

CÁLCULO DE SILOS MODULARES RECTANGULARES PARA ALMACENAMIENTO DE MATERIALES A GRANEL

Esteban Rodríguez^a, José Risso^{b,a} y Alberto Cardona^b

*^aFacultad Regional Santa Fe – Universidad Tecnológica Nacional
Lavaise 610, (3000) Santa Fe, Argentina, esteban_hto_1@yahoo.com.ar*

*^bCentro Internacional de Métodos Computacionales en Ingeniería, CIMEC-INTEC /
UNL-CONICET, Güemes 3450, 3000 Santa Fe, Argentina*

Palabras Claves: silos, materiales sólidos a granel, no linealidades geométricas, diseño asistido.

Resumen: Este trabajo describe el diseño de un silo modular con celdas de sección rectangular, destinado a almacenar materiales a granel. Este tipo de silos es utilizado generalmente para almacenar materias primas en plantas de producción de alimentos animales, porque su diseño permite reducir el espacio necesario en planta e instalar sistemas de dosificación y pesaje compactos, disminuyendo la complejidad del sistema de interconexión entre equipos.

Para lograr un diseño modular se recurrió a la utilización de uniones abulonadas entre las chapas planas y los perfiles rigidizadores de chapa plegada que constituyen las paredes de cada celda.

La determinación de las cargas actuantes se realizó a partir de normas internacionales y de fórmulas empíricas derivadas de experimentos con modelos a escala.

En el proceso de cálculo se consideró especialmente el comportamiento no lineal de las chapas utilizadas en las paredes del silo, solicitadas a compresión en su plano y sometidas a presiones normales al mismo.

El modelado de la estructura se realizó utilizando elementos de placa y vigas, considerando no linealidades geométricas y constitutivas, utilizando el módulo Mecano del software Samcef.

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 cuadrado multicelular destinado al almacenamiento de materiales a granel para la fabricación de alimentos balanceados.

2 HIPÓTESIS Y DATOS DEL PROYECTO

- Celdas de sección rectangular, variando espesores y refuerzos según la altura.
- No deben aparecer deformaciones visibles durante la carga o la descarga.
- Diseño modular, con elementos de chapa abulonados.
- Patas: Pórticos (un pórtico por cada módulo de dos celdas) de 8 m de altura.
- Alturas de celdas (desde la parte superior hasta el nivel de tolva) 4m a 16 m.
- Construcción en chapa de acero al carbono pintada o galvanizada.
- Productos a almacenar:
 - Afrechillo / Salvado ($Pe \leq 500 \text{ kg/m}^3$)
 - Harinas ($Pe \leq 700 \text{ kg/m}^3$)
 - Granos ($Pe \leq 800 \text{ kg/m}^3$)
 - Conchilla / CO_3Ca / Sales ($Pe \leq 1500 \text{ kg/m}^3$)
- No se deben considerar cargas de viento.
- Debe considerarse carga sísmica correspondiente a zona I del reglamento CIRSOC.
- No se debe considerar cargas adicionales sobre las patas debajo de la línea de tolvas.
- Debe considerarse una carga adicional de 4000 N/m (transporte pequeño con su pasarela de atención), actuando sobre los parantes del cuerpo del silo.
- Deben considerarse formas auxiliares de vaciado: Soplado / Vibrado / Posibilidad de golpes con martillo.

3 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO ADOPTADO

A partir de los datos especificados anteriormente se procedió a la determinación de la configuración estructural de las tolvas, descrita en las figuras 1 y 2.

Los tamaños de módulo se definieron en base a la disponibilidad de chapa comercial, utilizando medidas de chapas planas que se pueden conseguir en el mercado de modo que no fuera necesario hacer en ellas cortes ni soldaduras.

El material utilizado corresponde a la clasificación IRAM F22.

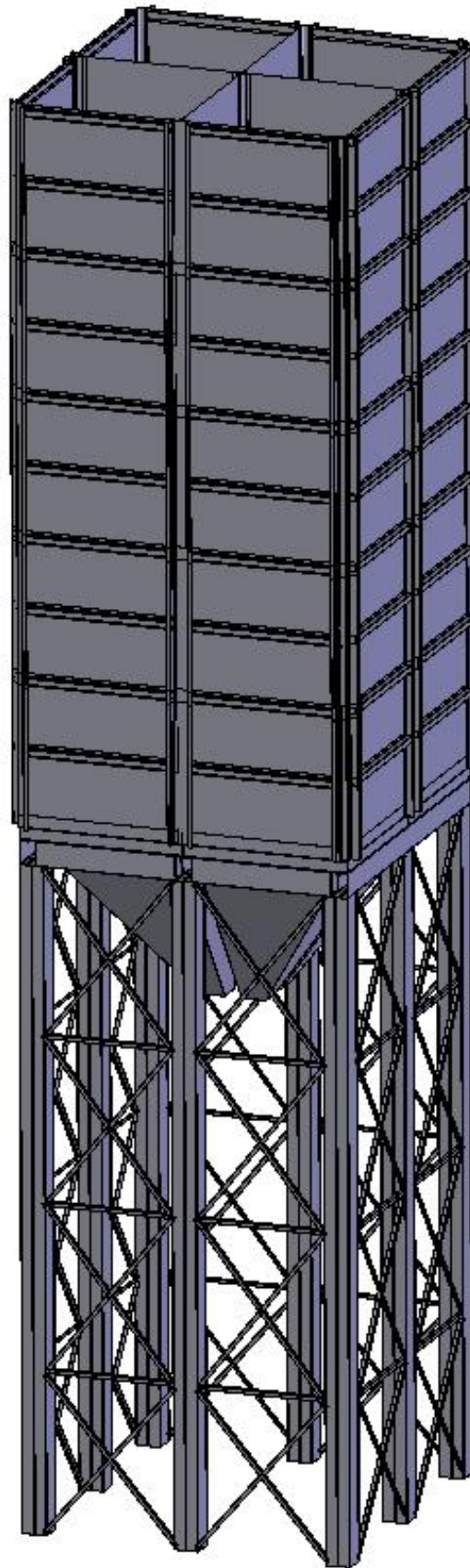


Fig.1: Esquema general de la estructura

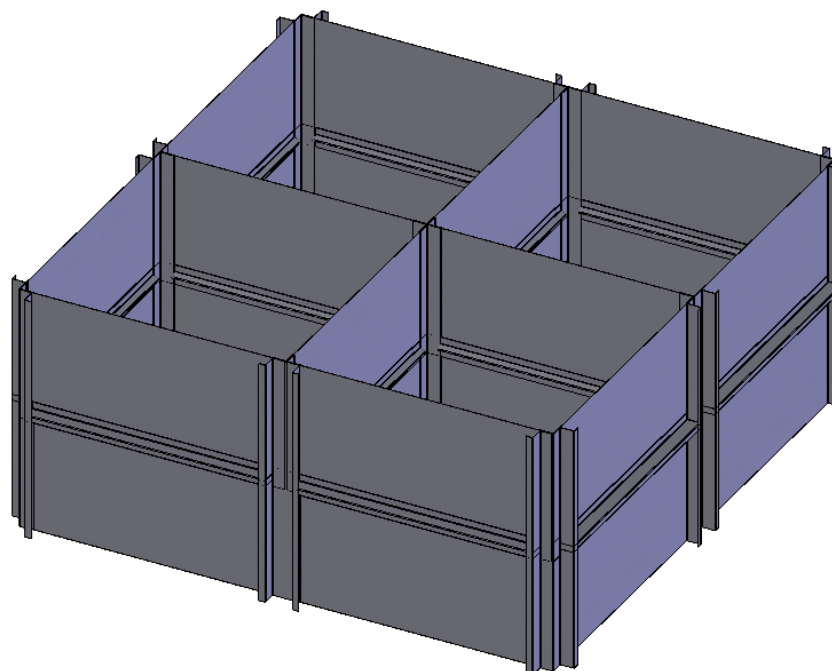


Fig.2: Esquema constructivo de las celdas

En la figura 2 se puede observar que se compartieron las paredes interiores de los módulos para una menor utilización de material y se emplearon perfiles de chapa plegada con una geometría lo más sencilla posible pero buscando obtener de la misma el mejor aprovechamiento de inercia en la sección.

Los travesaños horizontales exteriores tienen un formato que responde a lo determinado en la reunión inicial de proyecto (donde se estableció que no había requerimientos sanitarios para el exterior), para obtener una mayor inercia y evitar que haya deformaciones visibles. Para los travesaños horizontales interiores se busca evitar la acumulación de material sobre sus caras.

Todas las características de las secciones fueron cargadas en el programa de cálculo donde además se agregaron las tolvas que convergen al punto medio de los cuatro módulos como se observa en la figura 1.

En los modelos analizados la estructura soporte se modeló con columnas y vigas superiores en chapa soldada, travesaños y diagonales de perfil laminado, con una altura de ocho metros.

4 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS

Para analizar el comportamiento estructural de las celdas se creó un modelo global construido mediante el software SAMCEF FIELD V5.2 (Samtech, 2007), con su módulo de análisis no lineal MECANO. Este modelo puede considerar tanto las no linealidades presentes en el comportamiento del material (fluencia) como las no linealidades geométricas que existen durante el proceso de carga (fundamentalmente en las chapas del silo).

Se utilizaron elementos de lámina (tamaño nominal 100 mm) para representar las chapas de las celdas y tolva, y elementos de viga para representar los parantes, travesaños y la estructura de soporte (patas) de las celdas. Teniendo en cuenta que la mayor parte de las vigas utilizadas no corresponden a perfiles normalizados, se calcularon sus características geométricas (sección transversal, momentos de inercia, etc.) utilizando software CAD, y se

cargaron dichas propiedades dentro del programa de análisis.

Se utilizó un modelo material elastoplástico con endurecimiento isotrópico, de acuerdo al criterio de fluencia de Von Mises, cuyas propiedades corresponden a una chapa IRAM F22. Esta especificación es aplicable a silos construidos en chapa comercial negra o galvanizada.

Las cargas fueron definidas de acuerdo a lo descrito en la sección 5.

El mismo modelo utilizado para el análisis estructural global fue utilizado para determinar la frecuencia natural de vibración (utilizando el módulo DYNAM del programa SAMCEF FIELD) (Samtech, 2007) necesaria para el cálculo de las cargas sísmicas. En este caso, la masa del material almacenado se representó mediante elementos de masa concentrada ubicados en las intersecciones de parantes y travesaños del cuerpo.

Por último, se utilizó un modelo local del techo y sus refuerzos, construido utilizando SAMCEF FIELD, para evaluar el comportamiento del mismo frente a cargas producidas por tránsito de personas sobre el mismo.

Debido a que el diseño de las patas (altura, configuración, arriostramientos) se adecuará a los requerimientos de cada proyecto donde se utilicen estos silos (se calcularán caso por caso), el análisis se realizó con una configuración de patas genérica. Por este motivo, sus tensiones y deformaciones no son relevantes en este estudio, y no se incluyen dentro de los resultados graficados (solo se grafican como estructura alámbrica los ejes de los perfiles que las componen).

5 DETERMINACIÓN DE CARGAS

5.1 Estados de carga y combinaciones de carga consideradas

Los estados de carga considerados para el cálculo de la estructura son los siguientes:

1. Peso propio de la estructura (incluyendo transportadores de carga con sus pasarelas)
2. Carga completa (con el material de mayor densidad) en reposo en todas las celdas
3. Descarga en una celda con carga completa en las demás
4. Carga sísmica con todas las celdas llenas de material

Se analizaron dos combinaciones de carga, referenciadas como “carga” y “descarga”, que incluyen los estados 1+2+4, y 1+3+4 respectivamente.

Adicionalmente, se analizó la integridad estructural durante la descarga de una celda estando las demás vacías, y durante eventos de rotura de bóvedas que pudieran producirse durante el almacenamiento de harinas. Una descripción más detallada de estos últimos eventos se incluye en la sección 5.5.

5.2 Determinación de las cargas por peso propio

Las cargas derivadas del peso propio del material de la estructura se modelaron definiendo una aceleración vertical de $9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$ sobre el modelo.

Las cargas producidas por el peso del transportador de llenado y sus pasarelas de atención se modelaron aplicando fuerzas de 4000 N en los nodos superiores de los parantes. Por lo tanto, durante el proyecto de las instalaciones donde se utilicen estos silos deberán diseñarse vigas de apoyo de los transportadores, que transfieran la carga de los mismos a estos parantes (no pueden transferirse estas cargas directamente sobre el techo, los travesaños o las chapas laterales).

5.3 Determinación de las cargas para el silo lleno

Al presente, no existen referencias apropiadas para cálculo de cargas debidas a almacenamiento de material a granel dentro de los reglamentos para construcciones (CIRSOC) o el cuerpo normativo argentino (IRAM).

Luego de analizar los diferentes modelos citados en la bibliografía (Ravenet, 1983a; b; c; Reimbert, 1977) se seleccionó para la determinación de las cargas la norma [DIN 1055 \(1987\)](#), que es aplicable a productos granulares almacenados en silos verticales y prismáticos comprendidos dentro de los siguientes límites:

Relación $H/D > 0,80$

Relación $p_{vc}/\gamma \leq 25$

Siendo:

$H =$ Altura del silo [m] $p_{vc} =$ Presión vertical de llenado [N/m²]

$D =$ Diámetro equivalente [m] $\gamma =$ Peso específico [N/m³]

El material que se utilizó como base para el cálculo es la conchilla ya que es el de mayor peso específico y por ende el que solicitará en mayor medida a la estructura.

Sus datos son:

Peso específico (γ) 15000 [N/m³]

Coefficiente de rozamiento del material con la pared p_w/p_h (μ) 0,55

Relación entre presiones horizontales y verticales p_h/p_v (λ) 0,65

Con estos datos se procedió al cálculo de las presiones tanto en el silo como en la tolva cuando el depósito se encuentra lleno de material mediante las siguientes ecuaciones que establece la norma (basadas en la teoría de Janssen):

Presión Vertical

$$p_{vc} = \frac{\gamma r_h}{\mu \lambda} \Phi(z) \quad (1)$$

Presión Horizontal

$$p_{hc} = \lambda p_{vc} \quad (2)$$

Fuerza de Rozamiento

$$p_{wc} = \mu \lambda p_{vc} \quad (3)$$

Siendo:

$$\Phi(z) = 1 - e^{-\frac{z}{z_0}} \quad (4)$$

$$z_0 = \frac{r_h}{\mu \lambda} \quad (5)$$

$$r_h = \frac{A}{U} : \text{radio hidráulico} = \frac{\text{Area de cada celda}}{\text{Perímetro de cada celda}} \quad (6)$$

Los valores máximos asintóticos de las presiones resultan:

$$p_{vc} = 20559 \text{ [Pa]}, p_{hc} = 13363 \text{ [Pa]}, p_{wc} = 7350 \text{ [Pa]}$$

La distribución de presiones resulta exponencial, como se muestra en la figura 3, donde puede apreciarse que, para estas dimensiones de celda, luego de 6 a 8 metros de columna de material las presiones ya no varían de forma apreciable. En la tabla 1 puede observarse un

resumen del valor de las presiones para diferentes alturas de las celdas analizadas.

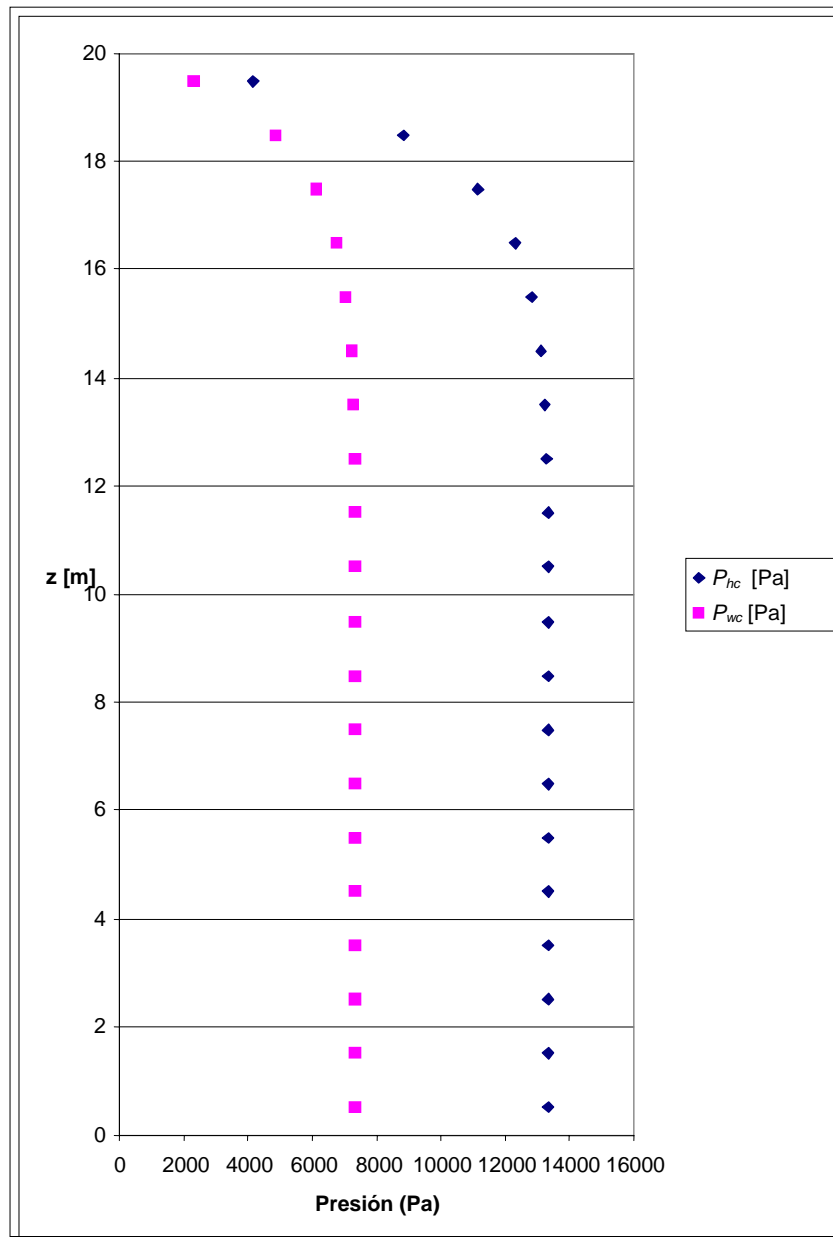


Fig.3: Distribución de presiones horizontales y carga vertical en las paredes

5.4 Determinación de las cargas durante la descarga del silo

La determinación de este estado de cargas se realizó mediante la misma norma que se utilizó para la determinación de las cargas para el silo lleno (norma [DIN 1055, 1987](#)).

Las presiones de vaciado, se obtienen por mayoración de las cargas de llenado, aplicando coeficientes de sobrepresión determinados de acuerdo a la norma referenciada:

Presión horizontal de vaciado

$$p_{hd} = p_{hc} e_h \quad (7)$$

Fuerza de rozamiento de vaciado

$$p_{vd} = 1,11 p_{vc} \quad (8)$$

Presión vertical de vaciado

$$p_{vd} < p_{vc} \quad (9)$$

Donde e_h es un coeficiente de sobrepresión, que se obtiene de tablas. En este caso ($H/D > 5$) se adoptó $e_h = 1,7$.

h [m]	Phi(z)	Pv carga conchilla [Pa]	Ph carga conchilla [Pa]	Ph descarga conchilla [Pa]	Pw carga conchilla [Pa]	Pw descarga conchilla [Pa]
0	0	0	0	0	0	0
1	0.5108	10502	6826	13243	3754	4130
2	0.7607	15639	10166	19721	5591	6150
3	0.8829	18153	11799	22890	6490	7139
4	0.9427	19382	12598	24441	6929	7622
5	0.9720	19983	12989	25199	7144	7858
6	0.9863	20278	13180	25570	7249	7974
7	0.9933	20422	13274	25752	7301	8031
8	0.9967	20492	13320	25840	7326	8058
9	0.9984	20526	13342	25884	7338	8072
10	0.9992	20543	13353	25905	7344	8079
11	0.9996	20552	13359	25916	7347	8082
12	0.9998	20556	13361	25921	7349	8083
13	0.9999	20558	13362	25923	7349	8084
14	1.0000	20559	13363	25924	7350	8085
15	1.0000	20559	13363	25925	7350	8085
16	1.0000	20559	13363	25925	7350	8085

Tabla 1: Cargas en el cuerpo producidas por el material almacenado

En los silos con flujo de conducto, y para prevenir eventuales irregularidades en el vaciado, se debe considerar una presión horizontal adicional (p_{ha}) sobre las paredes, definida por el parámetro empírico β .

$$p_{ha} = p_{hd} \beta \quad (10)$$

$$\beta = \beta_h \beta_a \beta_r \beta_G \quad (11)$$

donde

β_h = Coeficiente de esbeltez del silo = 1,6 ($H/D > 4$)

β_a = Coeficiente de excentricidad del silo = 3 ($a/r > 1/3$)

β_r = Coeficiente de rigidez del silo = 0,05 ($a/t > 100$)

β_G = Coeficiente del material = 1 (el más desfavorable)

Por lo tanto, para el caso considerado resulta $\beta = 0,24$.

Teniendo en cuenta estos valores de e_h y β , el coeficiente total de sobrepresión (mayoración de la presión determinada mediante la fórmula de Janssen) resulta 1,94. Este valor es consistente con las observaciones de [Ravenet \(1983a\)](#), que sugiere un valor de 1,95 para este tipo de silos.

En la tabla 1 puede observarse un resumen del valor de las presiones para diferentes alturas de las celdas analizadas.

Para silos con flujo másico, se debe considerar una presión adicional, actuando en la zona de transición del cuerpo con la tolva. En esta zona, de longitud 0.3 D el valor de la sobrepresión es:

$$p_s = \gamma H \quad (12)$$

Para un cuerpo de 16 m de altura $p_s=24000$ [Pa], y como el valor 0,3 D resulta igual a 0.765 [m], por lo que se adoptó el valor de 1 [m] para la zona de sobrepresión, y se cargó con esta presión adicional p_s al primer nivel del silo.

Para el cálculo de las cargas sobre la tolva, y con el propósito de tomar hipótesis más conservativas que las de la norma DIN 1055 (1987), se utilizaron fórmulas desarrolladas por investigadores de la Universidad de San Pablo para la norma brasilera para cálculo de silos verticales esbeltos (Palma, 2005). Llamando p_{h0} y p_{v0} a las presiones horizontal y vertical durante la carga en el nivel de unión entre cuerpo y tolva, θ al ángulo de sus paredes respecto de la horizontal, l a la longitud de la generatriz de la tolva, y x a la distancia a su punto inferior (medida en la dirección de la generatriz), se utilizan las siguientes formulas para el cálculo de presiones normales a la pared:

Presión uniforme

$$p_{nU} = \frac{3r_h \gamma \lambda \sin^2 \theta}{\sqrt{\mu}} \quad (13)$$

(para este caso 14790 [Pa])

Presión variable

$$p_{nV} = p_{v0} \left(1.2 \cos^2 \theta + 1.5 \sin^2 \theta \frac{x}{l} \right) \quad (14)$$

(para este caso 6294 a 29895 [Pa])

Para silos con flujo másico se debe considerar una presión adicional actuando en la zona superior de la tolva. En esta zona, de longitud 0.2 D, se suma una presión:

Presión adicional normal a la pared:

$$p_{nA} = 2p_{h0} \quad (15)$$

(para este caso 27270 [Pa])

En el caso considerado, con un ángulo de tolva de 60 grados, la presión máxima que resulta de sumar estas tres componentes es del orden de 72000 [Pa], que es un valor conservativo si se lo compara con otras fórmulas para determinación de presiones en la tolva (por ejemplo, Schulze (2007) predice un valor del orden de 38000 [Pa] para este mismo caso).

Altura en la tolva (%)	P_n [Pa]	P_t [Pa]	P_v [Pa]	P_h [Pa]
100%	71958	39577	41062	71121
75%	38785	21332	22132	38334
50%	32885	18087	18765	32502
25%	26984	14841	15398	26670
0%	21084	11596	12031	20839

Tabla 2: Cargas en la tolva producidas por el material almacenado

Las cargas tangenciales a la pared se obtienen multiplicando la presión normal por el coeficiente de rozamiento:

Fuerza tangencial

$$p_{wc} = \mu \lambda p_{vc} \quad (16)$$

Una vez determinadas las cargas normales y tangenciales en cada punto de la tolva, se descompusieron en sus componentes vertical y horizontal para aplicarlas en el modelo de elementos finitos. Teniendo en cuenta que la sobrepresión p_s se aplica solo sobre la región superior del nivel 4 de la tolva, se aplicó parte de la misma como una carga lineal en la unión entre tolva y cuerpo, y el resto como una carga uniformemente distribuida sobre las chapas del nivel superior de la tolva (nivel 4), como se indica en la tabla 3.

Nivel Tolva	Pv	Ph
Borde sup.	1534 [N/m]	2657 [N/m]
Nivel 4	25761 [Pa]	44619 [Pa]
Nivel 3	20449 [Pa]	35418 [Pa]
Nivel 2	17082 [Pa]	29586 [Pa]
Nivel 1	13715 [Pa]	23755 [Pa]

Tabla 3: Cargas aplicadas sobre la tolva

5.5 Determinación de las cargas por rotura de bóveda

La norma **DIN 1055 (1987)** es aplicable a productos granulares o pulverulentos de flujo libre (no cohesivos). Bajo esta clasificación pueden englobarse una parte importante de los materiales que pueden almacenarse en este tipo de silos, tales como granos, pellets, minerales, o la conchilla utilizada para determinar las sollicitaciones descritas en los dos apartados precedentes.

No obstante, en la fabricación de alimentos animales es usual la utilización de harinas cuyo comportamiento cohesivo escapa a las hipótesis cubiertas por la norma. Para estos materiales no existe un cuerpo normativo aceptado mundialmente, por lo que se analizaron los criterios establecidos por **Ravenet (1983a)** para la determinación de presiones de cálculo.

De acuerdo a estos criterios, en caso de flujo másico las presiones de llenado pueden obtenerse de acuerdo a la fórmula de Janssen y para las presiones de vaciado debe considerarse un coeficiente de sobrepresión de 2.32, con un pico de 5 en la conexión entre el cuerpo y la tolva. Para estos casos, como el peso específico de las harinas (del orden de 700 [kg/m³]) es muy inferior al de la conchilla utilizada para determinar las cargas de cálculo para materiales granulares, resultan presiones laterales menores a las determinadas previamente.

No obstante, existen dos situaciones donde los materiales pulverulentos pueden generar cargas de mayor magnitud que deben estudiarse puntualmente: la fluidización y la rotura de bóvedas.

En el primer caso, si por movimientos de la masa del material o por inyección de aire se produce un atrapamiento importante de aire, el material comienza a comportarse como un fluido, y las presiones pueden alcanzar el valor de la presión hidrostática, es decir:

$$p_h = \gamma z \quad (17)$$

El caso de la rotura de bóvedas se produce cuando toda la masa de material, inicialmente

en reposo por sobre dicha bóveda, se mueve repentinamente, generando un efecto pistón sobre el aire atrapado en la bóveda, que puede alcanzar presiones del orden de

$$p_h = 2\gamma h_1 \quad (18)$$

Donde h_1 es la altura de material ubicado originalmente sobre la bóveda.

Para el caso considerado, y considerando harinas con un peso específico de hasta 700 [kg/m³] estas presiones superan ampliamente (en mas de 5 veces) a las presiones máximas generadas por los materiales granulares mas pesados. Si se dimensionara el silo para soportar estas cargas, resultaría una estructura antieconómica para la mayoría de los materiales almacenados (materiales granulares no cohesivos de flujo libre). Por lo tanto, se decidió limitar el campo de aplicación de los silos standard excluyendo la hipótesis de fluidización o rotura de bóvedas por sobre el nivel de unión entre tolva y cuerpo.

Como peor hipótesis de cálculo, se utilizó la fórmula propuesta por Ravenet para las presiones que se producen en la tolva en caso de rotura de bóvedas de forma casi plana que se forman en la unión entre tolva y silo (o por debajo de la misma).

$$p = 1.8\gamma d \quad (19)$$

Donde d es la altura de material ubicado originalmente sobre la bóveda, con un valor máximo (propuesto por Ravenet) de dos veces el diámetro o lado del silo. Para silos de altura igual o superior a 8 metros y harinas con un peso específico de 700 [kg/m³] esta presión alcanza los 49440 [Pa], valor inferior al determinado utilizando la norma brasilera para cálculo de silos verticales esbeltos.

Teniendo en cuenta lo anterior, podemos resumir que las hipótesis de diseño utilizadas resultan aptas para silos que almacenen productos granulares o pulverulentos de flujo libre, e incluso productos pulverulentos que puedan formar pequeñas bóvedas dentro de la tolva durante el vaciado, pero no para productos pulverulentos cohesivos que puedan formar bóvedas por sobre el nivel de la tolva.

5.6 Determinación de las cargas sísmicas

El cálculo de las cargas ocasionadas por acción sísmica se realizó según el reglamento [INPRES - CIRSOC 103 \(1991\)](#) para el tipo de zona I (peligrosidad sísmica reducida), y para un suelo tipo II (intermedio). Se categorizó a la estructura como grupo B (construcciones e instalaciones cuyo colapso produciría pérdidas de magnitud intermedia) y se tuvieron en cuenta tanto los esfuerzos horizontales como verticales producidos por el sismo. Con estas características, y determinando las frecuencias naturales de cada estructura mediante análisis modales, se obtuvieron los datos necesarios para determinar el valor de las cargas sísmicas.

En las tablas 4 y 5 se resumen los resultados del cálculo de cargas sísmicas, utilizando la siguiente notación:

γ_d : factor de riesgo

a_s : aceleración máxima del suelo

b : pseudoaceleración máxima

T_1 : período de vibración en el comienzo del plafón del espectro de aceleraciones elásticas

T_2 : período de vibración en el final del plafón del espectro de aceleraciones elásticas

T : período de vibración de la estructura

V_0 : esfuerzo de corte en la base de la estructura

C : coeficiente sísmico de diseño

W : peso de la estructura

S_a : ordenada del espectro de pseudoaceleraciones elásticas horizontales de diseño.

R : factor de reducción por disipación de energía

μ : ductilidad global de la estructura

F_k : fuerza sísmica horizontal en el nivel k

W_k, W_i : peso en el nivel k , peso en el nivel i

h_k, h_i : altura en el nivel k , altura en el nivel i

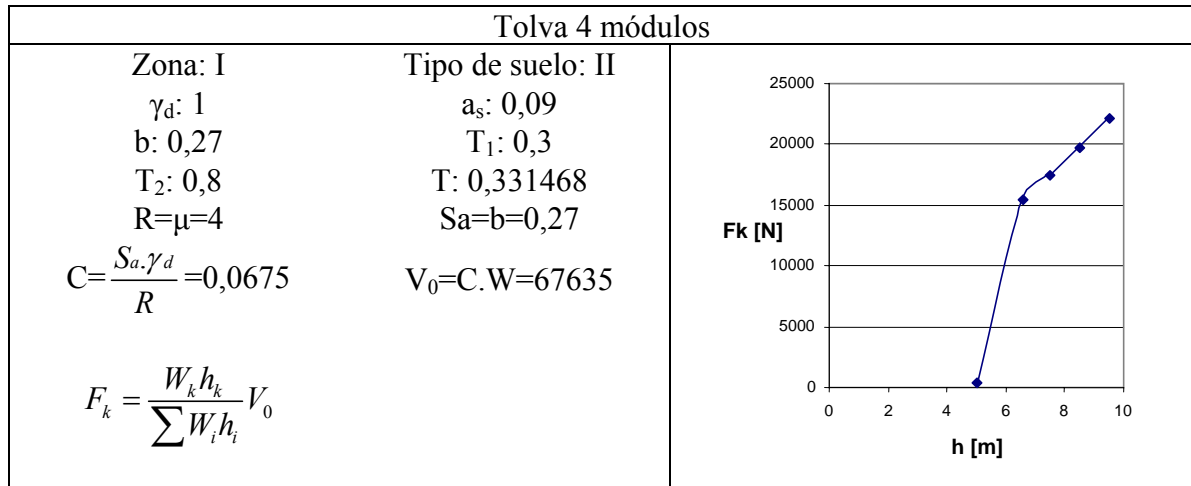


Tabla 4: Cargas sísmicas para la tolva de 4 módulos

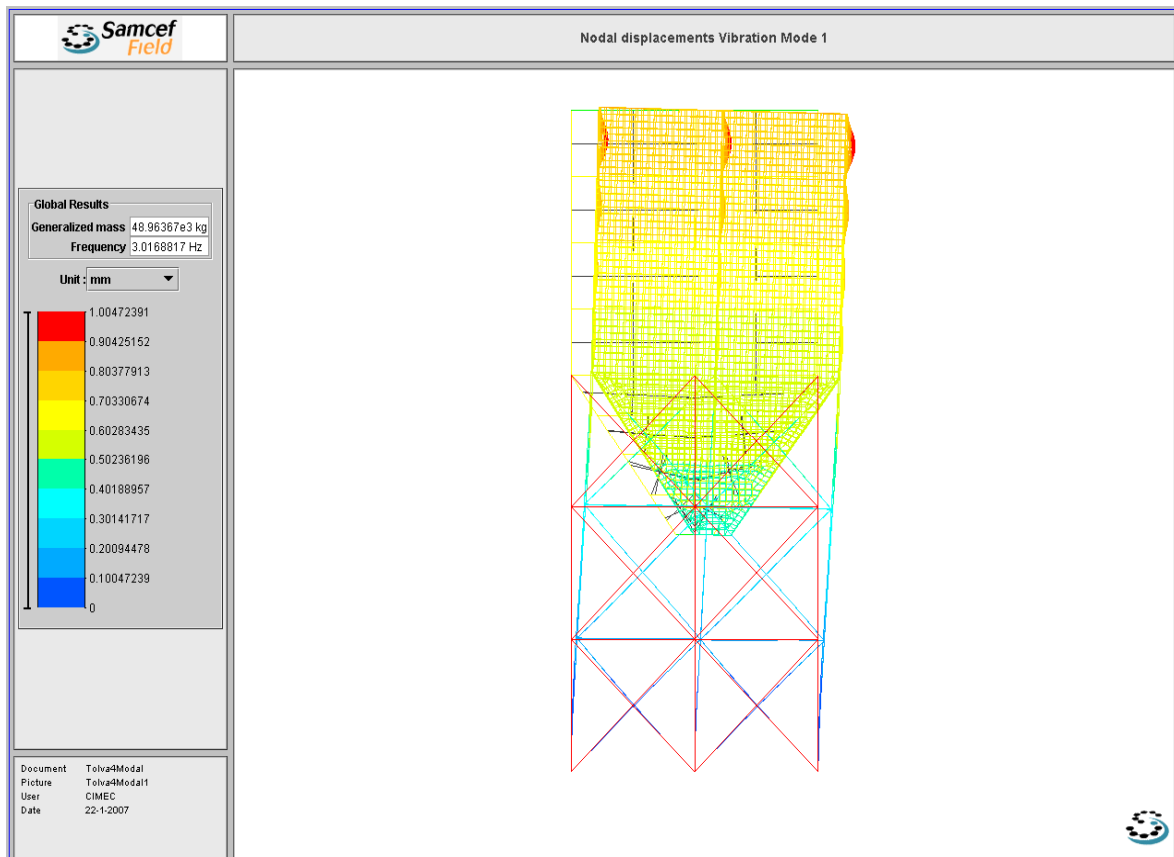


Fig.4: Primer modo de vibración de la celda de 4 módulos (3.0 Hz)

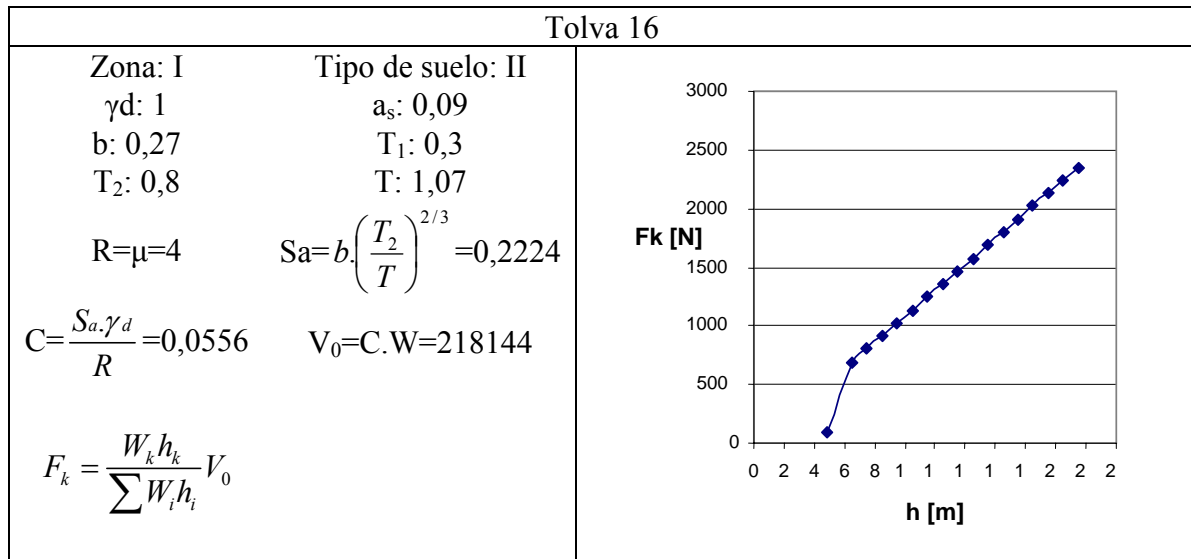


Tabla 5: Cargas sísmicas para la tolva de 16 módulos

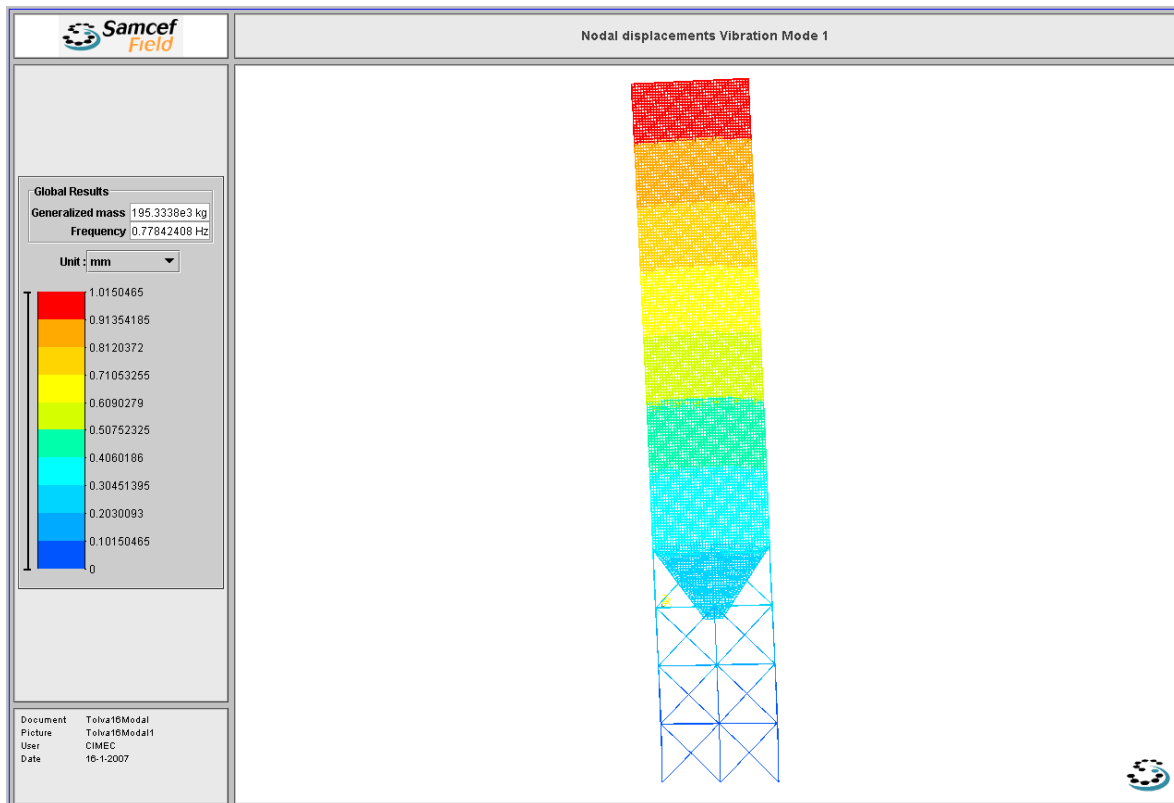


Fig.5: Primer modo de vibración de la celda de 16 módulos (0.78 Hz)

6 RESULTADOS PARA EL MODELO GLOBAL

6.1 Silo lleno en estado estacionario, con carga sísmica

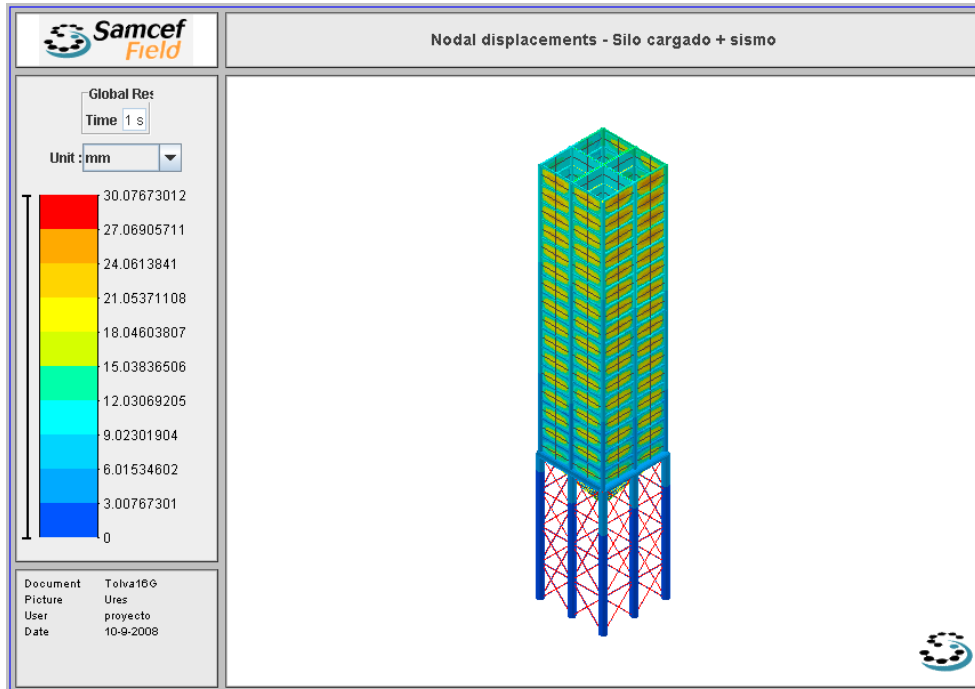


Fig.6: Desplazamientos nodales

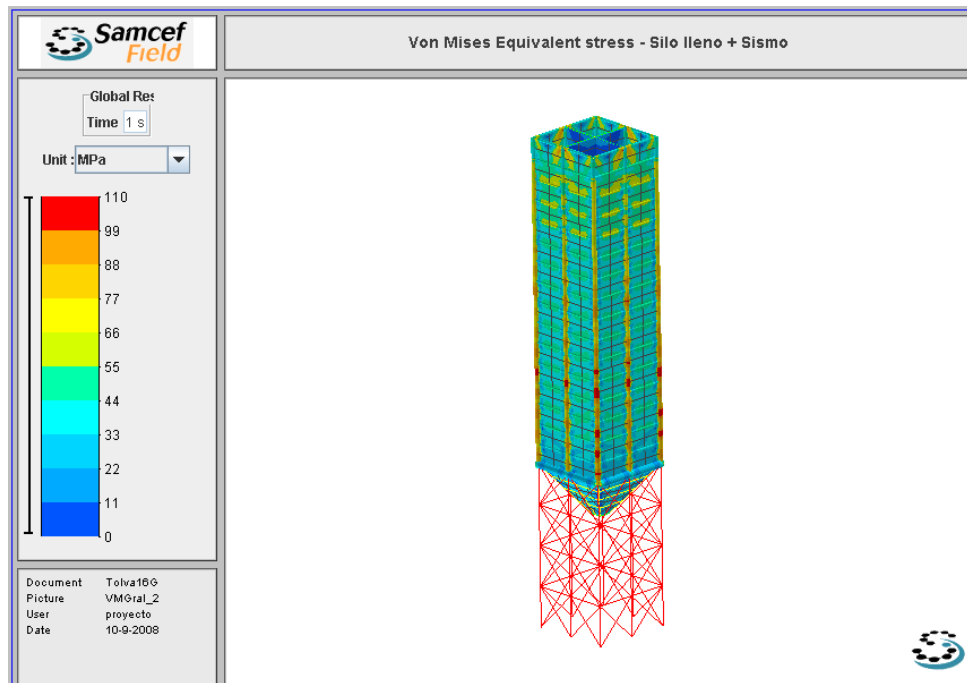


Fig.7: Tensiones equivalentes de Von Mises (en el plano medio de las chapas)

En primer lugar se analizó el comportamiento estructural del silo en condición de llenado completo (con conchilla en las 4 celdas), para determinar las tensiones y deformaciones máximas que pueden producirse cuando la carga se encuentra en estado estacionario y se produce un movimiento sísmico, utilizando como carga $1.3E_w \pm E_s$, siendo E_w el efecto de las

cargas gravitatorias descritas en las secciones 5.2 y 5.3 y E_s el efecto de las cargas sísmicas descritas en la sección 5.6.

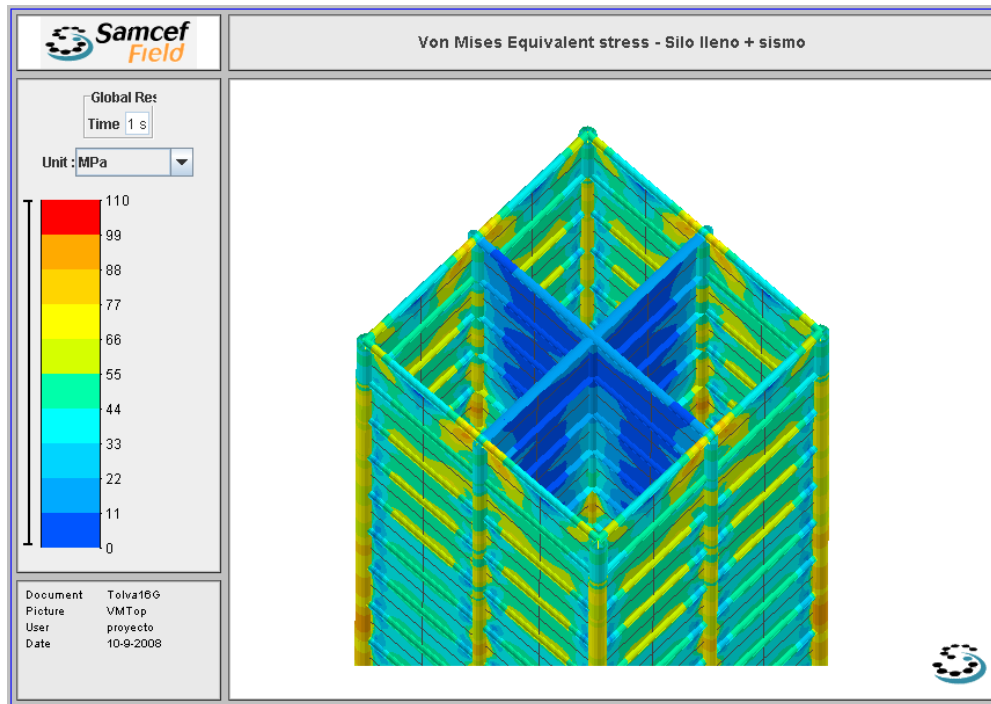


Fig.8: Tensiones equivalentes de Von Mises (en el plano medio de las chapas)

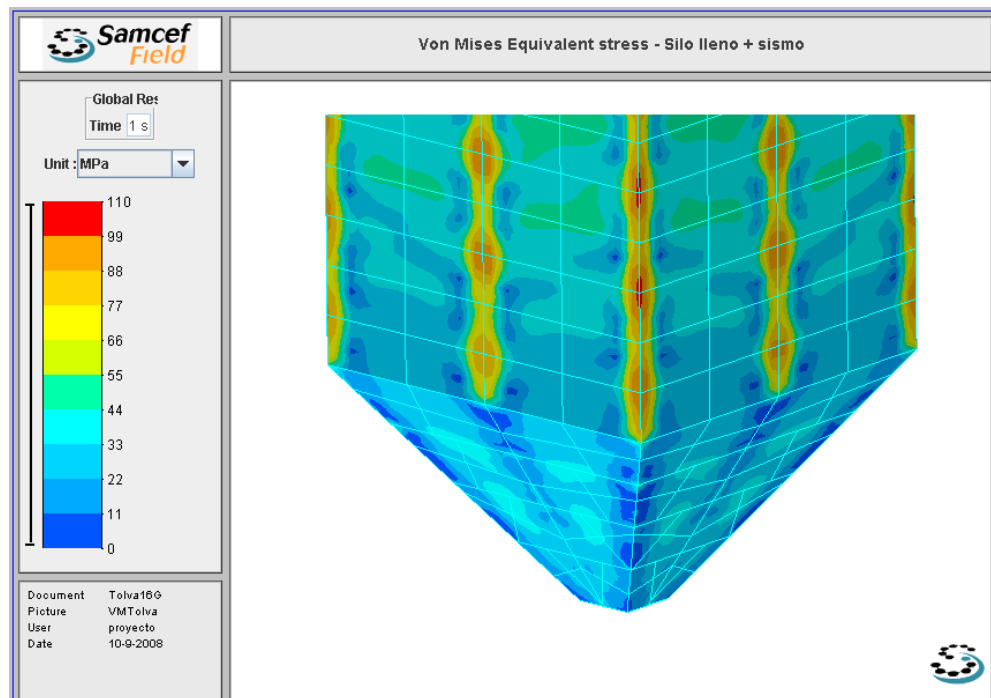


Fig.9: Tensiones equivalentes de Von Mises (en el plano medio de las chapas)

Si bien esta no es una condición crítica para el dimensionamiento de los componentes del silo, sirve como referencia respecto del comportamiento en el estado de carga especificado en el reglamento **INPRES - CIRSOC 103 (1991)** para el análisis y diseño sismorresistente de la estructura. Las figuras 6 a 9 muestran los resultados de este análisis.

6.2 Silo lleno en condición de descarga de una celda

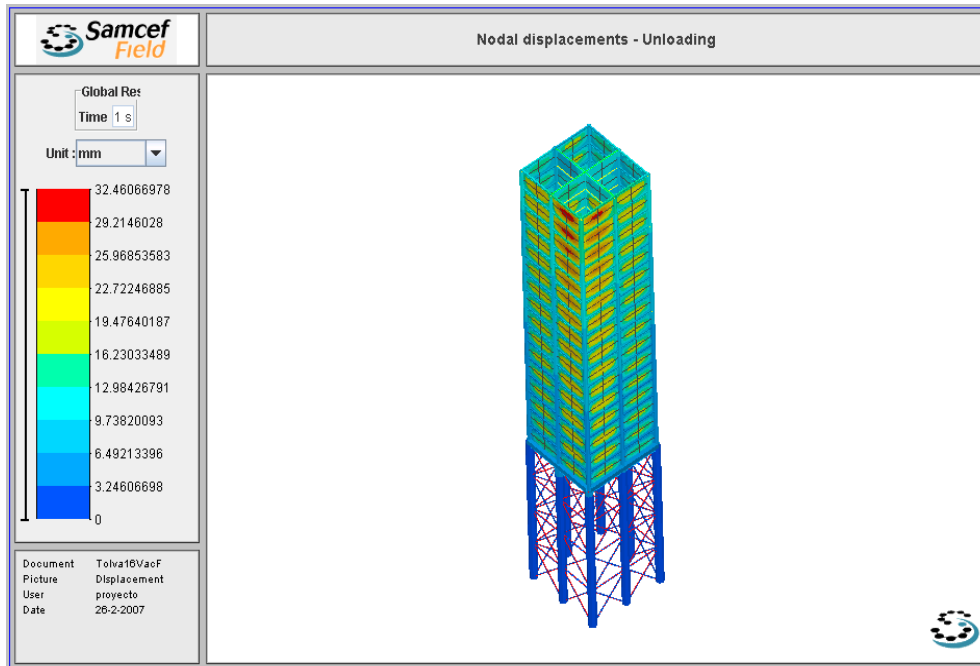


Fig.10: Desplazamientos nodales

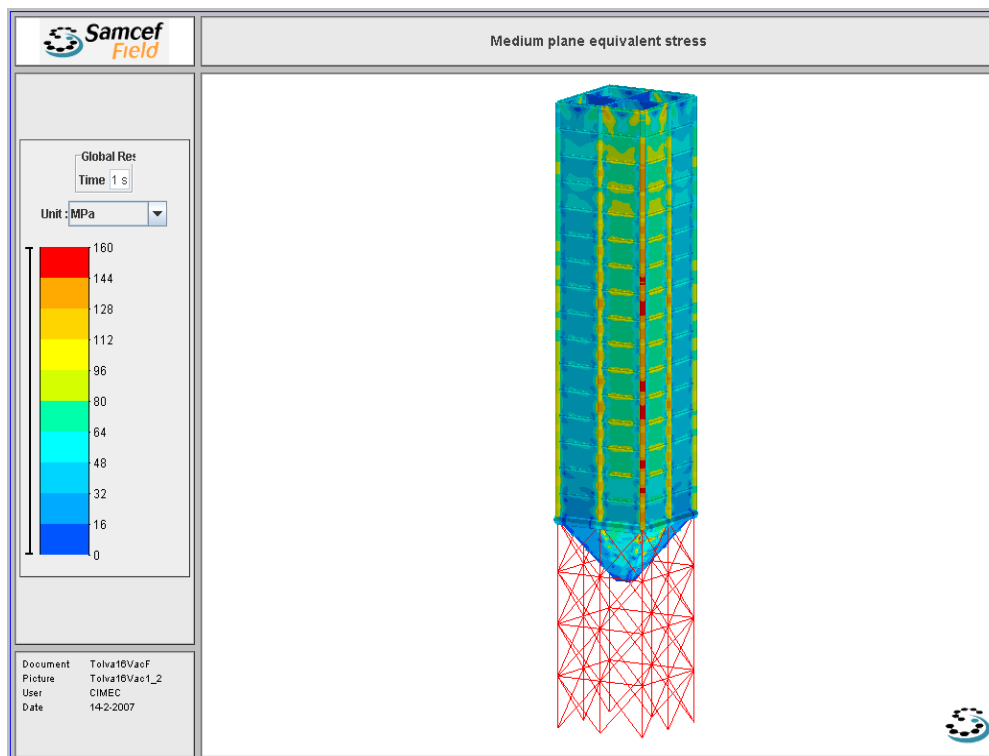


Fig.11: Tensiones equivalentes de Von Mises (en el plano medio de las chapas)

En segundo lugar se analizó el silo en condición de llenado completo e iniciando el vaciado de un depósito. Se incluyeron también las cargas sísmicas, aún cuando su magnitud es poco significativa frente a las presiones dinámicas del vaciado.

Esta condición de carga es la condición crítica para la mayoría de los componentes estructurales, y bajo esta condición se dimensionaron las chapas y perfiles del cuerpo y la

tolva. Las figuras 10 a 17 muestran los resultados de este análisis.

Puede apreciarse que en este estado algunos componentes superan la tensión de fluencia del material y llegan al estado plástico.

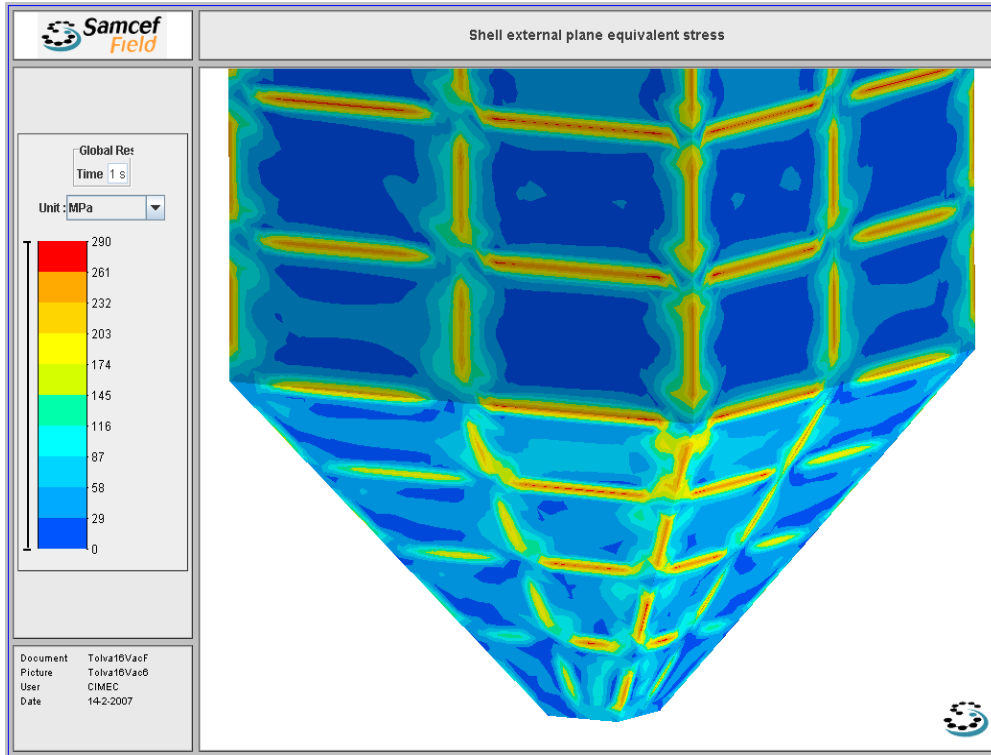


Fig.12: Tensiones equivalentes de Von Mises (en las fibras externas)

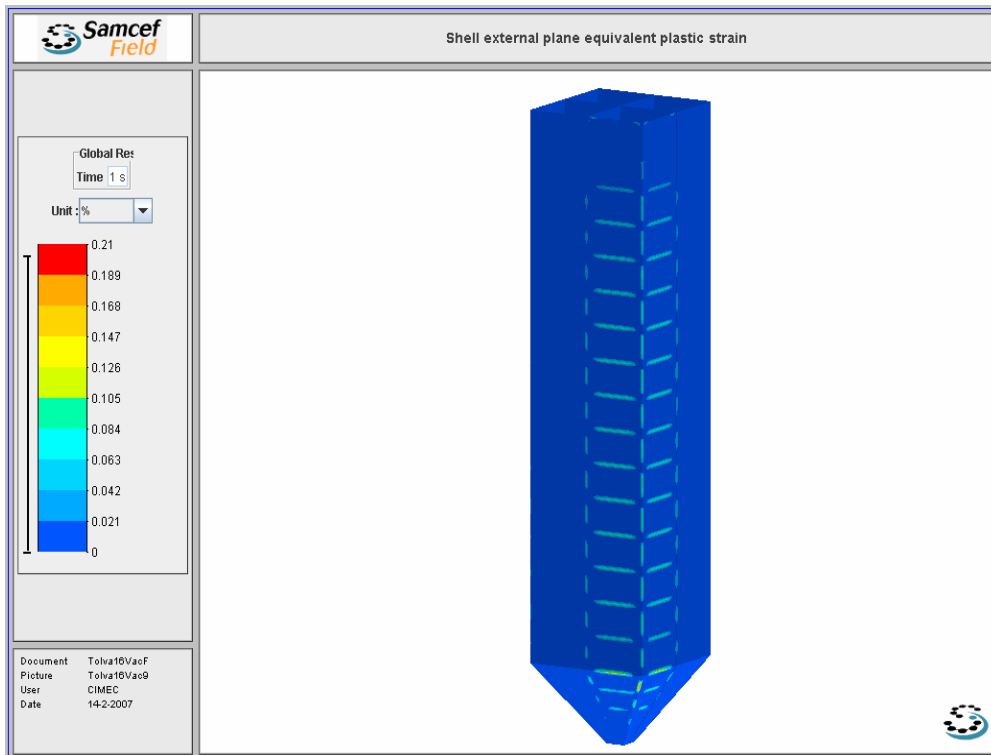


Fig.13: Deformaciones plásticas equivalentes (en las fibras externas)

Debe tenerse en cuenta que esta plastificación se produce solamente en las fibras externas de componentes solicitados a flexión, en zonas de transición de rigidez, y que las deformaciones plásticas equivalentes que se producen son de muy pequeña relevancia (del orden de 0.2% en chapas y 0,15% en perfiles) en comparación con la deformación de rotura del acero utilizado (que posee un alargamiento de rotura mínimo de 28% (**Reglamento CIRSOC 301, 1982**)).

Por otra parte, las tensiones axiales en la fibra neutra de cada sección son inferiores a 160 MPa, valor conservativo respecto del límite de fluencia del acero utilizado (220 MPa), y las tensiones máximas en las fibras extremas no superan los 290 MPa, valor muy inferior a la tensión de rotura del acero utilizado (370 MPa).

Considerando que la aplicación a esta tipología estructural de los criterios establecidos para el cálculo de elementos en estado plástico dentro del cuerpo reglamentario argentino vigente (**Reglamento CIRSOC 301, 1982, Recomendación CIRSOC 303, 1991**) conducirían a una estructura de espesor y peso totalmente inviable desde el punto de vista técnico y económico, en la verificación estructural se utilizaron criterios similares a los definidos dentro del código ASME para recipientes sometidos a presión (**ASME, 1977**).

Debido a que el sentido de las cargas no varía durante los procesos de carga y descarga, y que los valores máximos de la tensión y la deformación plástica se encuentran muy por debajo de los límites de rotura, la repetición de ciclos de carga conducirá a una estabilización de las deformaciones plásticas, definida como “shakedown” dentro del código **ASME (1977)**, de modo que se satisfacen los requerimientos estructurales previstos por dicho código.

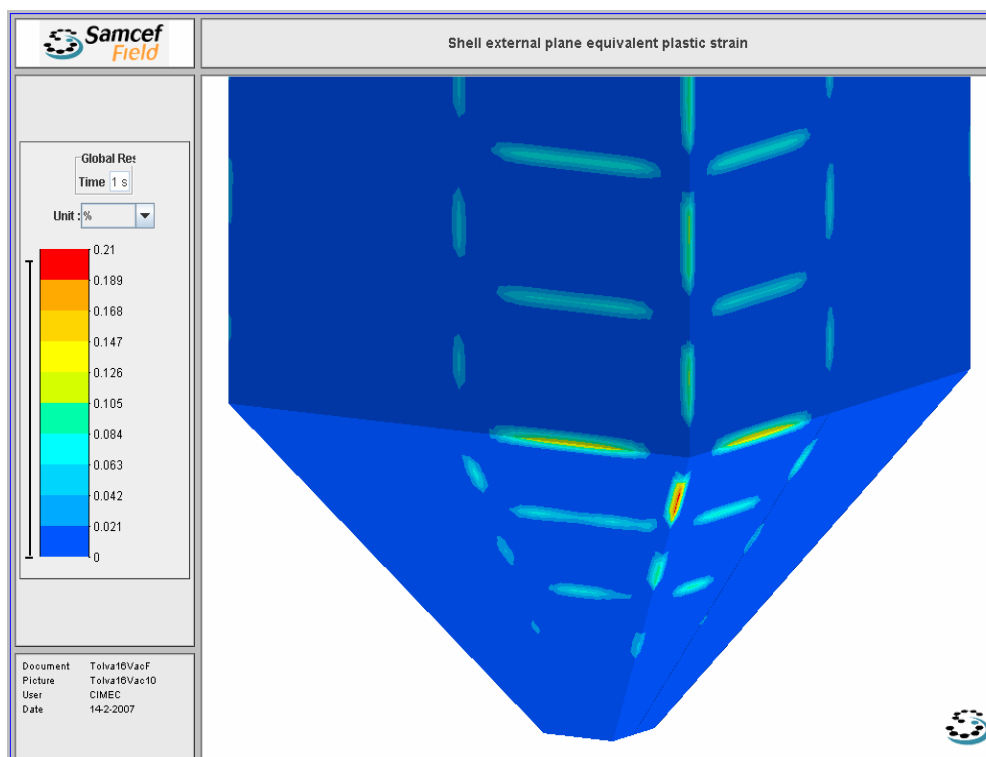


Fig. 14: Deformaciones plásticas equivalentes (en las fibras externas)

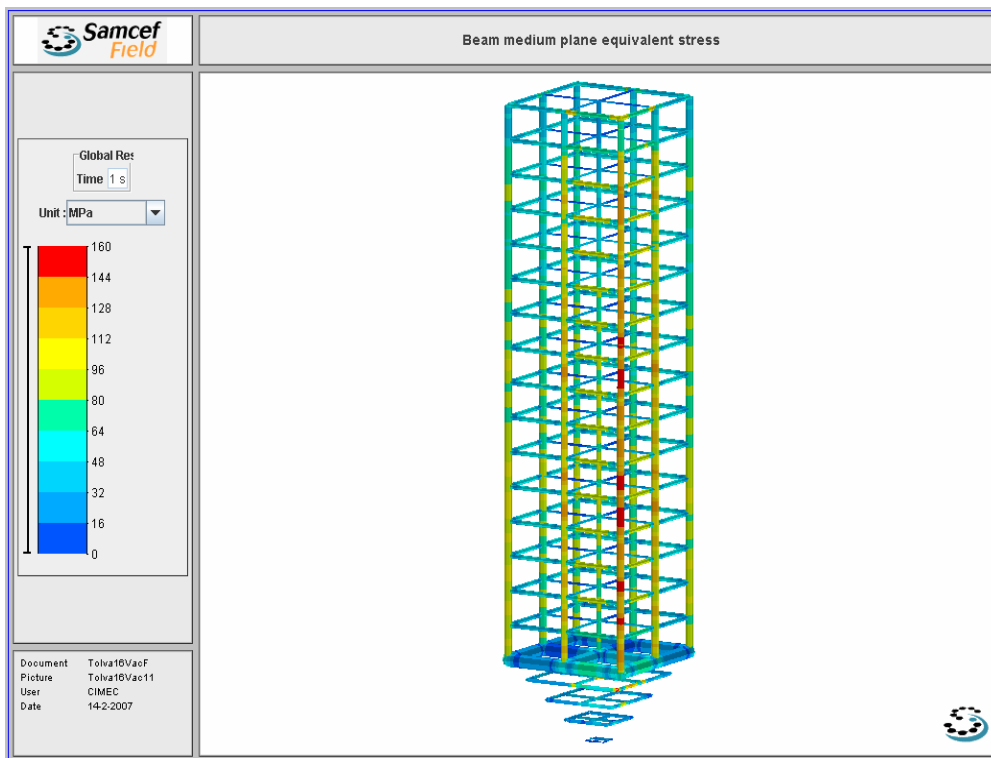


Fig.15: Tensiones en perfiles (en el eje neutro)

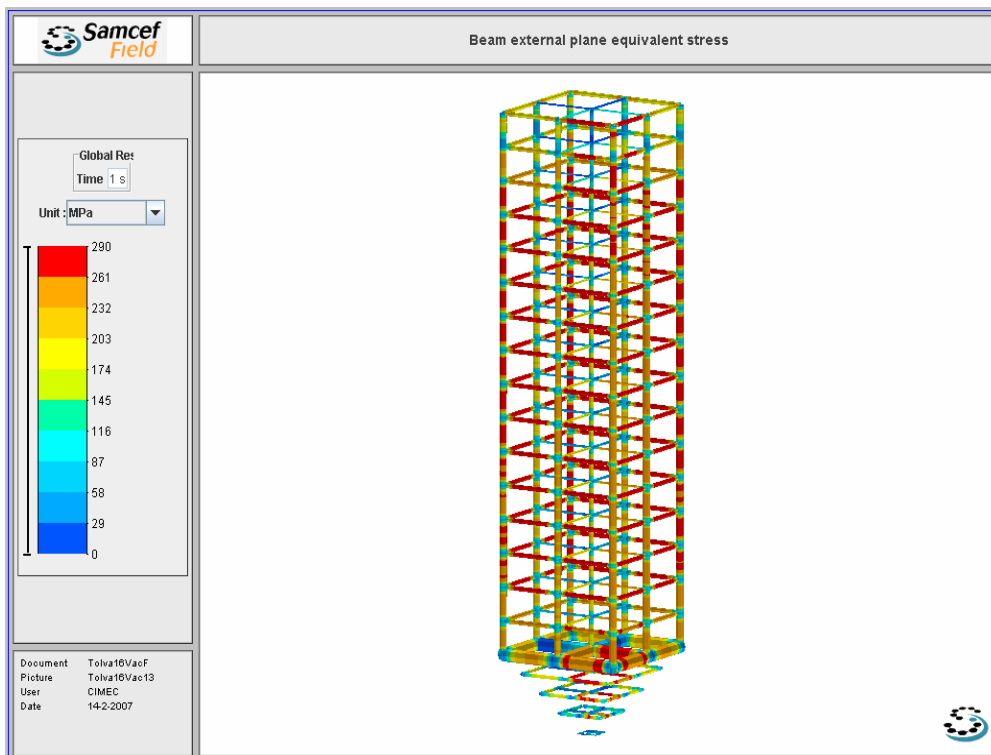


Fig.16: Tensiones en perfiles (en la fibra externa)

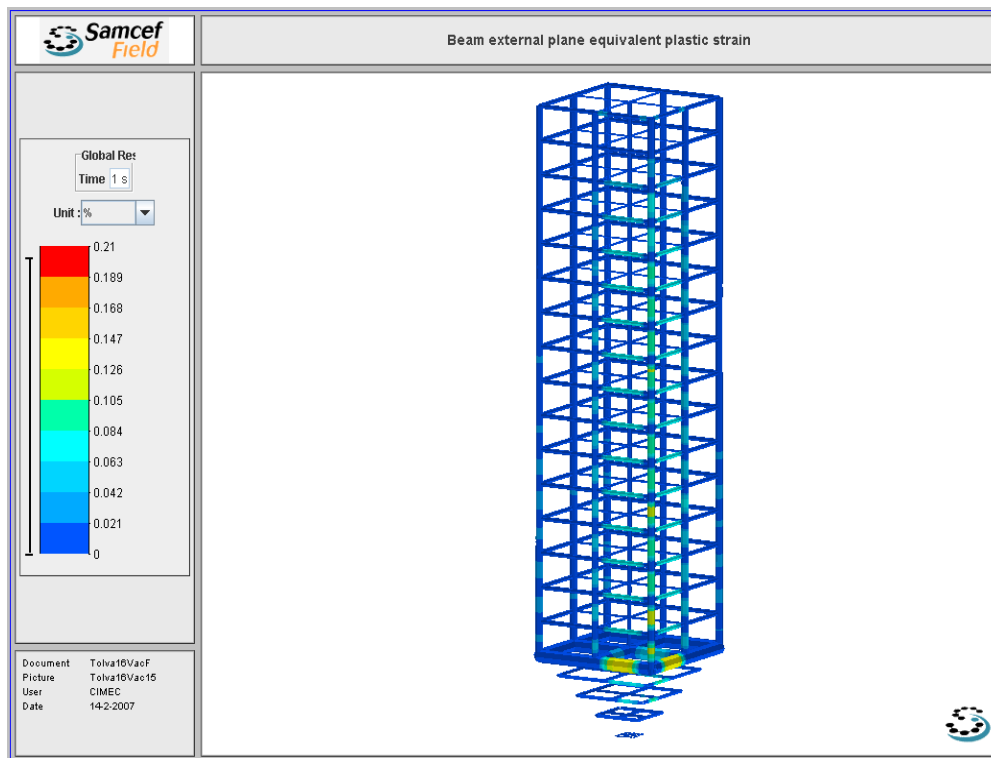


Fig.17: Deformación plástica equivalente en perfiles (en la fibra externa)

6.3 Silo con una única celda llena y en condición de descarga

La condición que se presenta al inicio del vaciado de una celda del silo, estando las demás vacías, se analizó para corroborar que no existan esfuerzos que puedan generar inestabilidad (pandeos locales o globales) de la estructura.

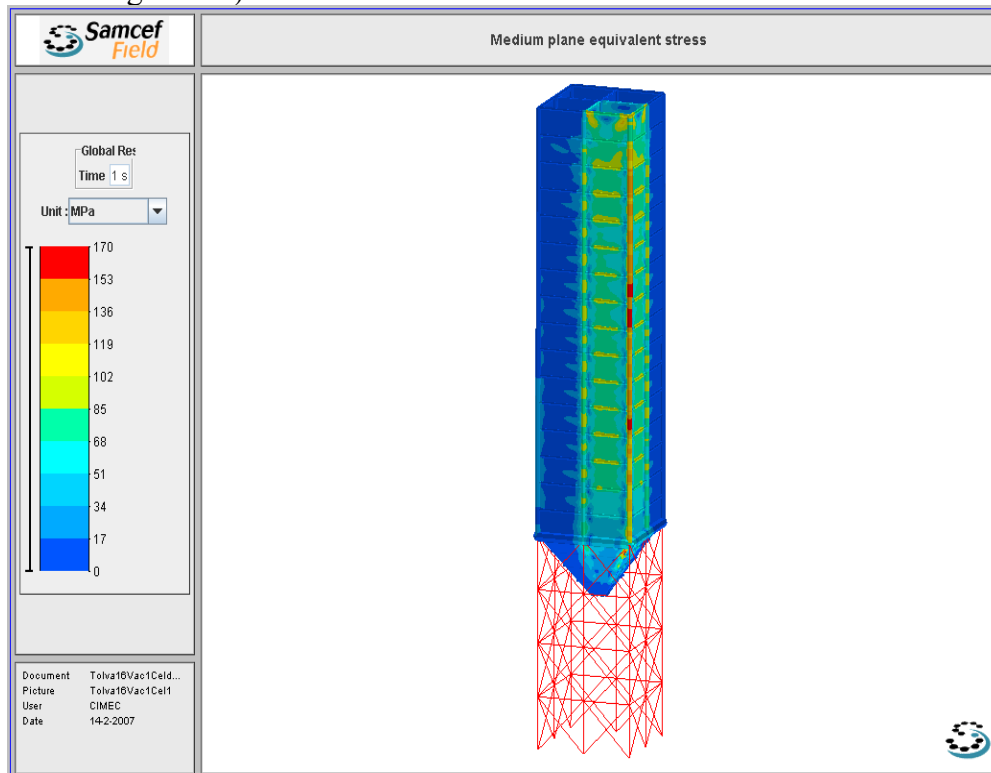


Fig.18: Tensión equivalente de Von Mises (en el plano medio)

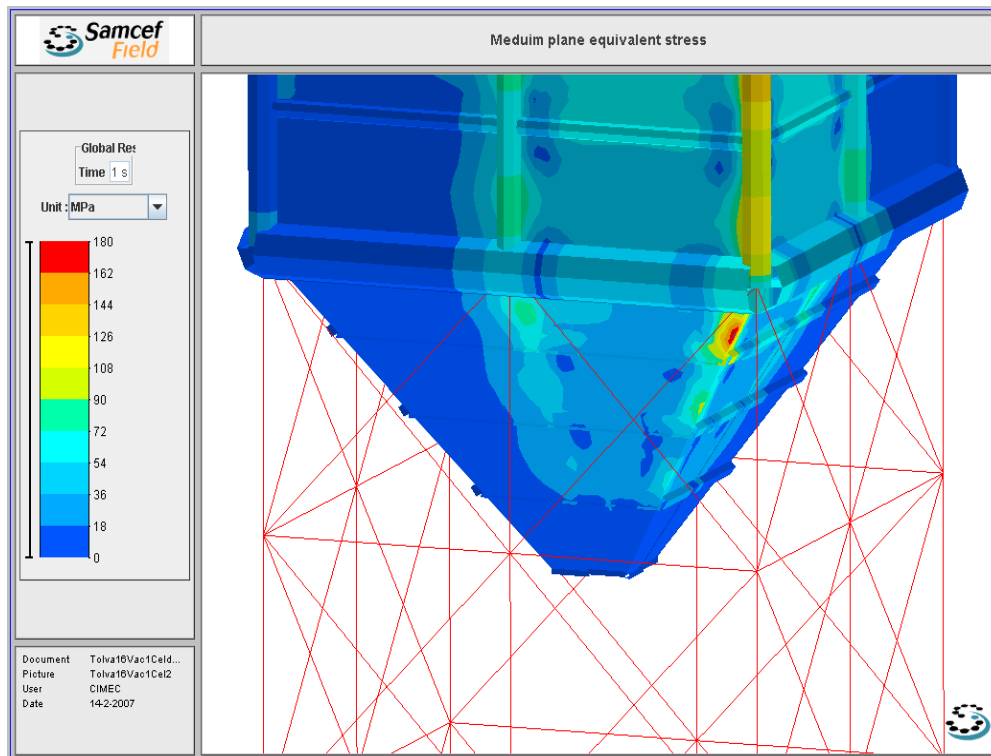


Fig.19: Tensión equivalente de Von Mises (en el plano medio)

Los resultados del análisis (algunos de los cuales se muestran en las figuras 18 y 19) no muestran que sea factible la aparición de fenómenos de inestabilidad elástica.

7 CÁLCULO DE LAS UNIONES ATORNILLADAS

7.1 Verificación de la resistencia de la chapa perforada

El cálculo de los tornillos de unión fue realizado utilizando fórmulas clásicas de dimensionamiento para este tipo de uniones.

Una vez determinado el modo de sujeción de las chapas (cálculo de tornillos de unión entre chapas), y teniendo en cuenta que la unión mas solicitada resulta la unión vertical entre chapas y parantes, se construyó un modelo de elementos finitos de una chapa aislada, suponiendo un apoyo articulado en todos sus bordes e imponiendo restricciones al desplazamiento en dirección normal al borde en tres de los mismos, mientras que en uno de los lados se modelaron los agujeros de la chapa y se fijó el desplazamiento de la misma en los nodos de dichos agujeros.

Se aplicó una carga equivalente a la máxima definida en el apartado 4.4 para las chapas del cuerpo. La presión normal a la chapa fue de 49925 Pa, suma de la presión máxima durante la descarga y la sobrepresión en la transición del cuerpo con la tolva para flujo másico, y la fuerza en el plano de la chapa fue de 8085 N (máxima fuerza de fricción).

El espesor de chapa considerado fue de 3.2 mm (chapas inferiores del silo)

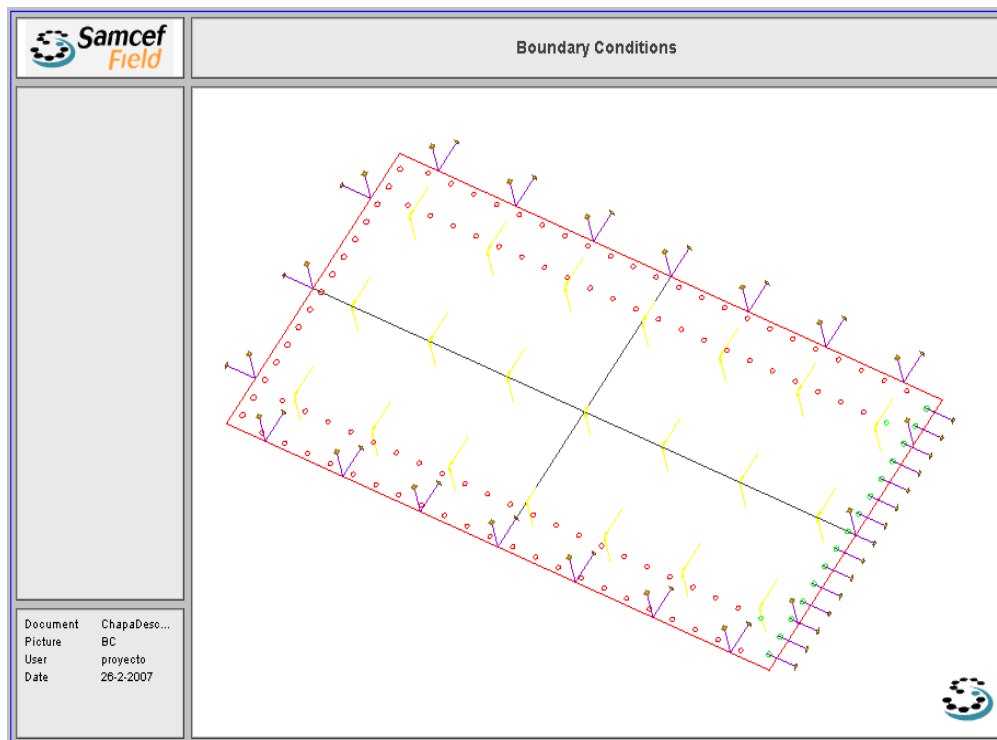


Fig.22: Modelo utilizado para el análisis de la chapa abulonada

La figura 22 describe el modelo utilizado para el análisis.

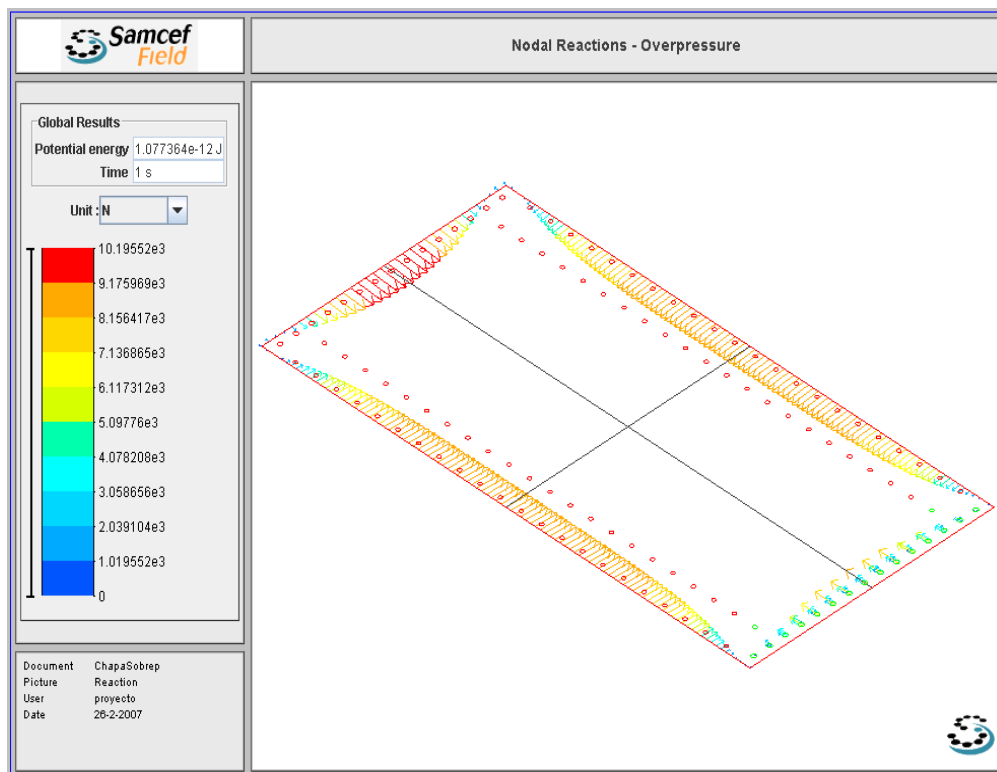


Fig.23: Reacciones en las uniones

La figura 23 muestra las reacciones en los puntos de fijación que se producen. Se aprecia claramente que los tornillos centrales son los más solicitados. Durante el vaciado la carga total que debe resistir el tornillo mas solicitado es de 19100 N, algo inferior a los 20800N

utilizados como carga de cálculo para la unión atornillada.

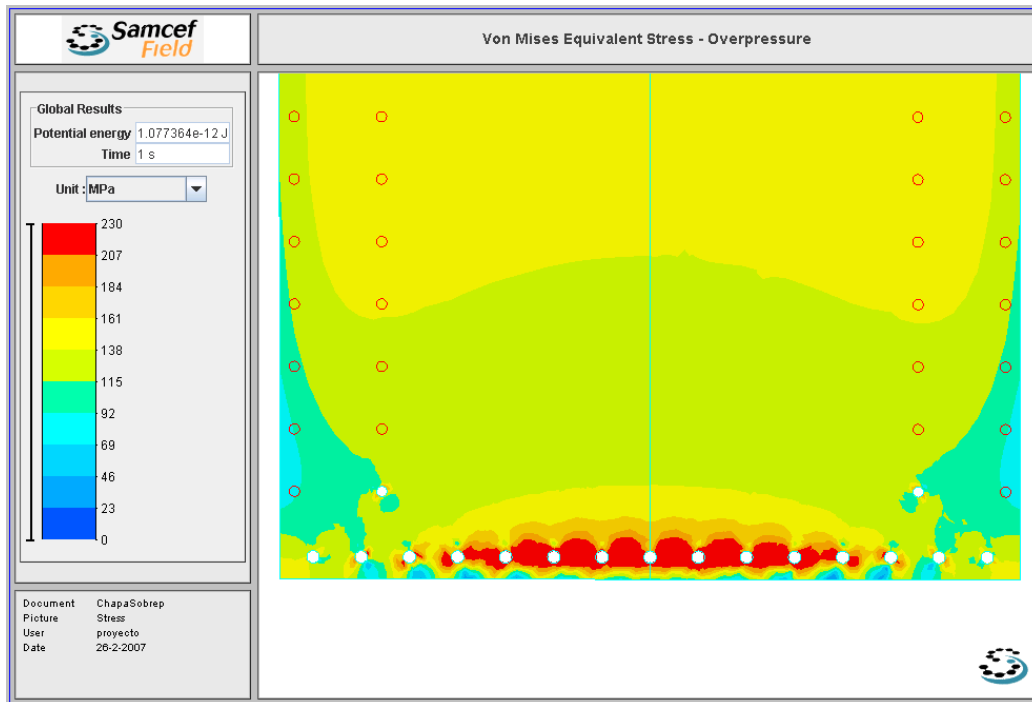


Fig.24: Tensiones en la chapa (fibra externa)

La figura 24 muestra las tensiones que se producen en la fibra mas solicitada de la chapa. Puede apreciarse que estos valores son del orden del límite de fluencia del material. En el plano medio de la chapa las tensiones son inferiores y con una distribución similar a la descripta por diversos autores para agujeros actuando como concentradores de tensión.

7.2 Comparación con el análisis de la chapa perforada utilizando un modelo lineal

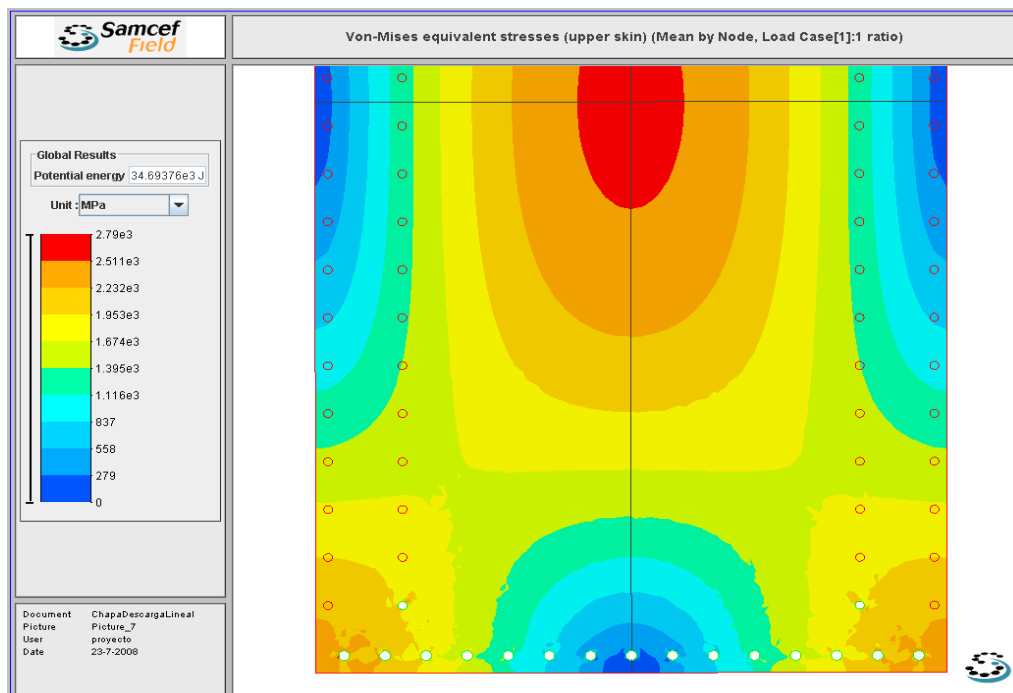


Fig.25: Tensiones en la chapa (fibra externa) utilizando un módulo de cálculo lineal

En la figura 25 puede visualizarse un trazado de las tensiones de las tensiones equivalentes de Von Mises en la fibra externa de una chapa a la cual se le han aplicado las mismas cargas y condiciones de vínculo que en el cálculo anterior, pero esta vez calculada utilizando el módulo lineal de cálculo ASEF del software SAMCEF FIELD V5.2 (Samtech, 2007).

Se aprecia que al no considerar la deformación de la chapa se sobreestiman groseramente (en mas de un orden de magnitud) las tensiones debidas a flexión, conduciendo a resultados que no tienen ninguna validez desde el punto de vista estructural e ingenieril.

8 CONCLUSIONES

El aspecto más complejo del análisis de estructuras para almacenamiento de materiales a granel lo constituye la determinación de las cargas actuantes. La bibliografía existente se basa principalmente en conclusiones empíricas, con modelos basados en múltiples parámetros determinados a partir de experiencias cuya extrapolación a diversos materiales u otras condiciones de servicio es dificultosa. Adicionalmente, cabe remarcar que no existe ninguna normativa argentina que pueda ser utilizada como referencia para este propósito.

Desde el punto de vista numérico el factor más importante para el diseño de celdas de paredes planas es considerar la influencia de las no linealidades geométricas durante el proceso de carga de las chapas, dado que si el análisis se realiza utilizando módulos de cálculo lineal los resultados que se obtienen no reflejan el comportamiento real de la estructura. Además, para lograr estructuras que sean viables desde el punto de vista económico, es necesario considerar el comportamiento de los materiales en el campo no lineal, aspecto que no está tratado adecuadamente en el cuerpo reglamentario argentino.

REFERENCIAS

- ASME, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code – Section VIII, Pressure Vessels - Division 2, Alternative Rules*, 1977.
- CIRSOC, *Reglamento INPRES-CIRSOC 103 - Normas Argentinas para Construcciones Sismorresistentes*, 1991.
- CIRSOC, *Reglamento CIRSOC 301 - Proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de acero para edificios*, 1982.
- CIRSOC, *Recomendación CIRSOC 303 – Estructuras livianas de acero*, 1991.
- DIN, *Norma DIN 1055 - Design loads for buildings- Loads in silo bins*, 1987
- Palma, G. *Pressoes e fluxo em silos esbeltos*, Tesis de Master, Univ.de San Pablo, 2005
- Ravenet, J., *Silos*, tomo I. Editores Técnicos Asociados, 1983a.
- Ravenet, J., *Silos*, tomo II. Editores Técnicos Asociados, 1983b.
- Ravenet, J., *Silos*, tomo III. Editores Técnicos Asociados, 1983c.
- Reimbert, M. y Reimbert, A., *Silos, Théorie et Pratique*. Eyrolles, 1977.
- Samtech, *SAMCEF Users Manual*, <http://www.samcef.com>, 2007.
- Schulze, D., *Stresses in silos*. <http://www.dietmar-schulze.de/spannepr.html>, 2007.