estas varían de acuerdo a las dimensiones del silo (altura y diámetro) y de las propiedades del material almacenado. La consideración de la temperatura del material ensilado se realizará de acuerdo a las especificaciones del American Concrete Institute, ACI 313¹ y es importante el estado tensional que ella produce para el cálculo de las paredes del silo.

En relación a las cargas de viento, se considera el tratamiento de acuerdo al Reglamento CIRSOC 102² y según la zona de ubicación de la obra se toman los valores de velocidad básica de viento, para establecer los diagramas de presiones de cálculo.

En cuanto al sismo, por la ubicación de la estructura a analizar, de acuerdo a la zonificación sísmica de la República Argentina, Reglamento Inpres-Cirsoc 103³, se encuentra en zona de peligrosidad sísmica muy reducida, zona 0, para la cual los requerimientos se establecen de acuerdo con el tipo de construcción.

Para estos estados de carga es importante que el diseño del silo permita resistir los mismos sin que la estructura sufra daños que resulten en pérdida de material almacenado o colapso de la estructura. En el caso particular analizado, la construcción se ubica en una zona de resguardo del viento, de todos modos se introduce el efecto en el análisis.

3 TEORÍA CLÁSICA DE LÁMINAS CILÍNDRICAS

En este punto se consideran los conceptos de la teoría clásica⁴ que permiten realizar el análisis de esta tipología estructural. Aquellas estructuras cuya superficie media presenta curvatura, se denominan láminas. Esa curvatura es la causa de la aparición de esfuerzos axiales (esfuerzos de membrana) en las láminas, que junto a los esfuerzos de flexión les otorga una capacidad portante muy superior comparada con la de las placas. Para establecer las ecuaciones necesarias que resuelven estos problemas, se considera un elemento diferencial, que forma parte de una lámina cilíndrica circular, sometida a una presión interior y se plantea el equilibrio de dicho elemento. De las mismas y de las condiciones de simetría y de deformaciones se obtiene la ecuación que gobierna el problema

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4 w = \frac{Z}{D} \quad (1)$$

siendo $\beta^4 = \frac{Ed}{4r^2 D} = \frac{3(1-\mu^2)}{r^2 d^2}$. La solución para el caso en estudio, o sea cuando la lámina se clasifica como tubo largo, y cuando el espesor comparado con el radio es pequeño es:

$$w = C_1 e^{-\beta x} \cos(\beta x) + C_2 e^{-\beta x} \sen(\beta x) + W_{part} \quad (2)$$

La solución particular corresponde al caso de presión hidrostática, dado que es la configuración de carga que se asimila a la acción de material pulverulento. Las constantes se determinarán para cada caso de acuerdo a las condiciones de sustentación.

Los casos resueltos en forma analítica se comparan con los modelos que se implementan computacionalmente, utilizando un software de elementos finitos.

4 ACCIONES DEBIDAS AL MATERIAL ENSILADO

El ingreso de material a los silos generalmente se realiza por la parte superior del mismo, en forma concéntrica sobre la cubierta superior. En cuanto al vaciado hay varias opciones para efectuarlo, resultando dos grupos: vaciado centrado y vaciado excéntrico.

Mediante resultados de ensayos experimentales durante el llenado y vaciado del material

en silos se ha encontrado que las presiones difieren notablemente de las calculadas con el material en reposo. Estos factores se deben considerar para el diseño, lo cual implica el cálculo de las presiones de llenado y a partir de las mismas cuantificar a través de un coeficiente de mayoración las sobrepresiones producidas durante el vaciado, y/o llenado y vaciado simultáneos.

5 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE SILOS. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En el cálculo de las acciones producidas por el llenado de silos los esfuerzos se calcularon considerando presiones hidrostáticas de valor:

$$P = \gamma \cdot h \quad (3)$$

Siendo: P = Presión lateral o vertical en kg/m^2 , h = Altura desde el borde superior de la sección considerada, en metros, γ = Peso específico del material ensilado en kg/m^3 .

Aplicando presiones hidrostáticas, los espesores de pared resultaban excesivamente elevados. Por otro lado, esta teoría no tenía en cuenta los esfuerzos de rozamiento que aparecen en las paredes del silo. Muy pronto, los pioneros en el diseño de silos observaron que la diferencia más importante entre un fluido y un producto pulverulento era el rozamiento interno entre partículas, siendo este último el responsable de que aparezca el rozamiento grano-pared. Esta propiedad es la que hace que un depósito especialmente diseñado para almacenamiento de fluidos no sea apto para almacenamiento de productos pulverulentos (debido a los esfuerzos de rozamiento).

Entre varias teorías, de las cuales la teoría de Jansen, para el llenado de silos es de las más utilizadas se basan en la caracterización del silo como silo horizontal o vertical.

$$d \geq 2h \frac{\text{sen}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{3}\right) \cos \phi}{\text{sen}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{2\phi}{3}\right)} \quad (4)$$

Si se cumple la relación anterior el silo es horizontal, caso contrario es vertical. Para el caso particular y considerando los parámetros geométricos, las presiones horizontales se calcularán según la fórmula de empuje sobre muros.

Se debe aclarar que según el criterio de Reimbert ⁵, aunque el silo se encuentre en la clasificación de horizontal se debe realizar el cálculo mediante las teorías válidas para silos verticales y adoptar la curva que arroje los mayores valores de presión. Para este caso el coeficiente de sobrepresión según ACI 313 Cd= 1.65, de acuerdo a la relación altura/diámetro ≤ 2 .

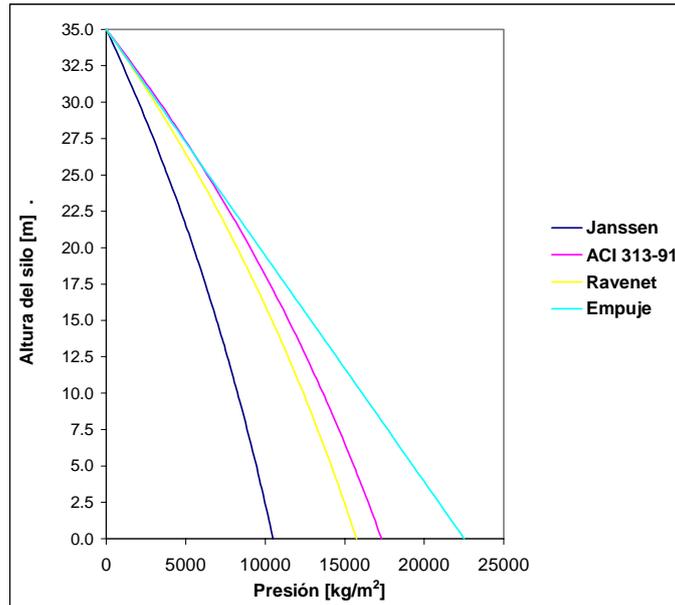


Figura 1. Gráfico comparativo de presiones

Al realizarse la apertura de la boca de carga se produce un efecto dinámico provocado por el peso instantáneo de un estado de equilibrio en reposo a un estado de equilibrio en movimiento de la masa ensilada, produciéndose así el aumento de las presiones sobre las paredes. La magnitud de la sobrepresión de vaciado depende fundamentalmente de las características de los materiales ensilados, de la posición de los orificios de vaciado y de la esbeltez del silo.

$$e = \frac{H}{1,12D} \quad (5)$$

El cálculo de las presiones de vaciado puede realizarse según diferentes teorías de las cuales se efectuaron los cálculos según lo establecido por Ravenet⁶, y por el Código ACI 313/91.

Según lo expuesto las distribuciones de presiones provocadas por materiales pulverulentos contenidos en los silos, pueden aproximarse a la distribución correspondiente a presión hidrostática.

La solución general de la ecuación diferencial para el caso de laminas cilíndricas sometidas a presión hidrostática resulta influenciada por las condiciones de borde. A tal efecto se resolvieron según la teoría clásica los casos siguientes, para el conjunto de datos que se detallan: $r = 3 \text{ m}$; $d = 0.12 \text{ m}$; $h = 6 \text{ m}$; $E = 3e^5 \text{ kg/cm}^2$; $\mu = 0.15$; $\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\beta = 2.18 \text{ /m}$, $\lambda = 2.88 \text{ m}$, $h > \lambda \therefore$ clasifica como tubo largo:

Caso 1: Borde inferior apoyado

$x [m]$	$w [m]$	$N\phi [kg/m]$
0	-1,50E-04	18.000
0.5	-1,38E-04	16.500
1	-1,25E-04	15.000
1.5	-1,13E-04	13.500
2	-1,00E-04	12.000
2.5	-8,75E-05	10.500
3	-7,50E-05	9.000
3.5	-6,25E-05	7.500
4	-5,00E-05	6.000
4.5	-3,75E-05	4.500
5	-2,50E-05	3.000
5.5	-1,25E-05	1.500
6	0,00	0,00

Tabla 1. Valores de desplazamientos y esfuerzos para base apoyada

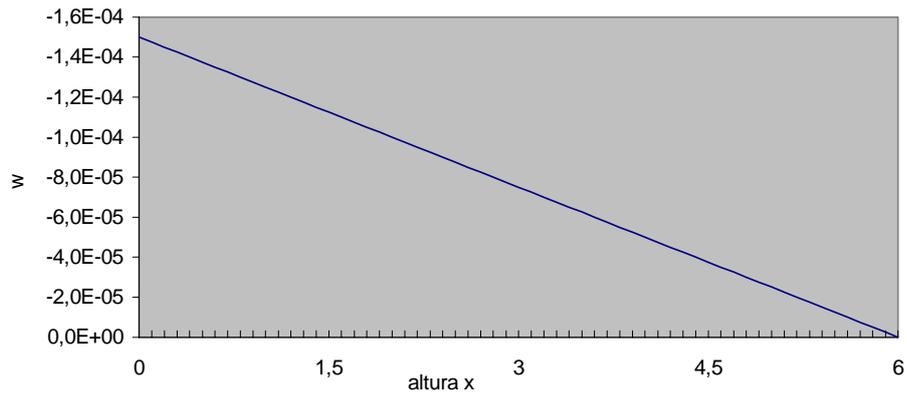


Figura 2. Variación del desplazamiento w en la altura para base apoyada

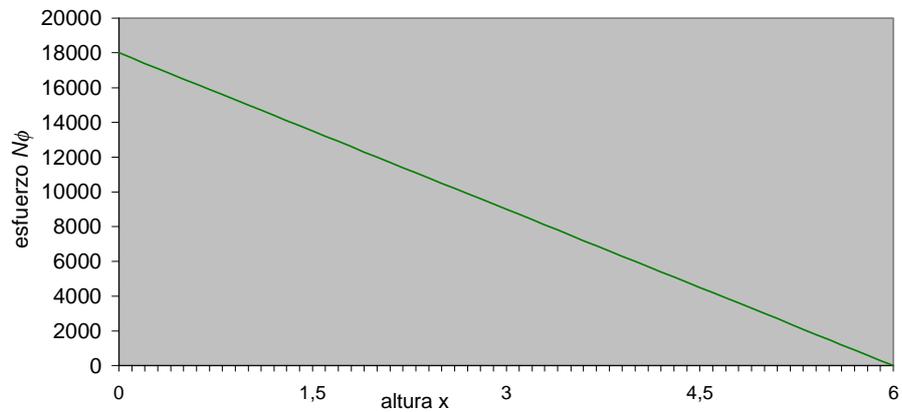


Figura 3. Variación del esfuerzo $N\phi$ en la altura para base apoyada

Caso 2: Borde inferior articulado

$X [m]$	$W [m]$	$N\phi [kg/m]$	$Mx [kgm/m]$	$M\phi [kgm/m]$
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	-1,14E-04	13.701,1	-188,003	-28,200
1	-1,35E-04	16.164,3	-58,467	-8,770
1,5	-1,18E-04	14.178,5	3,069	0,460
2	-1,01E-04	12.079,4	7,564	1,135
2,5	-8,71E-05	10.448,0	2,005	0,301
3	-7,48E-05	8.974,9	-0,231	-0,035
3,5	-6,25E-05	7.498,1	-0,299	-0,045
4	-5,00E-05	6.002,2	-0,067	-0,010
4,5	-3,75E-05	4.500,9	0,013	0,002
5	-2,50E-05	3.000,0	0,012	0,002
5,5	-1,25E-05	1.499,9	0,002	0,00
6	2,73E-10	-0,033	-0,001	0,00

Tabla 2. Valores de desplazamientos y esfuerzos para base articulada

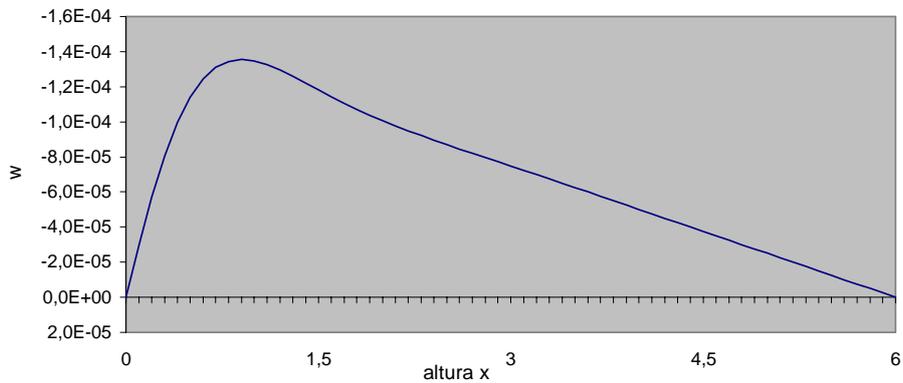


Figura 4. Variación del desplazamiento en la altura

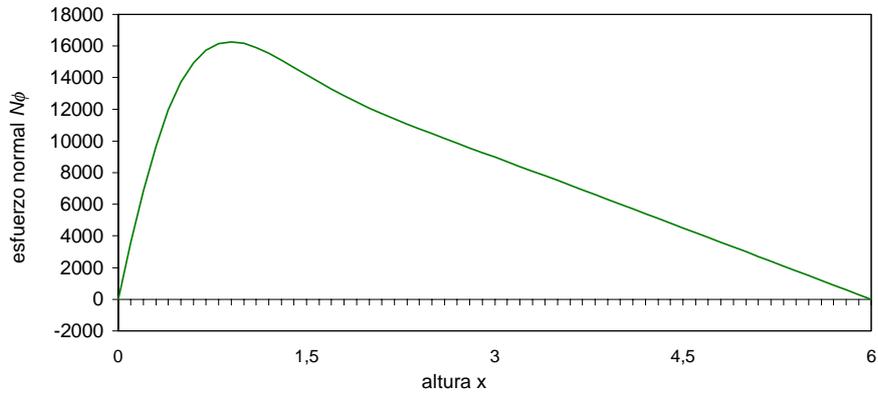


Figura 5. Variación del esfuerzo N_ϕ con la altura

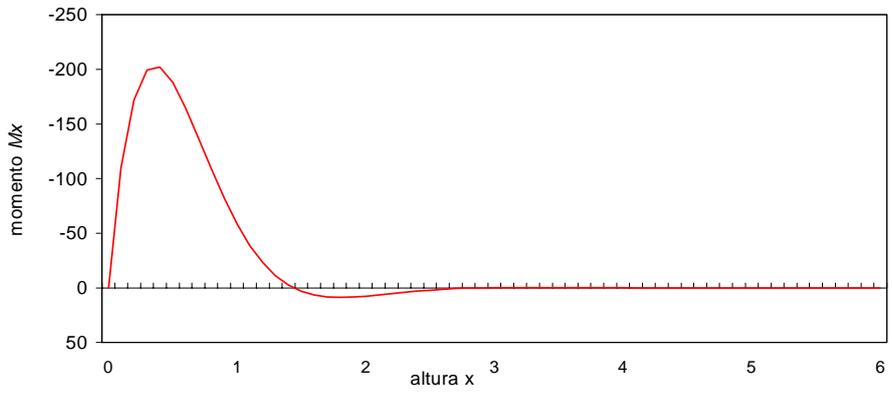


Figura 6. Variación del esfuerzo M_x con la altura

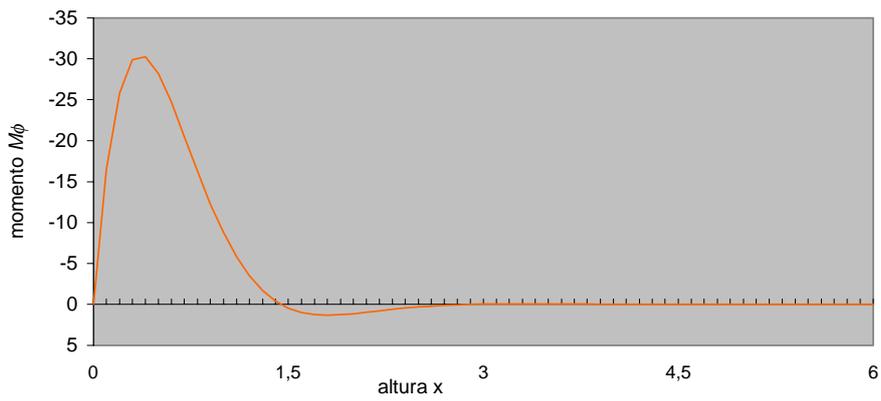


Figura 7. Variación del esfuerzo M_ϕ en la altura

Caso 3: Borde inferior empotrado:

x [m]	w [m]	N_ϕ [kgm/m]	Mx [kgm/m]	$M\phi$ [kgm/m]
0	0,00	0,00	582,457	87,369
0,5	-7,29E-05	8.745,5	-97,434	-14,615
1	-1,22E-04	14.623,2	-96,143	-14,421
1,5	-1,19E-04	14.259,4	-18,885	-2,833
2	-1,02E-04	12.278,8	4,995	0,749
2,5	-8,75E-05	10.500,8	3,688	0,553
3	-7,47E-05	8.968,7	0,582	0,087
3,5	-6,24E-05	7.490,2	-0,236	-0,035
4	-5,00E-05	6.000,5	-0,139	-0,021
4,5	-3,75E-05	4.501,3	-0,017	-0,002
5	-2,50E-05	3.000,3	0,011	0,002
5,5	-1,25E-05	1.500	0,005	0,001
6	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 3. Valores de desplazamientos y esfuerzos para base empotrada

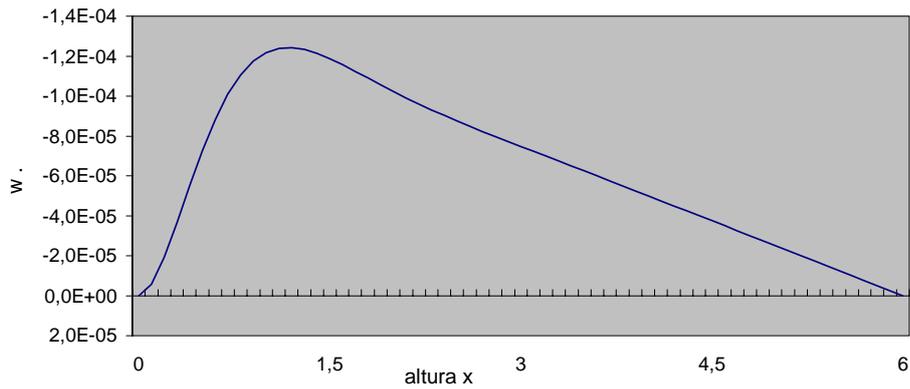


Figura 8. Variación del desplazamiento en la altura

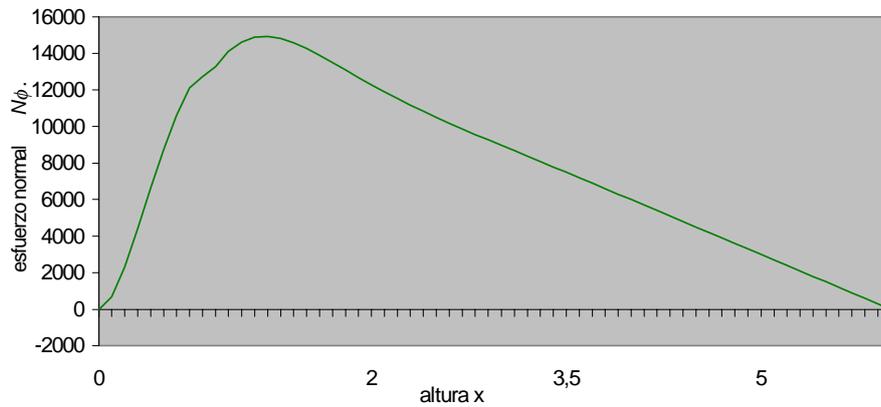


Figura 9. Variación del esfuerzo N_ϕ en la altura

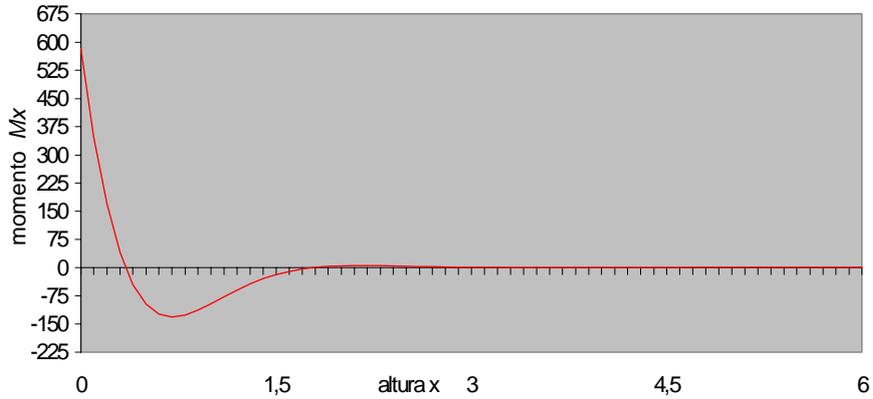


Figura 10. Variación del esfuerzo M_x en la altura

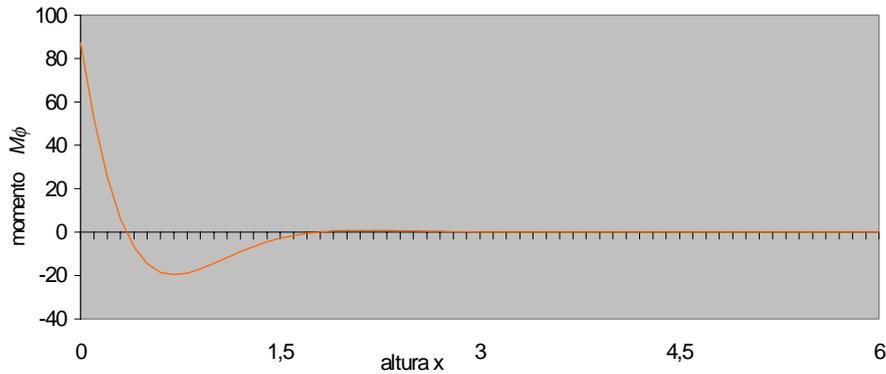


Figura 11. Variación del esfuerzo M_ϕ en la altura

Se incluye en la Tabla 4 un resumen del comportamiento flexional según la consideración de las distintas vinculaciones que se analizaron y la altura a la cual se producen los valores mayores.

<i>esfuerzo</i> <i>vinculación</i>	$N\phi$ [kg/m] (altura)	M_x [kgm/m] (altura)	M_ϕ [kgm/m] (altura)
<i>articulado</i>	16.164,31 (1 metro)	-188 (0,5 metros)	-28,20 (0,5 metros)
<i>empotrado</i>	14.623,18 (1 metro)	+582,45 / -97,45 (0 metro) / (0,5 metros)	+87,37 / -14,61 (0 metro) / (0,5 metros)
<i>simple</i>	18.000 (0 metro)	0,00	0,00

Tabla 4. Comparación de esfuerzos según vinculación en la base

Se puede apreciar que de la comparación de los modelos para los casos de bases articulada y empotrada, el estado flexional del último presenta una mayor complejidad que en el caso articulado. Ello indica un alejamiento del comportamiento en estado membranal que es el que se busca mantener en el diseño de este tipo de estructura.

6 MODELIZACIÓN ESTRUCTURAL DE SILOS

6.1 Resolución a través de técnicas numérico computacionales

Instrumentar la resolución a través de técnicas numérico-computacionales implica definir el modelo global, incluyendo diferentes parámetros, según se muestra en la Figura 12

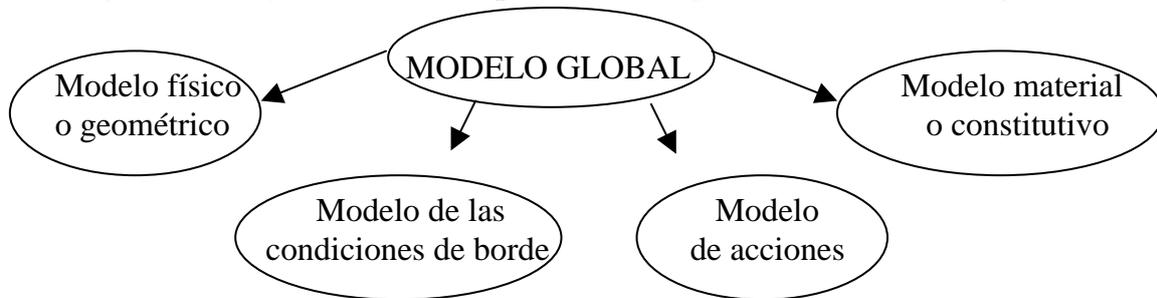


Figura 12. Modelización estructural

A partir de la resolución de acuerdo a la teoría clásica de los ejemplos anteriormente desarrollados, se cuenta con valores estáticos y cinemáticos relacionados con el comportamiento estructural bajo presión hidrostática. Estos mismos ejemplos serán objeto de análisis con el empleo de técnicas numérico-computacionales, a través del uso del software Algor que emplea el método de los elementos finitos para la resolución.

Se adopta para el modelo material, una ley elástica lineal, dado que por la condición de estanqueidad, se considerarán tensiones de tracción admisibles para hormigón en estado no fisurado, de acuerdo a CIRSOC 201.

Es fundamental en la instrumentación del modelo seleccionar el tipo de elemento adecuado que represente el comportamiento membranal, dentro de los disponibles en la biblioteca de elementos del software. Asimismo en relación al mallado a adoptar, distribución y densidad de malla. Dada la existencia de simetría geométrica y de carga (presión hidrostática), se modela un cuarto de silo, y no se considera el peso propio, en concordancia con las hipótesis asumidas por la teoría clásica de láminas.

En las tablas 5, 6 y 7 aparecen, para modelos realizados, indicados los distintos elementos utilizados en la modelización, como también los mallados efectuados para las distintas condiciones de vinculación empleadas.

<i>Modelo</i>	<i>Elemento</i>	<i>Mallado</i>	<i>Total de elementos</i>
<i>a</i>	<i>Shell</i>	<i>uniforme</i>	<i>1776</i>

Tabla 5. Caso de borde simplemente apoyado

<i>Modelo</i>	<i>Elemento</i>	<i>Mallado</i>	<i>Total de elementos</i>
<i>a</i>	<i>Shell</i>	<i>Uniforme</i>	<i>1776</i>
<i>b</i>	<i>Shell</i>	<i>variable:1216 elem. entre 0 y 1 metro de altura</i> <i>en la 608 elem. entre 1 y 2 metros de altura</i> <i>altura 1216 elem. entre 2 y 4 metros de altura</i>	<i>3040</i>
<i>c</i>	<i>Brick</i>	<i>Uniforme</i>	<i>1776</i>
<i>d</i>	<i>Brick</i>	<i>variable:1216 elem. entre 0 y 1 metro de altura</i> <i>en la 608 elem. entre 1 y 2 metros de altura</i> <i>altura 1216 elem. entre 2 y 4 metros de altura</i>	<i>3040</i>
<i>e</i>	<i>Tetrahedral</i>	<i>uniforme</i>	<i>3056</i>

Tabla 6. Caso de borde articulado

<i>Modelo</i>	<i>Mallado</i>	<i>Total de elementos</i>
<i>a</i>	<i>uniforme</i>	<i>1776</i>
<i>b</i>	<i>variable:592 elem. entre 0 y 0.5 metros de altura</i> <i>en la 296 elem. entre 0.5 y 1 metro de altura</i> <i>altura 592 elem. entre 1 y 3 metros de altura</i> <i>444 elem. entre 3 y 6 metros de altura</i>	<i>1924</i>
<i>c</i>	<i>variable:1216 elem.entre 0 y 0.25 metros de altura</i> <i>en la 608 elem.entre 0.25 y 0.5 metros de altura</i> <i>altura 608 elem.entre 0.5 y 1 metro de altura</i> <i>608 elem. entre 1 y 2 metros de altura</i> <i>1216 elem. entre 2 y 6 metros de altura</i>	<i>4256</i>

Tabla 7. Caso de borde empotrado

La condición de vinculación del proyecto particular analizado se corresponde con el apoyo articulado y el modelo que representa más adecuadamente el estado tensional resultante para esta condición de borde es el que se identifica como modelo b en la Tabla 6. La justificación de ello se trata en el punto 6.3.

6.2 Modelos implementados y analizados con el software utilizado. Resultados obtenidos y comparación con resultados teóricos

Para los modelos que se detallaron en el punto anterior se efectuó la implementación computacional y se obtuvieron los resultados cinemáticos y de estado tensional, con presión hidrostática como estado de carga. Se transcriben en las siguientes Tablas, sólo los valores de

los modelos que resultaron con una mayor aproximación a los de la teoría clásica.

En las figuras que siguen a las tablas de resultados, se visualizan los mapas de desplazamientos y tensiones. En ellas el color del fondo en la leyenda de valores, se corresponde con la zona del silo donde se presenta el valor allí indicado .

Caso de silo con base simplemente apoyada:

Modelo (elementos)	Desplazamiento [m]		Diferencia [%]	Max. Ppal [N/m ²]		Diferencia [%]
	teórico	ALGOR		teórico	ALGOR	
a(1776)	$1,50.10^{-4}$	$1,53.10^{-4}$	1,9	$1,5.10^6$	$1,50343.10^6$	0,2

Tabla 8. Comparación de resultados para base de silo simplemente apoyada

Como se puede apreciar en este ejemplo, con un modelo de poca densidad de malla se logra una aproximación casi exacta. Esto se debe a que en este caso el comportamiento del tubo es membranal, no existiendo tensiones por flexión. Sin embargo la utilización de este tipo de apoyo tiene pocas aplicaciones en la práctica ingenieril. La visualización de los resultados, obtenida del software utilizado, para este caso se indica en la Figura 13. En ella aparece un cuarto de tubo con borde inferior simplemente apoyado, elemento tipo *shell*, mallado uniforme, modelo a de Tabla 8

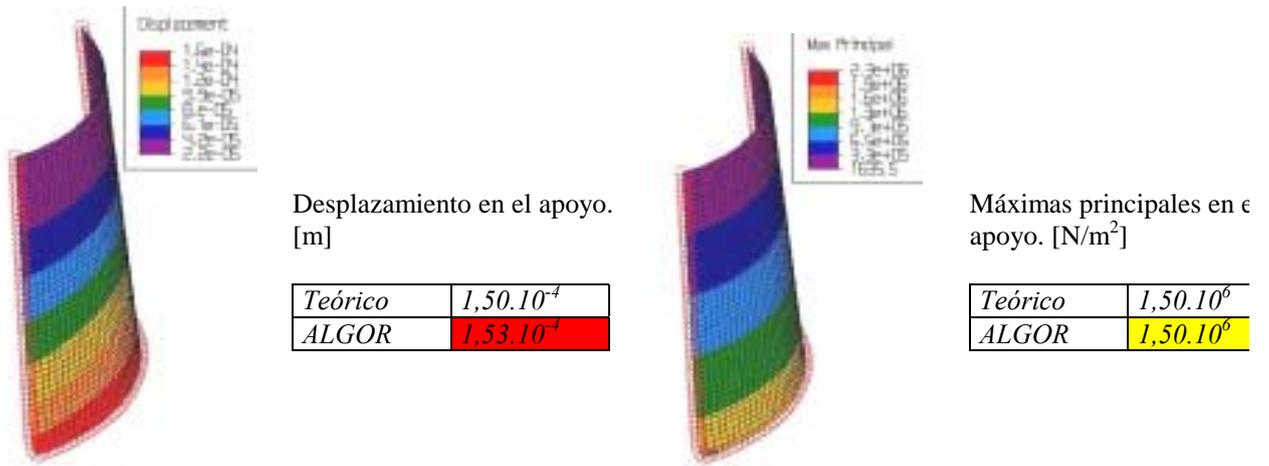


Figura 13. Desplazamientos y tensiones principales del modelo a para silo con base simplemente apoyada

Modelo (elementos)	Desplazamiento [m]		Diferencia [%]
	teórico	ALGOR	
b(3040)	$1,35.10^{-4}$ (a 1 m de altura)	$1,38.10^{-4}$	2,2

Tabla 9. Desplazamientos para silo con base articulada.

En la Tablas 9 y 10 se observan los valores de desplazamientos correspondientes al silo

con base articulada, y en Tabla 10 los resultados de tensiones

Modelo (elementos)	Max. Ppal [N/m ²]		Diferencia [%]	σ_{zz} [N/m ²]		Diferencia [%]
	teórico	ALGOR		teórico	ALGOR	
b(3040)	1,35141.10 ⁶ (a 1 m de altura)	1,3745.10 ⁶	1,6	783.350 (a 0.5 m de altura)	751.025	4,1

Tabla 10. Estado tensional para silo con base articulada

En Figura 14 se visualizan los resultados de un cuarto de tubo con base articulada, modelizado con elemento tipo *shell*, y sometido a presión hidrostática en toda la altura correspondiente al modelo b, de la Tabla 10.

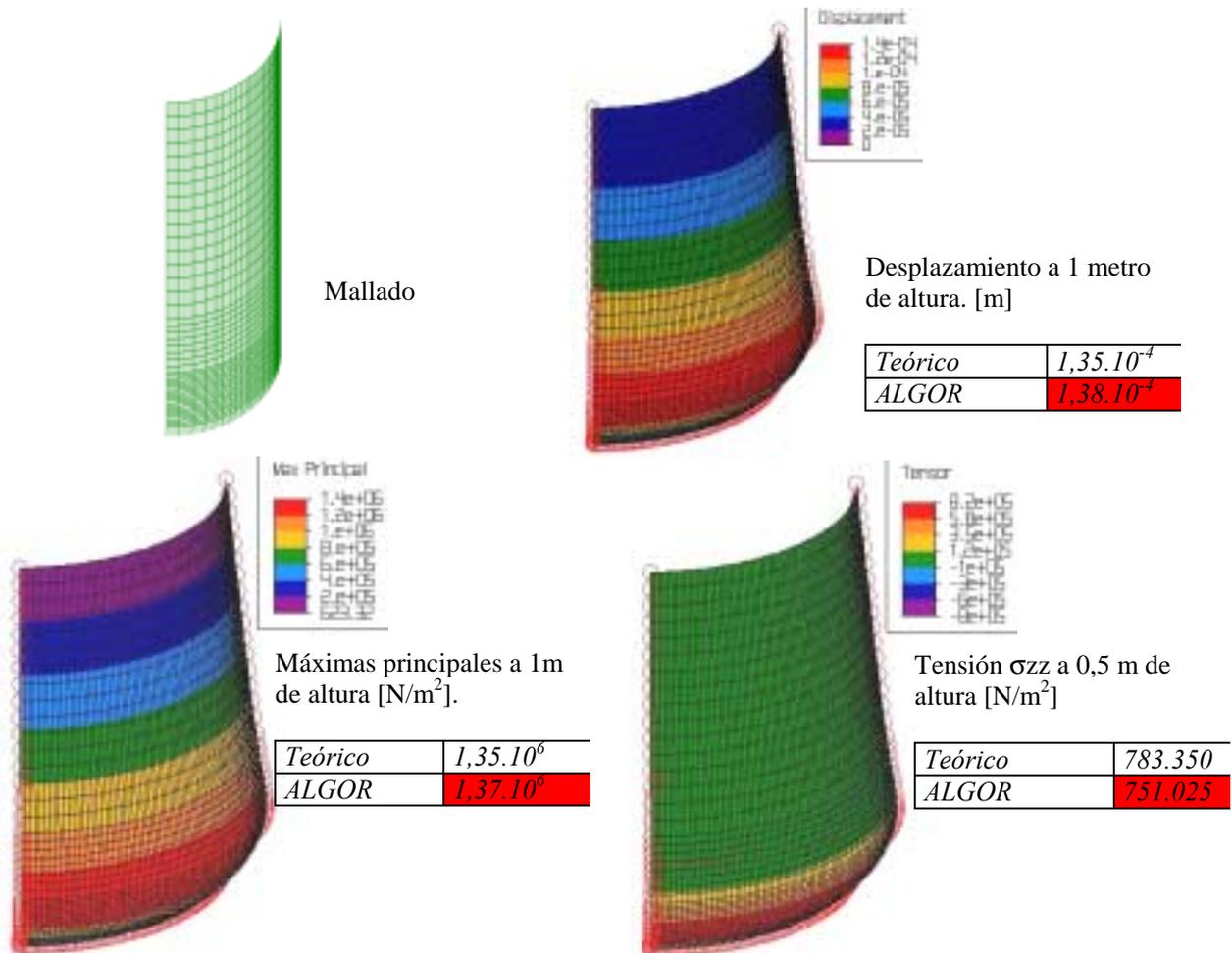


Figura 14. Mallado, desplazamientos, y estado tensional del modelo b para silo con base articulada

Como se puede verificar, según los resultados expuestos en las tablas 9 y 10, a medida que se densifica el mallado, el elemento *shell* es el que mejor se comporta para el análisis del problema planteado. Esto era de esperarse, ya que, este elemento es el indicado para el análisis de láminas delgadas. En consecuencia, este tipo de elemento será utilizado para la modelización y resolución del comportamiento estructural del caso particular del silo de clinker.

En las Tablas 11 y 12 se observan los valores de desplazamientos y de tensiones correspondientes al silo con base empotrada.

Modelo (elementos)	Desplazamiento [m]		Diferencia [%]
	Teórico	ALGOR	
c(4256)	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$1.207 \cdot 10^{-4}$	1,06

Tabla 11. Desplazamientos para silo de base empotrada

Modelo (elementos)	Max. Ppal [N/m ²]		Diferencia [%]	Szz [N/m ²]		Diferencia [%]
	teórico	ALGOR		teórico	ALGOR	
c(4256)	$1,2666 \cdot 10^6$	$1,26276 \cdot 10^6$	0.3	$-2,4268 \cdot 10^6$	$-2,26701 \cdot 10^6$	6,6

Tabla 12. Estado de tensiones para silo de base empotrada

En la Figura 15 se observa un cuarto de tubo, empotrado en la base, modelizado con elementos *shell* en toda la altura sometido a presión hidrostática, correspondiente al modelo c de la Tabla 12.

Al igual que en el caso de silo con base articulada, se aprecia de los resultados de las Tablas 11 y 12 que se logra una aproximación más cercana a los resultados teóricos, a medida que se densifica el mallado. La densidad de mallado para el modelo c, se efectuó para capturar las tensiones en el empotramiento, en el cual existe un fenómeno localizado de concentración de tensiones debidas a flexión, siendo éste predominante con respecto al estado membranar.

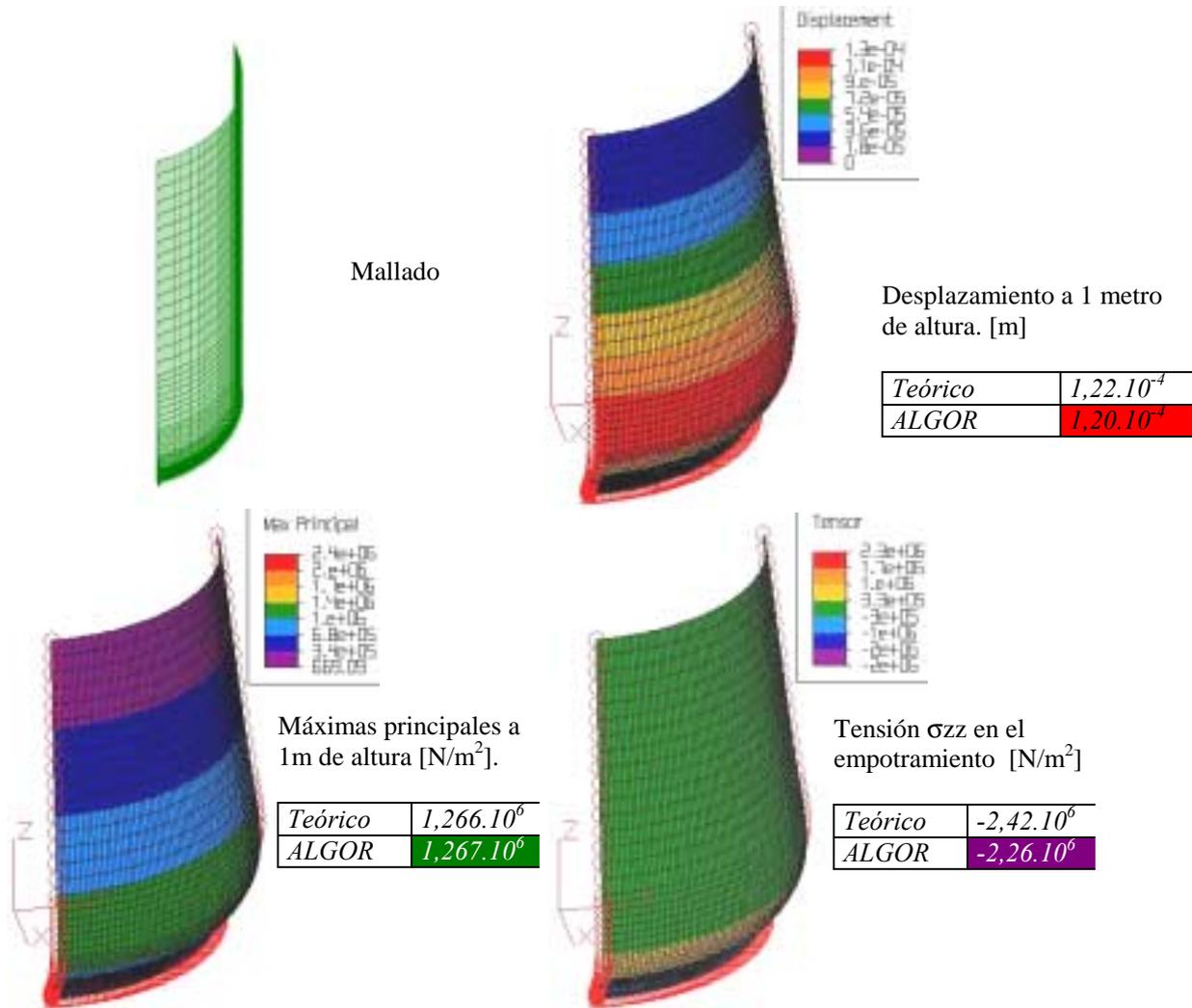


Figura 15. Mallado, desplazamientos, estado tensional del modelo c, para silo con base empotrada

Todas las herramientas implementadas en la resolución de los modelos, se toman como antecedentes para la implementación y resolución mediante el software empleado del proyecto de ingeniería, motivo del presente trabajo.

7 IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS PARA EL CASO PARTICULAR DE SILO DE CLINKER

Este análisis se efectuará para el estado de carga correspondiente a peso propio+clinker, situación que produce los máximos esfuerzos de tracción determinantes para la verificación del espesor y de la condición de estanqueidad.

Por razones operativas, de inspección y acceso de camiones, los silos suelen presentar aberturas en las paredes, de importantes dimensiones, las cuales constituyen sectores localizados con altos valores de esfuerzos y concentración de tensiones. Cuando la longitud de la abertura es superior a cinco veces el espesor de la pared, en cualquier dirección, y la

armadura principal es horizontal es necesario efectuar un estudio y diseño adecuado de aquéllas que resistan los esfuerzos a tracción, teniendo particular cuidado en las esquinas de la abertura. Con la finalidad de mantener las tensiones dentro de valores admisibles, se realizó una estructura tipo marco en el contorno de la abertura, con el correspondiente refuerzo de armadura.

Cálculo y verificación del espesor de la pared del silo:

I.- Según el Código ACI 313 del espesor de la pared de un silo de hormigón armado, en ningún caso puede ser inferior a 15 cm.

II.- Según Ravenet⁶, el espesor necesario a adoptar para el silo se calculará mediante las siguientes expresiones:

Cálculo en función del esfuerzo de tracción:

Mediante la utilización de la siguiente expresión para el cálculo del espesor mínimo de la pared del silo se tiene en cuenta la condición de estanqueidad, que es un requisito que se debe cumplir en el diseño de las paredes del mismo.

$$h_{nec} = \frac{mr.Es + fs - n.fct}{100.fs.fct} T \quad (6)$$

siendo: h_{nec} = espesor necesario de la pared en cm, mr = Módulo de retracción del hormigón e igual a 0,0003, Es = Módulo elástico del acero en kg/cm^2 , fs = Tensión admisible del acero a tracción en kg/cm^2 e igual al valor correspondiente al límite elástico dividido por 2,5:

$$fs = \frac{4200.kg/cm^2}{2,5} = 1680kg/cm^2 \quad (7)$$

n = relación de módulos elásticos del acero y del hormigón siendo $n = 8$, fct = Tensión admisible de tracción del H° = $fct = 0,1x f'c = 30 kg/cm^2$, $T = N\phi$ = Esfuerzo de tracción en el silo. Las tensiones alcanzadas durante el vaciado del silo, permiten obtener el esfuerzo de tracción actuante con el que se obtendrá el espesor necesario.

III.- Cálculo del espesor de la pared en función del diámetro del silo

$$h = 10 + 2,5 \left(\frac{D - 3}{3} \right) = 37cm \quad (8)$$

siendo: h = espesor de la pared en cm, D = diámetro del silo en metros.

IV.- Cálculo del espesor de la pared en función de la altura del silo

$$h = 10 + 2,5 \left(\frac{H - 6}{12} \right) = 16cm \quad (9)$$

siendo: H = altura del silo

Como se puede apreciar el espesor adoptado verifica estas dos últimas condiciones.

Con un espesor de 50 cm para el estado de carga silo lleno vaciándose se obtiene el siguiente estado tensional

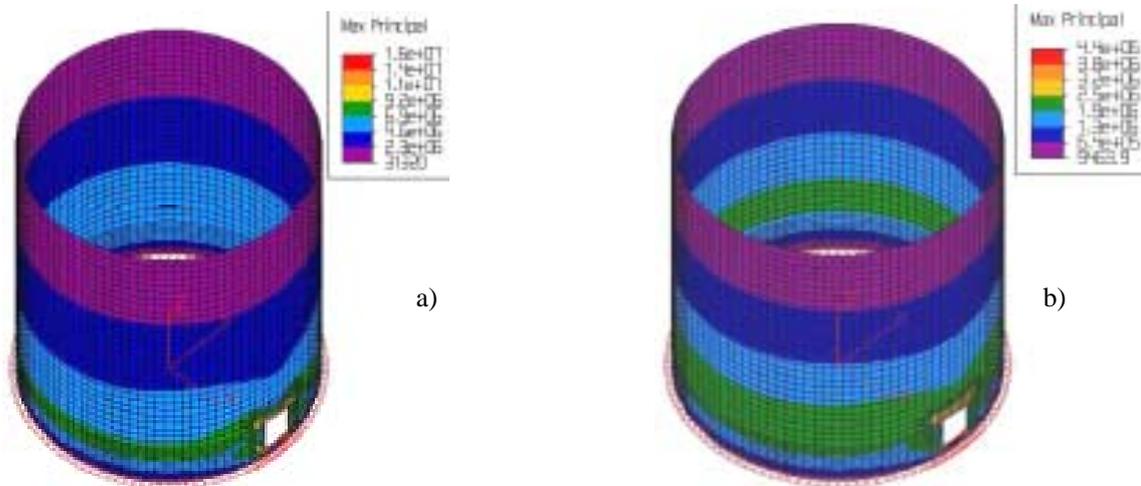


Figura 16. Estado Tensional para silo con pared: a) de 50 cm y b) 150 cm de espesor

El valor de tensión máxima obtenido, ignorando las concentraciones de tensiones ocasionadas por la abertura, se producen entre los 2 m y 4.5 m de altura. El valor es de $7.4 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$, que equivale a 74 kg/cm^2 por lo que se concluye que en esta zona el silo se encuentra totalmente fisurado al sobrepasarse la tensión admisible de tracción de 30 kg/cm^2 . Esta tensión es producida por un esfuerzo de tracción de $N\varphi = 370.000 \text{ kg/m}$.

Para ese valor de esfuerzo y de la ecuación (6), se obtiene el espesor necesario para que no se produzca fisuración en el hormigón, resultando $h_{nec.} \approx 150 \text{ cm}$. El correspondiente estado tensional aparece en la Figura 16-b).

Las tensiones alcanzan un máximo de 25 kg/cm^2 . Sucede que en la práctica un espesor de esta magnitud no es aconsejable por razones técnicas y económicas.

En el diseño definitivo del silo de clinker analizado se adoptó un espesor de 50 cm, que cumple las condiciones I y III. Con respecto al requisito establecido según II y procediendo al análisis de los resultados obtenidos de los esfuerzos y tensiones principales de tracción surgen que se debió considerar la realización de un postesado diametral, con el fin de tomar con la armadura activa que resulte del cálculo, un importante porcentaje de esfuerzo de tracción debido a las presiones del material ensilado. La armadura de postesado está constituida por cordones de acero envainados dispuestos en franjas variables en la altura del silo. Dicha armadura activa está complementada por una armadura pasiva que permite absorber el esfuerzo correspondiente a $M\varphi$, momento perturbador en la base, y cumplir las condiciones de cuantía mínima establecida por el Reglamento CIRSOC.

Para modelizar el efecto del postesado y teniendo como objetivo disponer las armaduras uniformes en franjas horizontales, se divide a la altura del silo en cuatro fajas desde la fundación hasta el extremo superior. Para materializar el efecto del postesado se introduce una presión uniforme por franja, equivalentes a las adoptadas para la condición de silo lleno y vacío, siendo éste estado el más desfavorable.

El análisis de los resultados de tensiones máximas y mínimas principales para el caso en análisis permite inferir que los esfuerzos de postesado para el estado de carga analizado

permiten mantener al silo comprimido, verificando las tensiones admisibles, por lo cual se verifica la estanqueidad.

Como se puede observar en la Figura 17-a), el máximo valor de tensión provocado por el postesado es de 100 kg/cm^2 . Dicho valor se encuentra muy alejado de la tensión admisible del hormigón utilizado en la obra en cuestión.

Comparando las tensiones correspondientes al estado de carga de peso propio+clinker+cubierta+cinta, con el obtenido para ese estado más la acción de tesado, se obtiene una disminución de tensiones, cuyos resultados se muestran en la Figura 17-b) .

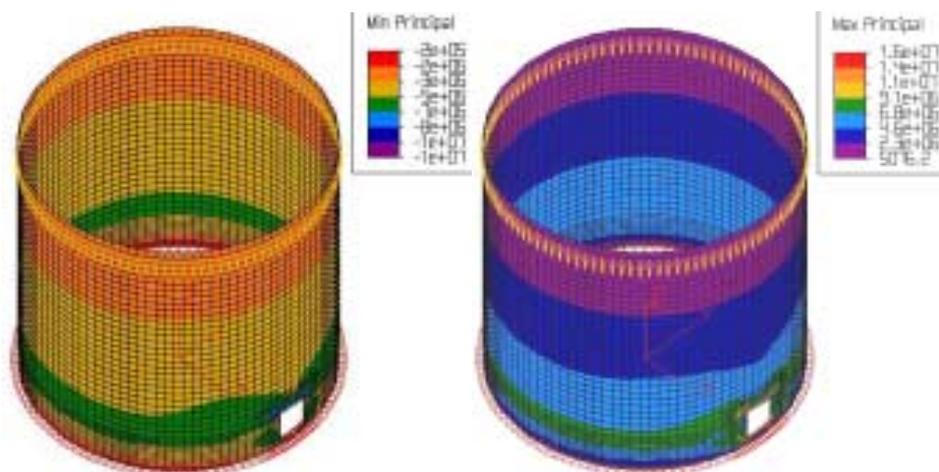


Figura 17. Tensiones a) para postesado, b) para peso propio+clinker+cubierta+cinta +postesado

8 CONSIDERACIONES FINALES

El tratamiento de este tipo de tipologías estructurales para establecer el comportamiento estructural de silos se aborda en la bibliografía a través de la resolución de las ecuaciones establecidas en la teoría clásica de láminas cilíndricas. La instrumentación del modelo numérico- computacional permite abordar este problema con una metodología en la cual la generación del modelo global constituye una etapa de análisis cuidadoso para la adopción de los parámetros mecánicos y geométricos que se introducen en el modelo a resolver.

Los softwares actuales, muy potentes, permiten instrumentar modelos numéricos-computacionales, para resolver estática y cinemáticamente a los mismos y reproducir en adecuadas salidas gráficas por pantalla los mapeos de deformaciones y tensiones.

Esa implementación con estados ideales de cargas, apoyos, tipo de materiales, etc., permite la convalidación de resultados con respecto a los obtenidos con la teoría clásica. Esto permite generar criterios de utilización adecuada del software en la resolución de este tipo de tipologías estructurales, de interés para el ingeniero estructuralista.

La resolución del modelo analizado mediante el software permite obtener salidas gráficas de deformaciones y estados tensionales, y a partir del análisis de los mismos, verificar condiciones de estanqueidad y la disposición óptima de la armadura, en cuanto a cantidad y distribución. La visualización, tal como era previsible, del fenómeno tensional con importantes concentraciones alrededor de la discontinuidad geométrica, permite su

cuantificación y la evaluación de los valores establece la necesidad de efectuar un marco de refuerzo de sección de hormigón y su correspondiente armadura.

A partir de la valorización del modelo resuelto, para la elaboración del proyecto definitivo se adoptan decisiones con criterio ingenieril, requiere una formulación adecuada basada fundamentalmente en: *conocimiento teórico del tema; valorización de antecedentes de obras existentes similares; actualización permanente; intuición del comportamiento físico; otorgarle el status adecuado al análisis matemático; conocimientos de tecnología y procesos constructivos de obra; patologías estructurales y el perjuicio económico que se origina debido a los costos por reparación y/o la afectación de procesos de producción de plantas cementeras como en este caso particular analizado.* En este proceso se une la teoría con la práctica, y este es el marco en el cual el tipo de análisis desarrollado en este trabajo, permite contar con resultados y generar los antecedentes y base para las decisiones.

9 REFERENCIAS

- [1] ACI 313R-91. Commentary on Standard Practice for Design and Construcción of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials, Editorial ACI. (1991).
- [2] CIRSOC 102. “Acción del viento sobre las estructuras”, Editorial INTI, Buenos Aires. (1984).
- [3] Inpres-CIRSOC 103, Parte II. Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes, Editado por INTI. (2000).
- [4] Timoshenko-Woinowsky-Krieger, “Teoría de placas y láminas”, Mc Graw-Hill. (1959).
- [5] Reimbert, Marcel, “Silos”, Americalee. (1983).
- [6] Ravenet, Juan, “Silos, teoría, investigación y construcción”, Técnicos y Asociados, Madrid. (1977).

Software

Algor Software Package, y sus correspondientes manuales.