

## EVALUACION DE LA INTERACCION GRANO-PARED EN EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE SILOS

N.L.Ercoli <sup>a</sup>, P. Ciancio <sup>a</sup> y L.M.Massey <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Area de Estructuras, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, UNCPBA,  
Olavarría, Bs. As., Argentina, [nercoli@fio.unicen.edu.ar](mailto:nercoli@fio.unicen.edu.ar), <http://www.fio.unicen.edu.ar>

<sup>b</sup> Becario de Entrenamiento, Area de Estructuras, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de  
Ingeniería, UNCPBA, Olavarría, Bs. As., Argentina

**Palabras clave:** silos, modelización, sobrepresiones, descarga.

**Resumen.** Los silos son tipologías estructurales que se han utilizado en todas las civilizaciones desde los tiempos más antiguos para almacenar cosechas. En la actualidad y dado el contexto económico en nuestro país, productor de granos y exportador para distintos países del mundo, las temáticas relacionadas con el manejo de los granos desde su cosecha hasta el destino final, adquieren especial significación, en particular el ensilado de materiales granulares en silos especialmente diseñados al efecto. Este diseño está notoriamente influenciado por el tipo de material a ensilar.

Una de las principales causas de falla en silos para granos es debida a las presiones excesivas ejercidas sobre la pared del silo durante la descarga de los mismos. Para evitar este problema, que deja al silo fuera de servicio, con las consecuencias económicas que ello genera, se están produciendo avances a partir de recientes investigaciones. Dentro de las teorías tradicionales, se han realizado muchos intentos para obtener expresiones matemáticas que reflejen la sobrepresión producida debido a la descarga del material ensilado.

Una nueva posibilidad de investigación aparece en estos tiempos con la aplicación de la simulación numérica computacional de estas tipologías estructurales. En la modelización se aplican conceptos de análisis no lineal, y una ley elasto-plástica constitutiva es aplicada a silos cilíndricos con tolvas y paredes rígidas, según el criterio de Drucker-Prager.

Para efectuar el análisis se generan modelos de silos para condiciones estáticas y dinámicas, procesos de carga y descarga, capaces de simular el comportamiento de material granular almacenado en silos, la influencia del tipo de pared y las características geométricas del silo, como asimismo los parámetros relacionados con el material granular almacenado. Los modelos numérico-computacionales constituyen un medio eficaz para determinar la distribución de presiones en ambos procesos.

En este trabajo se analiza la influencia de la interacción grano-pared durante la descarga centrada sobre el comportamiento de silos para materiales granulares con y sin tolva, modelizando dicha interacción mediante la introducción de elementos de contacto y planos de deslizamientos, a través de un análisis dinámico.

## 1 INTRODUCCION

El objetivo de este desarrollo es analizar las presiones y tensiones resultantes en las paredes del silo por efecto de la interacción grano- pared. Dicha incidencia será evaluada mediante la implementación y resolución de modelos numérico-computacionales, utilizando elementos de contacto, que sean capaces de recrear la mencionada fuerza de fricción. Se toman como antecedentes las recientes contribuciones desarrolladas en la temática ([Ayuga, et al., 2001](#)).

En principio, esta investigación requiere efectuar un relevamiento sobre las teorías tradicionales y los desarrollos experimentales que atañen al cálculo o predicción de presiones sobre las paredes de silos.

El diseño de silos está notoriamente influenciado por el tipo de material a ensilar.

El uso de los métodos numéricos en el diseño de silos requiere de las propiedades que describen el comportamiento de los materiales que son comúnmente almacenados en ellos. Las variaciones en los valores de estos parámetros pueden ocasionar riesgos de falla en este tipo de estructuras. Existen diferentes métodos de ensayo para determinar estas propiedades, y en general no se encuentran muchos datos de materiales reales en la bibliografía disponible. En el caso particular de esta investigación y considerando que el interés radica en utilizar valores correspondientes a nuestros productos agrícolas de mayor producción, se ha seleccionado al trigo como material tipo. Se estudian los parámetros que tienen incidencia en el fenómeno de descarga del silo y la caracterización del tipo de flujo que se genera.

## 2 METODOLOGÍA

La temática analizada se aborda utilizando: 1) la experimentación y teorías de vaciado y 2) la modelización numérico-computacional.

### 2.1 Teorías tradicionales y experimentales

Dentro de las teorías tradicionales, se han realizado muchos intentos para obtener expresiones matemáticas que reflejen la sobrepresión producida debido a la descarga del material ensilado. Para efectuar el diseño de silos con adecuada seguridad hay que tener en cuenta dos factores fundamentales:

- 1) tipo de producto a almacenar
- 2) características de la celda exigidas por el proceso industrial a realizar

En cuanto al tipo de producto a almacenar se pueden distinguir cuatro grupos fundamentales:

- a) partículas gruesas con dimensiones superiores a 100 mm
- b) partículas granulares con dimensiones comprendidas entre 30 y 5 mm
- c) partículas finas en las que puede intervenir la cohesión y con dimensiones comprendidas entre 5 mm y 10 micras
- d) partículas extrafinas con dimensiones inferiores a 10 micras

El estudio llevado a cabo se encuentra dentro del grupo c) respecto a la granulometría observada, estando las mayores dimensiones del grano comprendidas entre 6,01 y 6,81 mm ([Kachru et al.; 1994](#)). Pero según los ensayos experimentales más recientes referentes a la temática ([Moya et al., 2001](#)), se asume que el producto analizado es *no cohesivo*, ya que el coeficiente de cohesión para humedades corrientes arrojan valores muy bajos.

Con respecto a las teorías de vaciado, [J. Ravenet, \(1978\)](#) elaboró las siguientes conclusiones: La forma de vaciado depende de: la relación altura-diámetro o lado de la celda, el ángulo de rozamiento interno del producto granular almacenado, finura o rugosidad de la pared del silo y tolva y de la pendiente de la tolva. En función de estos factores, J. Ravenet determinó la

forma de flujo durante el vaciado en diversas maquetas de diferentes características. Los ensayos efectuados permitieron determinar el flujo en función de la relación altura-lado y de la inclinación de la tolva. De los mismos se destacó el buen cumplimiento de la teoría desarrollada por Jenike y Johanson, (1968) en relación al ángulo del plano de corte originado durante el vaciado en función del ángulo de fricción interna y acentuó la importancia de esta última propiedad física de los materiales granulares no cohesivos.

Para una relación lado-altura igual a 2 y fondo plano el vaciado se produce mediante un flujo embudo siendo la velocidad sobre la salida muy alta y en la zona superior de la superficie del grano es casi constante (Figura 1). Al formarse el embudo las presiones sobre la pared se transmiten de forma uniforme con un coeficiente de sobrepresión de 1,30.

La influencia de la tolva fue analizada con diferentes pendientes y distintas formas, cónica e hiperbólica (Figuras 2 a 4).

Se observó que para una tolva con inclinación igual a  $40^\circ$  (Figura 2) se produce un cono de depresión mayor al de fondo plano y cuando la tolva toma forma de hipérbola el cono se vuelve más agudo y se advierte un leve defasaje del flujo. Para una inclinación de la tolva de  $70^\circ$  el flujo observado es un flujo másico ya que toda la masa se mueve a velocidad constante (Figura 4).

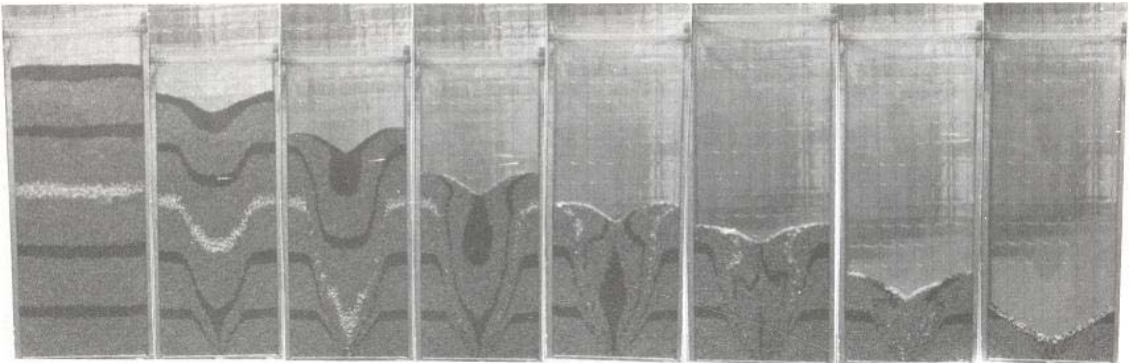


Figura 1: Fotografías flujo de vaciado centrado, según Ravenet. Relación altura-lado, igual a 2

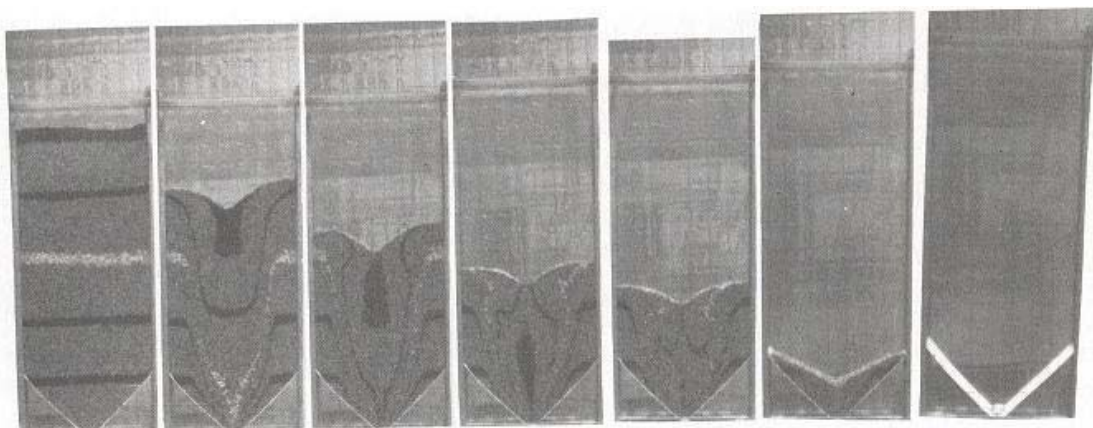


Figura 2: Fotografías flujo de vaciado centrado, según Ravenet. Relación altura-lado igual a 2. tolva con  $40^\circ$  de pendiente

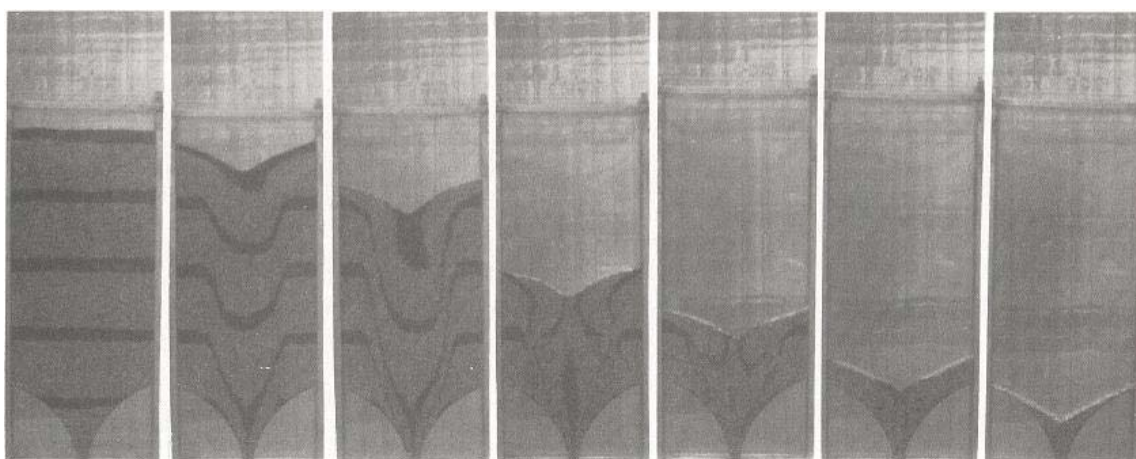


Figura 3: Fotografías flujo de vaciado centrado, según Ravenet. Relación altura-lado igual a 2. Perfil de tolva hiperbólico

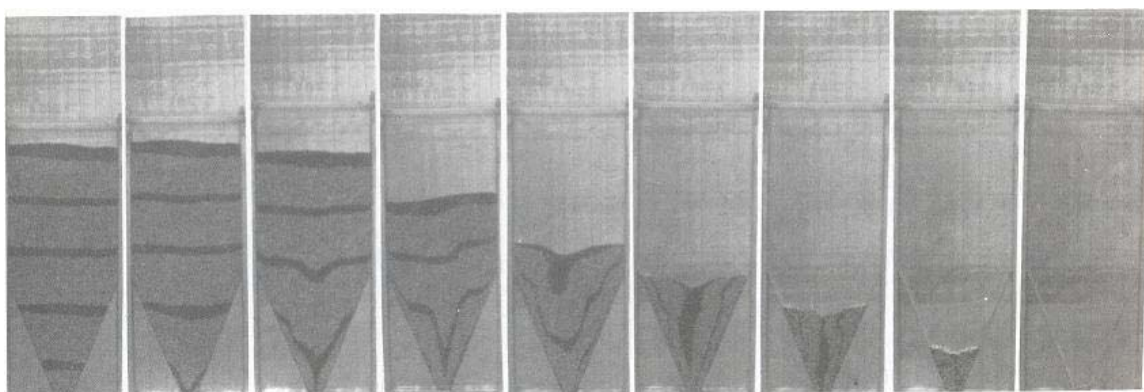


Figura 4: Fotografías flujo de vaciado centrado, según Ravenet. Relación altura-lado igual a 2. Tolva de 70° de pendiente

## 2.2 Modelización numérico-computacional

La aplicación de la simulación numérica en el estudio de esta problemática, utilizando el método de los elementos finitos posibilita una valiosa alternativa de análisis, y es utilizada por muchos investigadores del tema. La etapa de modelización de estas estructuras requiere de la aplicación de conceptos de análisis no lineal y de leyes constitutivas elasto plásticas. En este trabajo se utiliza el criterio de Drucker-Prager para modelizar al material almacenado en silos cilíndricos con tolvas y paredes rígidas. Se implementan modelos de análisis para condiciones estáticas y para condiciones dinámicas, capaces de simular el comportamiento del material granular almacenado en silos, y la influencia del tipo de pared y la geométrica del silo, de la misma forma que los parámetros asociados al material granular almacenado.

La influencia de los distintos parámetros de diseño es analizada en ambos casos, y de allí surgirá el criterio para la determinación de las presiones ejercidas por el material sobre las paredes del silo, en forma de flujo de masa y flujo embudo; distribuciones observadas en pruebas experimentales de varios autores.

Estos modelos tienen en cuenta el fenómeno de *dilatancia* y el efecto de *Poisson*, que ejercen gran influencia en las presiones laterales. El fenómeno de *dilatancia* se manifiesta en

el proceso de la descarga mientras que el *efecto de Poisson* lo hace tanto durante el proceso de la descarga como en el estado estático de material en reposo.

A pesar de la gran influencia que estos dos parámetros tienen sobre las presiones horizontales en silos, no son tomados en cuenta en los textos corrientes.

### 3 PLANTEO DEL MODELO GLOBAL

El análisis de silos de granos mediante modelos de elementos finitos usando el criterio de Drucker-Prager ha sido abordado por varios investigadores como Manbeck y Nelson, (1975); Mahmoud, (1975); Jofriet et al., (1977); Maeda e Ishiyaki, (1979); pero en esos tiempos, los programas no eran lo suficientemente potentes y las computadoras limitaban el alcance de los modelos de elementos finitos, esto limitó avances en el tema.

El objetivo planteado en este trabajo consiste en determinar presiones de cálculo para el diseño de silos de granos de manera de obtener datos numéricos que se ajusten a la realidad de una manera sencilla. Para lograr dicho objetivo se adopta el modelo planteado por Ayuga et al., (2001) en dos dimensiones, tratado como un modelo axilsimétrico.

Se adoptan dos cuerpos para el modelado, uno correspondiente al *material ensilado* y el otro a la *pared del silo*. Para ello se toma medio silo según indica la Figura 5 en la cual el eje del silo es representado por restricciones sobre el eje y representado por los vínculos que aparecen en la dirección de la altura del silo, y la base con restricciones respectivamente en y en z. En el caso de silos con paredes de hormigón se asume que dicho cuerpo se comporta como un rígido pudiendo representar a la pared con restricciones en el eje y.

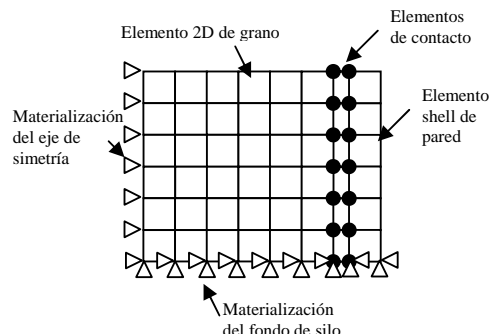


Figura 5: Esquema del tratamiento del modelo de elementos finitos

Para analizar la fricción generada entre grano y pared es necesario concebir un elemento de contacto que sea capaz de recrear la fuerza de fricción que se opone al movimiento gravitatorio del material ensilado. El comportamiento del material ensilado es analizado usando el criterio de plasticidad de Drucker-Prager (Ravenet, Tomo III, 1978, Ayuga et al., 2001), para considerar la expansión en materiales granulares, así como en suelos.

Para simplificar el análisis, la pared es analizada con un material lineal que puede ser acero u hormigón según el caso planteado.

Determinadas la geometría del modelo y las acciones que intervienen en el problema, se procede a efectuar el análisis a través del uso del software ALGOR<sup>®</sup>, (2004) definiendo el tipo de análisis en las condiciones de interés: a) *condición estática*, es decir el material ensilado actuando con su peso propio en un recinto cerrado, y b) *condición dinámica*, planteando la apertura de la boca del silo y la descarga del material a través del orificio de descarga de la tolva, mediante un pequeño desplazamiento impuesto al material ensilado en dicha sección.

### 3.1 Geometría de los modelos

Se definen dos tipos de silos de interés práctico, un silo cilíndrico con fondo plano *Silo I* y un silo cilíndrico con tolva, *Silo II*. La geometría de ambos silos puede observarse en la [Figura 6](#).

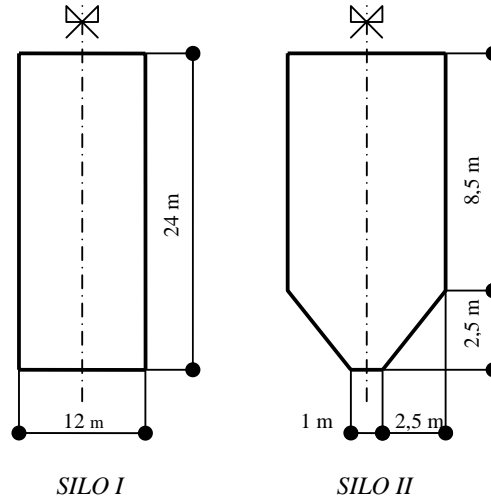


Figura 6: Geometría de : SILO I con fondo plano y SILO II con tolva

La geometría de ambos silos se escogió siguiendo como premisa las características más comunes que se encuentran en el mercado de silos para granos agrícolas.

### 3.2 Ley constitutiva material ensilado

Como se mencionó, se adopta el criterio de Drucker-Prager ([Dowling, 1993](#)) para modelizar el material ensilado debido a la analogía que presenta un material granular de las características del trigo en relación a la mecánica de suelos, tal cual lo expresan recientes contribuciones ([Guaita et al., 2003](#)).

Es escasa en la literatura información sobre los parámetros de estos materiales, el nivel de maduración del grano y el contenido de humedad.

Recientemente, se han usado métodos numéricos en el diseño de silos; los que han permitido representar el comportamiento de materiales dentro de un recipiente.

Es para ello necesario considerar propiedades adicionales para estos materiales como ser el módulo de elasticidad ( $E$ ), el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) y ángulo de dilatación ( $\psi$ ) utilizando los valores determinados por otros investigadores, o recurriendo a los métodos que permitan conocer sus magnitudes. Entre ellos el ensayo de corte directo permite determinar el ángulo de fricción interna y el ángulo de dilatación como también la cohesión aparente, en caso de ser necesario su valor. Se obtienen las envolventes de las tensiones de Mohr-Coulomb y se grafican las tensiones de corte versus tensiones normales. El ángulo de fricción interna es el ángulo formado entre cada envolvente y el plano horizontal, mientras que el coeficiente de cohesión aparente es determinado como la intersección entre la envolvente y el eje de ordenadas (normal stress = 0).

El ángulo de dilatación es obtenido una vez que las curvas de deformación fueron realizadas graficando deformaciones verticales versus desplazamientos horizontales:

El módulo de elasticidad para una muestra puede ser determinada a diferentes acortamientos verticales usando el ensayo del edómetro. El ensayo triaxial puede utilizarse para determinar el coeficiente de Poisson. El peso específico aparente, también llamado peso

específico de una muestra puede ser hallado mediante el uso de un molde de Próctor Estándar y una prensa de compresión. Las muestras son ensayadas para determinar la variación del peso específico con la presión.

El material considerado en los modelos es trigo Camacho, utilizado en investigaciones llevadas a cabo por otros autores. Los valores de los parámetros mencionados que se adoptan son los que aparecen en la **Tabla 1** (Guaita, et al., 2003, Moya et al., 2001) Los rangos de valores mostrados son los utilizados para analizar la influencia de estos parámetros en los resultados.

### 3.3 Mallado

Se usaron dos tipos de mallado automático entre los disponibles en el SUPERDRAW<sup>®</sup>: 4 points Automatic Mesh y Two-Dimensional Mesh Generation. El primero consiste en seleccionar cuatro puntos en un orden dado suministrando algunos datos como el número de divisiones en los sentidos de los ejes coordenados. El segundo sólo requiere la cantidad de elementos o la dimensión de los lados y si se opta por el elemento cuadrilátero o triangular. Los resultados de ambos mallados son mostrados en la **Figura 7**.

Parámetros del material	Rango de valores analizados	Valores obtenidos en laboratorio
Módulo de elasticidad del grano almacenados $E$ , [kPa]	5000	5000
Peso específico del grano $\rho$ , [kNm <sup>-3</sup> ]	7-9	9
Coefficiente de Poisson del grano $\nu$	0.2-0.4	0.3
Ángulo de fricción interna $\phi$ , [°]	22-30	22
Ángulo de fricción entre el grano y la pared $\mu$ , [°]	14.03	14.03
Ángulo de dilatación $\varphi$ , [°]	0-19	2.5

Tabla 1: Parámetros que caracterizan al trigo Camacho

Los dos tipos de mallado que permiten (Ciancio et al., 2005) un análisis más eficiente para el tipo de condición que se este planteando. Por ejemplo, en la **Figura 7** el modelo mallado con 4 points Automatic Mesh fue utilizado para la condición estática del material ensilado mientras que la otra opción se utilizó en el modelo para una condición dinámica con flujo tipo embudo.

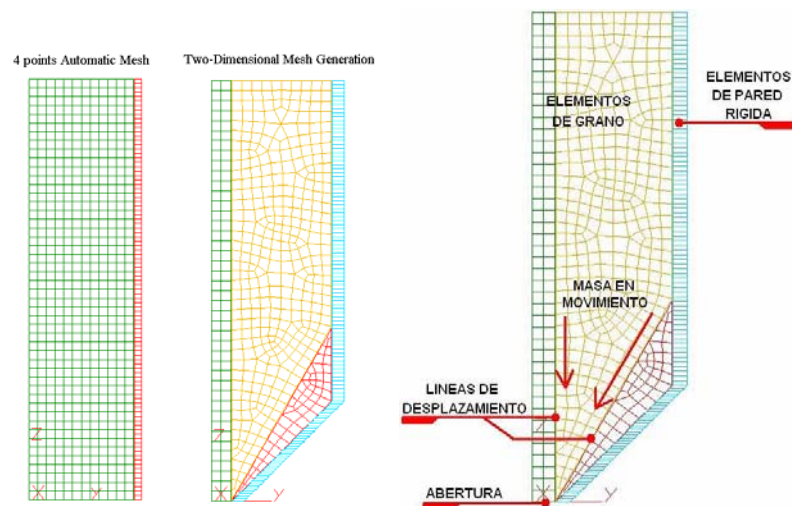


Figura 7: Tipos de mallados que ofrece el software ALGOR®

### 3.4 Modelización de la pared del silo

El tipo de elemento utilizado es el 2D (Zienkewicz, 1982) para análisis axilsimétrico con el software ALGOR®. Este software no permite utilizar elementos tipo Shell para el tipo de análisis axilsimétrico para espesores muy finos (por ejemplo, paredes de acero), dado que hay que generar un mallado con relación ancho-alto muy elevada provocando resultados erróneos en el análisis (ALGOR®, 2004). Por esta razón para este análisis no se tuvo en cuenta el cálculo de paredes de chapa metálica.

Cuando se analizan paredes de hormigón de espesores mayores a 0,20 m de espesor para el *Silo I* se asume que la pared se comporta como un elemento rígido. Es decir, la deformación del elemento pared no absorbe la mayor parte de la energía de deformación haciendo que el material ensilado sea quien tome la mayor parte de la energía y por lo tanto las presiones horizontales sean mayores para una pared rígida que para una pared elástica. Muchas de las teorías tradicionales no contemplan el efecto de la pared en el cálculo de las presiones.

En recientes contribuciones Ayuga et. al., comprobaron el comportamiento rígido de las paredes de hormigón. En nuestro caso, el contacto de superficie a superficie para la simulación de la pared puede efectuarse utilizando elementos 2D.

## 4 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL SILO

### 4.1 Condición estática

Con el objetivo de analizar la influencia de los parámetros principales sobre el comportamiento estructural del silo se considera en primer lugar en una condición estática, es decir con el grano en reposo. Los parámetros analizados son: módulo de Young, coeficiente de Poisson, ángulo de fricción interna, ángulo de dilatancia, ángulo de fricción entre las paredes y el material. También se procede al análisis de la influencia que ejercen las magnitudes de los parámetros, espesor de paredes y las diferentes posibilidades de unión entre las mallas de silo y tolva.

Es conveniente aclarar que las teorías tradicionales y las normas internacionales solo consideran el ángulo de fricción interna y el ángulo de fricción con las paredes y el material.



Cuando se llena un silo el material se va asentando desde el fondo hasta el nivel máximo con un determinado gradiente de densidad decreciente en ese sentido. Esto explica, que la densidad no sigue una función constante. De todas formas, como una aproximación en el cálculo ingenieril, se plantea que la diferencia en considerar una densidad constante en toda la masa no genera mayores desvíos.

Los parámetros para el análisis son bastante variados pero para los propósitos de comparación y validación fueron escogidas las presiones horizontales y verticales en las paredes y su relación  $k$ . Los resultados obtenidos permiten establecer fuerzas horizontales y verticales, y la detección de zonas de comportamiento elástico y plástico del material ensilado.

## 4.2 Interacción grano-pared

Para poder resolver el problema de la fricción entre grano-pared o grano-grano se deben crear contactos de superficie a superficie. Para que estos contactos funcionen correctamente debe existir una separación física entre ambas superficies no tan grandes como para que no exista interacción y no tan próxima como para que ambos materiales se fusionen. Se plantea el análisis en un mismo modelo para distintas separaciones de superficies midiendo la presión horizontal en cada caso. Estas curvas se representan en la [Figura 8](#).

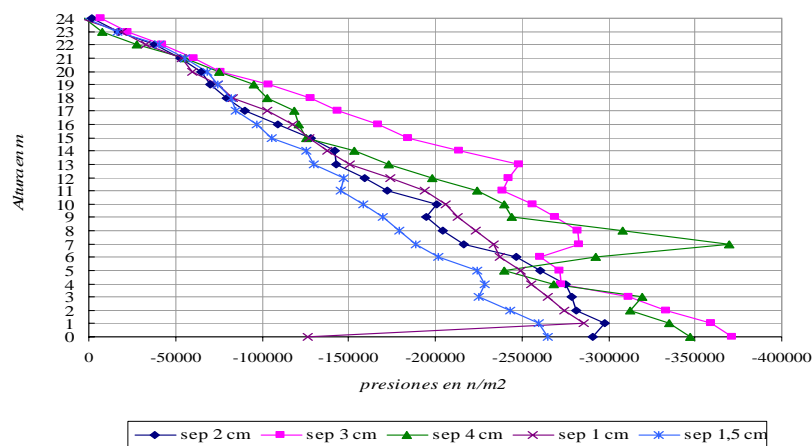


Figura 8: Comparación de la presión horizontal en relación a la separación física entre pared y grano en el modelo implementado mediante ALGOR<sup>®</sup>

Para todos los modelos el rango de tiempo en el que se alcanzaron las máximas presiones horizontales esta dado por 0,7-0,9 seg a partir del inicio de la simulación. Se adopta como estándar una separación de 1,5 cm por resultar la curva que se ajusta sensiblemente a las teorías tradicionales y a los resultados del la investigación llevada a cabo por [Guaita et al, \(2003\)](#).

## 4.3 Condición dinámica

Tradicionalmente, el incremento en las presiones han sido atribuidas a un cambio en el estado de equilibrio del material granular. Se creía que el silo lleno trabajando en una condición estática respondería de acuerdo con el estado de equilibrio activo de Rankine y que

una vez que el grano comenzara a moverse pasaría a un estado de equilibrio pasivo. Algunos autores, como Rotter, y Aguado, (1997) modificaron esta simplificación y tomaron en cuenta la fricción entre el grano y la pared y también el flujo durante la descarga.

Más recientemente, Zhang et al., (1994), atribuyeron estas sobrepresiones al fenómeno de la *dilatancia*, lo cual es considerado como la causa de que el grano no se desplaza paralelamente al plano de rotura y provoca un incremento en el volumen y como consecuencia, un incremento en las presiones laterales.

Por otro lado, Jenike y Johanson (1968) atribuyeron las sobrepresiones al tipo de flujo durante la descarga. Las mediciones de tensiones ligadas demuestran que en el caso de flujo de masa los picos de presión producidos en la unión silo-tolva ocurren de la misma manera que en el caso silo estático. Sin embargo, en el caso del flujo embudo, los picos de presiones son producidos exactamente donde comienza el embudo paralelamente al flujo del grano. Ninguna variación se observó por debajo de este punto debido a que el grano contra las paredes se mantiene en reposo en esta área. En esta línea de razonamiento no se ha llevado a cabo ningún método para predecir sobrepresiones durante la descarga.

Los modelos implementados en este trabajo se basan en aquellos creados previamente para material almacenado estáticamente incorporando una serie de modificaciones derivadas de las tres hipótesis básicas siguientes:

(1) *Presiones máximas*

Las presiones máximas según Drescher, (1978) y Sugita, (1972) son producidas durante los momentos iniciales de descarga. La descarga es simulada en el presente análisis por un pequeño desplazamiento del grano dentro del silo. Al mismo tiempo, una superficie cilíndrica vertical de elementos de contacto que materializa la fricción grano - grano fue incluida en el modelo para simular el movimiento del material granular dentro del silo (Figura 9).

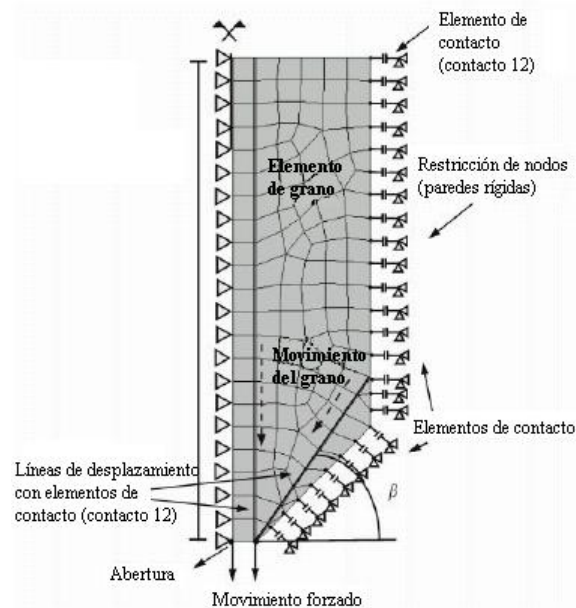


Figura 9: Esquema del modelo de descarga;  $\beta$ : ángulo del plano de corte

(2) *La existencia de diferentes tipos de descarga, flujo masa y flujo embudo*

Esto implica que las líneas de rotura dentro del material granular pueden tomar diferentes direcciones. Por ello, en los modelos implementados para el flujo masa, el material desciende

creando fricción contra las paredes del silo. En los modelos para el flujo embudo, aparece una nueva línea de rotura que forma un ángulo  $\beta$ , con el eje horizontal (Figura 9), y el cual, debido al carácter axilsimétrico del modelo, produce un embudo de material almacenado.

### (3) *El efecto de la dilatación*

Este es simulado por medio de los cambios en la dirección de la fricción en el elemento de contacto. Es asumido que el material es separado siguiendo la línea de rotura y por ello provocando un incremento de las presiones laterales.

Dependiendo de las características geométricas del silo y del tipo de material almacenado, es producido tanto el flujo de masa como el de embudo. La incertidumbre acerca de la posición de la línea de deslizamiento en el último caso es debido a la escasez de investigaciones en la temática como lo manifiestan Rong, (1994); Rotter, y Jofriet, (1997). Por este método el comportamiento del material es simulado grano por grano y, en consecuencia, no es necesario forzar su movimiento.

Debido a esta incertidumbre acerca de la posición de la línea de deslizamiento, se resolvió adoptar diferentes ángulos de inclinación  $\beta$  y obtener una curva de las máximas presiones alcanzadas para distintas alturas en las paredes del silo.

## **5 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL CASO ESTÁTICO**

Seguidamente se analizan las variaciones de las presiones horizontales en función de los parámetros de los materiales y se hace una comparación con las observaciones acotadas por Ayuga et al., (2001).

### **5.1 Valores de las presiones horizontales manteniendo los parámetros de los materiales obtenidos en laboratorio**

En la Figura 10 se pueden apreciar las presiones horizontales en silos cilíndricos con fondo plano (SILO I) determinadas mediante teorías tradicionales, y mediante el análisis del modelo implementado en el software ALGOR<sup>®</sup>. Se puede observar que la curva dada por Ayuga et al., (2001) es más aplanada que las demás advirtiéndose menores valores de las presiones respecto a las otras curvas.

La curva obtenida con el modelo implementado en el software ALGOR<sup>®</sup> tiene valores intermedios entre las teóricas de Janssen y los valores de presiones calculadas aplicando el Eurocódigo 1, Parte 4 (Eurocódigo 1, Parte 4, 1995).

Se deduce que todas las curvas siguen una tendencia similar y las diferencias porcentuales en sus valores máximos no superan el 19%.

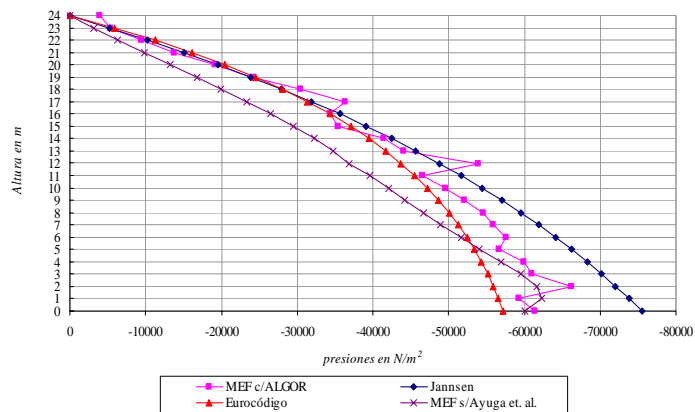


Figura 10: Diagramas de presiones horizontales sobre las paredes de un silo cilíndrico para distintos métodos de cálculo

## 5.2 Análisis de la influencia del Módulo de Young del material ensilado en los valores de las presiones horizontales

Según el análisis del modelo (*SIL0 I*) las presiones horizontales aumentan con los menores valores del módulo de Young. A su vez el incremento de las presiones al variar el módulo de Young parece gradual y no corresponde a una variación lineal. Este parámetro afecta considerablemente las presiones horizontales, y es de un 28%, para variaciones de menores a un 10% con relación al parámetro estándar (100% según [Figura 11](#)), por lo cual determinar un valor preciso de este parámetro es importante en el diseño de silos.

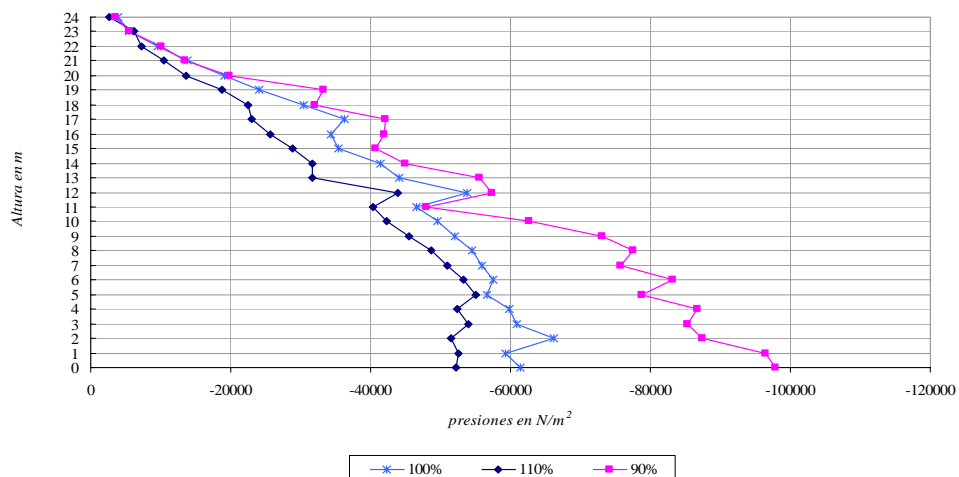


Figura 11: Comparación de la presión horizontal haciendo variar porcentualmente el módulo de elasticidad para el modelo del material según el criterio de Drucker-Prager

### 5.3 Análisis de la influencia del coeficiente de Poisson del material ensilado en los valores de las presiones horizontales

Este es un parámetro clave en la determinación de la presión de los granos en una posición estática. Las variaciones de este coeficiente entre 0,2 y 0,4 producen un 115% de cambios en las presiones máximas (Figura 12). Según Ayuga et al. (2001) ese parámetro afecta las presiones en un 90%.

El coeficiente de Poisson tiene un efecto notable en el comportamiento del material notándose un cambio en la forma de la curva para un valor igual a 0,20, sobre todo en los niveles más bajos del silo.

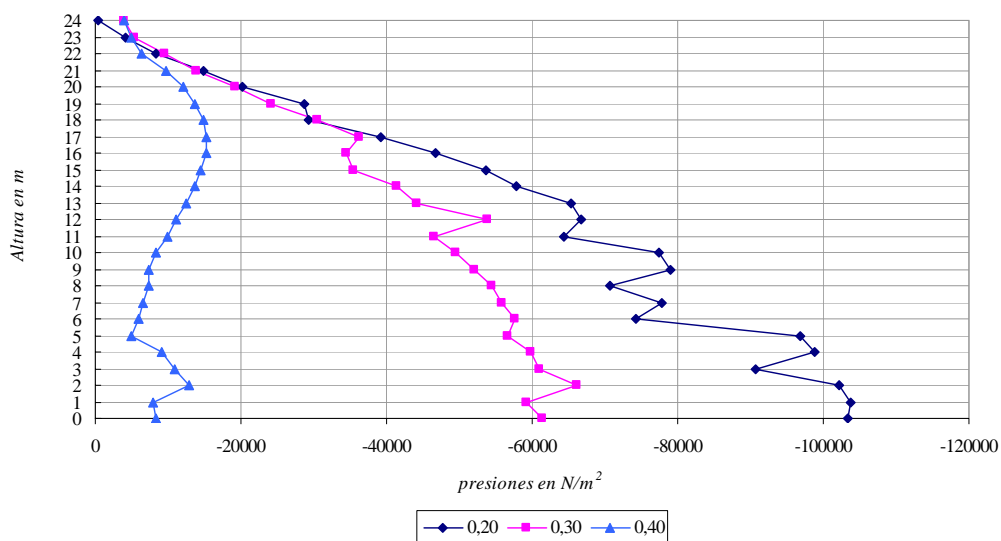


Figura 12: Presión horizontal en un silo cilíndrico: comparación de las presiones en función del coeficiente de Poisson

### 5.4 Análisis de la influencia del ángulo de fricción interna del material ensilado en los valores de las presiones horizontales

Este es otro de los parámetros requeridos para la implementación del modelo numérico-computacional cuando se adopta la ley constitutiva de Drucker-Prager, y el que frecuentemente se emplea en las teorías tradicionales y en las normas internacionales.

Para valores bajos de este parámetro la presión horizontal, según el análisis de los resultados obtenidos, es mayor ya que se llega antes a la plastificación, lo cual se justifica con las fórmulas para obtener  $a$  y  $k$ , parámetros del criterio de Drucker-Prager (Figura 13).



Se puede distinguir en la [Figura 14](#) un severo incremento de las presiones horizontales sobre la tolva durante la descarga en relación a la presión horizontal para el material ensilado bajo reposo.

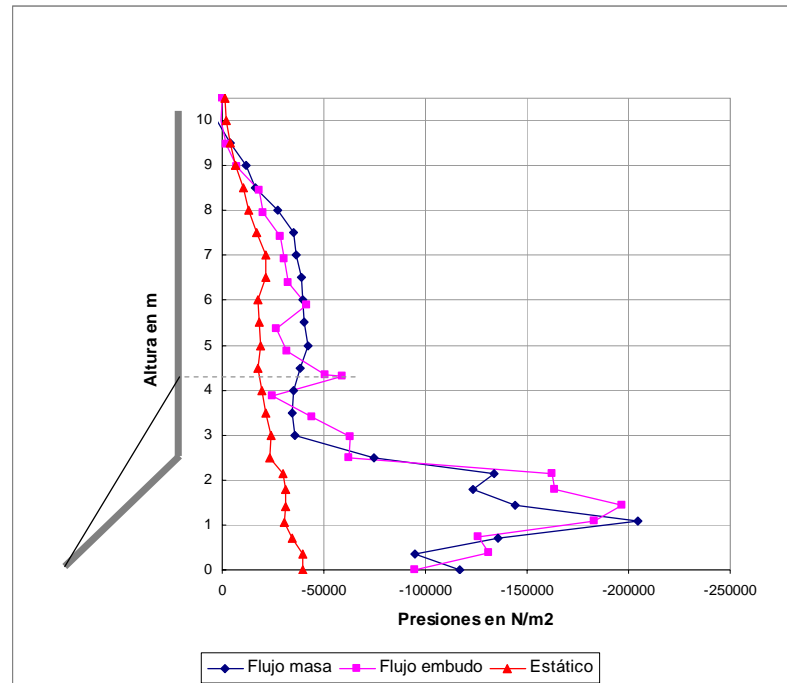


Figura 14: Comparación de flujos dinámicos con la condición estática para un silo con tolva

## 6.2 Influencia del ángulo del plano de corte $\beta$

El ángulo del plano de corte es una variable que no se puede determinar con este modelo, por lo que, al igual que en el trabajo de Ayuga et al., (2003) se plantea dar distintos ángulos a dicho plano y graficar las presiones horizontales en función de los mismos ([Figura 15](#)).

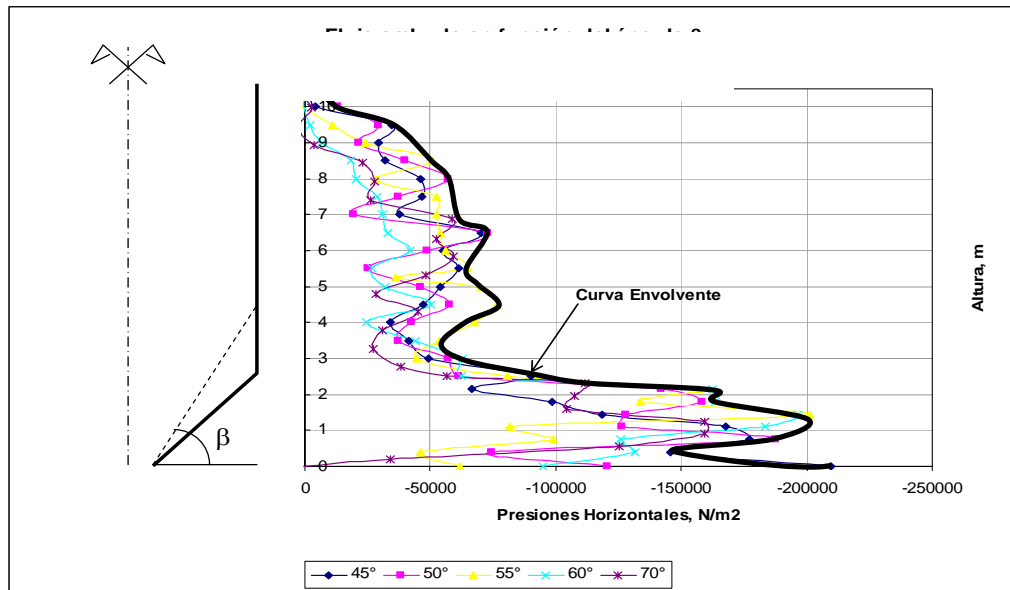


Figura 15: Flujo embudo en función del ángulo  $\beta$  que forma el plano de corte con la horizontal

Como conclusión se obtienen curvas con un pico máximo en la intersección del plano de corte con la pared. Como resultado de estos modelos se puede generar una curva envolvente de máximas presiones que puede ser utilizado para el diseño de silos con descarga tipo flujo embudo.

### 6.3 Influencia del ángulo de dilatancia en las presiones durante el proceso de descarga

El ángulo de dilatancia ha sido representado en estos modelos como el ángulo de fricción que existe en el plano de corte simulado por medio de contactos de superficie a superficie. Para la descarga en flujo embudo (Figura 16) se observa una gran distorsión del modelo aunque en el punto intersección entre la pared y el plano de corte sigue existiendo el incremento de presiones. Este se acrecienta a medida que aumenta el ángulo de dilatancia, existiendo una diferencia porcentual de un 65% entre un ángulo de dilatancia de  $19^\circ$  a otro de  $25^\circ$ . Por lo tanto, este parámetro es muy influyente en el diseño de silos para descargas tipo embudo. Para descargas en masa (Figura 17) se observa un decremento de aproximadamente un 25% en las presiones para un ángulo de dilatancia de  $25^\circ$  con respecto a un ángulo de  $19^\circ$ .



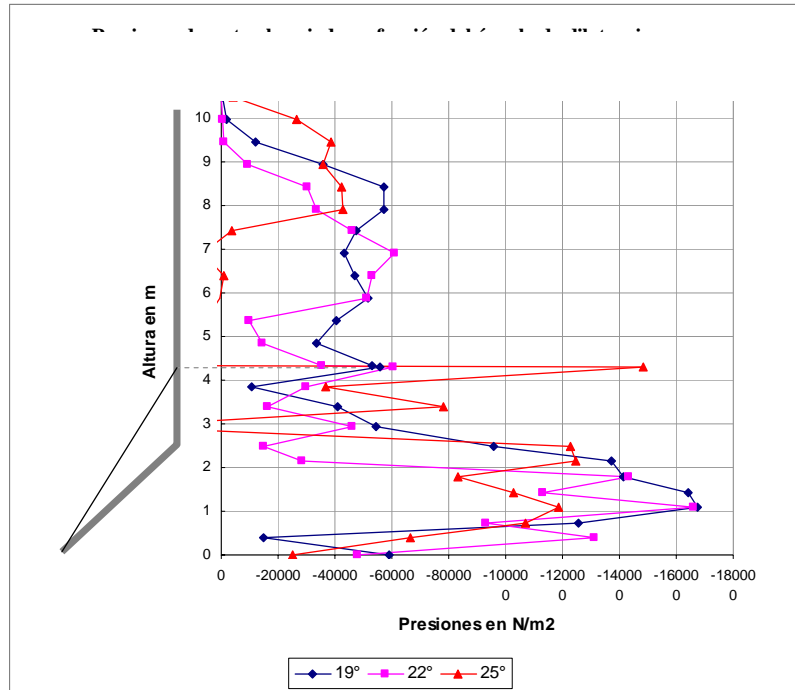


Figura 16: Presiones durante el vaciado en función del ángulo de dilatancia para un flujo tipo embudo

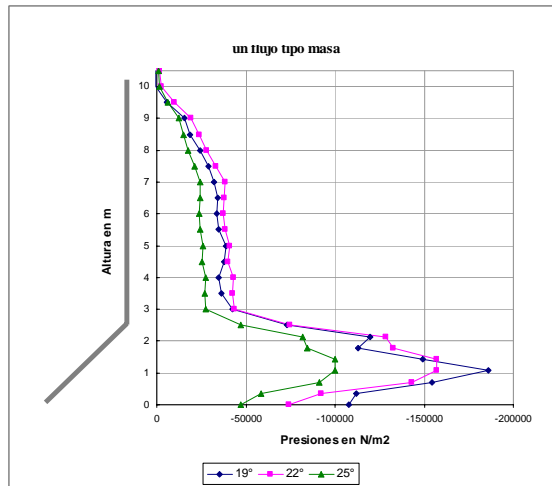


Figura 17: Presiones durante el vaciado en función del ángulo de dilatancia para un flujo tipo masa

## 7 VARIACIÓN DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS QUE AFECTAN AL MODELO ESTÁTICO

Al variar los parámetros de los materiales que presentan una mayor incidencia sobre las presiones en los modelos estáticos como el coeficiente de Poisson y el módulo de Young (Figuras 18 a 20), se puede observar su influencia sobre los modelos dinámicos.

De ello resultó que los parámetros que influyen ampliamente en los modelos estáticos, no lo hacen de la misma manera en los modelos dinámicos para ambos flujos.

La mayor variación se da en las presiones contra la tolva aunque esto no constituya una regla general. De todas formas, lo más importante de este análisis radica en que las variaciones en los parámetros de los materiales no afectan de la misma forma las presiones durante la descarga que durante el llenado, siendo menor la afectación de los parámetros principales durante el proceso de descarga.

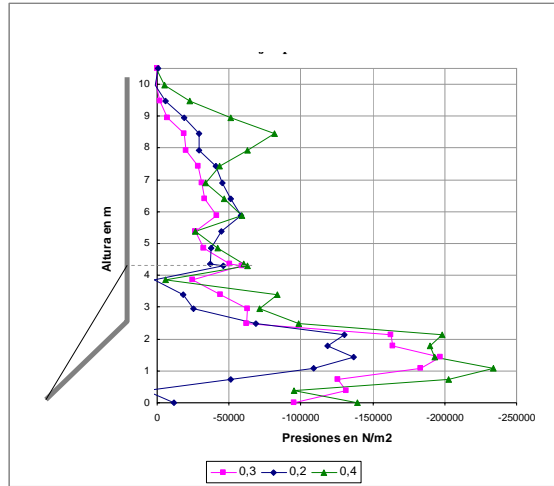


Figura 18: Presiones durante el vaciado en función del coeficiente de Poisson para un flujo tipo embudo

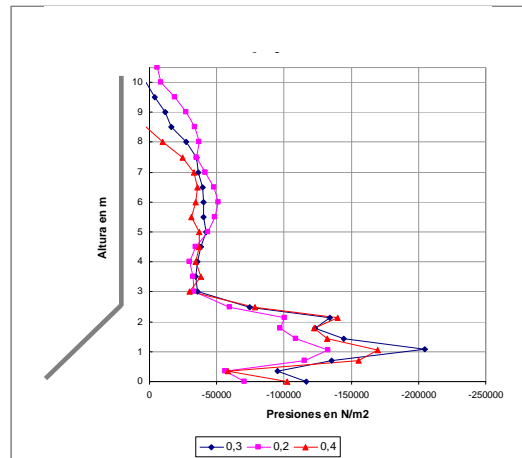


Figura 19: Presiones durante el vaciado en función del coeficiente de Poisson para un flujo tipo masa

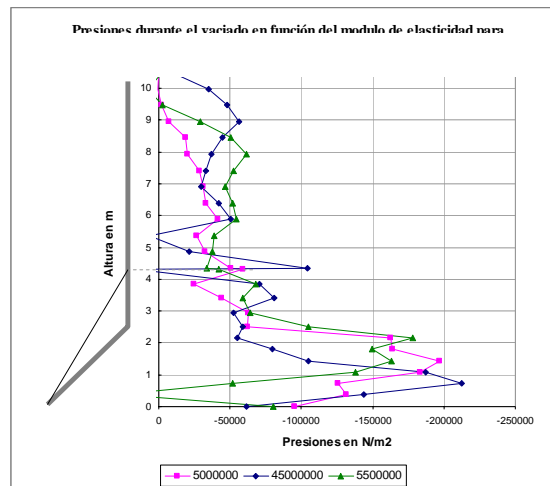


Figura 20: Presiones durante el vaciado en función del módulo de elasticidad para un flujo tipo embudo

## 8 CONSIDERACIONES FINALES

El presente trabajo es continuidad de anteriores desarrollos sobre silos, donde el objetivo fundamental se focaliza en la instrumentación de modelos numérico- computacionales para la cuantificación de las presiones de diseño, debidas al material ensilado, con aplicaciones en materiales granulares.

El desarrollo y disponibilidad de software en el mercado para la implementación de los modelos numéricos, permite simular condiciones y escenarios que se adecuan al fenómeno real, fundamentalmente en lo referente al proceso de la descarga del material ensilado, donde se generan sobrepresiones significativas.

Una evaluación incorrecta de las presiones durante el proceso de descarga del material ensilado representa un alto porcentaje de fallas en silos con el consecuente perjuicio económico en el proceso productivo, de allí la importancia de realizar el diseño de estas tipologías estructurales con el adecuado margen de seguridad.

La etapa de calibración de los modelos requirió la disponibilidad de parámetros relacionados con las propiedades del material ensilado, como el módulo de Young, el coeficiente de Poisson, y el ángulo de dilatación. Esto requiere disponer de estos valores para diferentes materiales obtenidos de la aplicación de técnicas de laboratorio normalizadas. Se presentan dificultades para acceder a base de datos confiables que contengan estos valores necesarios para la formulación constitutiva según Drucker Prager para el material granular del silo.

En caso de asumir ciertos valores, los casos analizados permiten notar la sensibilidad que presentan los resultados de presiones de diseño frente a la variación de estos parámetros del material.

En relación a la modelización de la interacción grano-pared, mediante el uso de elementos de contacto y del plano de corte durante la descarga, a partir de la introducción del concepto de ángulo de dilatación, se pudo cuantificar la influencia de las variables durante el fenómeno de la descarga del silo.

Se continúa con estos estudios para ampliar el ámbito de las aplicaciones a otros casos de interés práctico de diseño de silos, siendo importante la validación de estos resultados por la vía experimental. Razón por la cual es necesario y pertinente instrumentar una metodología

de mediciones experimentales, y por ende la necesidad de interactuar con empresas que se consideren actores en este escenario.

## REFERENCIAS

- Algor Software Package, V.15, 2004 y sus Manuales.
- Ayuga, F., Guaita, M. y Aguado, Static and dynamic silo loads using finite element models. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78(3):299-308, 2001.
- Ciancio, P., Ercoli, N. y Berardo, C., *Modelización aplicada a la Ingeniería*, Título del capítulo: *Modelización de estructuras laminares cilíndricas. Aplicación práctica al caso de silos. Parte I: Silos horizontales*, 43-69. Editorial UTN Bs. As., 2005.
- Código ACI 313-97, Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for storing Granular materials.
- Dowling, N., *Mechanical behavior of materials. Engineering Methods for Deformations, Fracture, and Fatigue*. Prentice Hall, 1993.
- Eurocódigo 1, Parte 4, ENV 1991-4, 1995.
- Guaita, M., Couto, A. y Ayuga F., Numerical simulation of wall pressure during discharge of granular material from cylindrical silos with eccentric hoppers. *Biosystems Engineering*, 85(1):101-109, 2003.
- Kachru; Gupta, y Alam, *Phisico Chemical Constituents and Engineering Properties*, Cientific Publisher, India, 1994.
- Moya, M., Ayuga, F., Guaita, M. y Aguado, P., Mechanical Properties of Granular agricultural Materials. *Transactions of the ASAE*, 45(5):1569-1577, 2001.
- Ravenet Catalan, Juan, *SILOS. Deformaciones-Fallas-Explosiones-Prevención de Accidentes. Tomo II*. Editores Técnicos Asociados, 1978.
- Ravenet Catalan, Juan, *SILOS. Teoría e investigación. Tomo I*. Editores Técnicos Asociados, 1978.
- Ravenet Catalan, Juan, *SILOS. Tomo III*. Editores Técnicos Asociados, 1978.
- Zienkiewicz, O. C., *El método de los elementos finitos*. Editorial Reverté, Barcelona, 1982.