

EVOLUCIÓN DE LOS PARÁMETROS CONSTITUTIVOS AL DESARROLLARSE EL BORDE DEL CANAL DE FLUJO EN UN MATERIAL GRANULAR

Adriana Pernich^a, Fernando G. Flores^b

^a*Departamento Construcciones, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, 3800
Neuquén, Argentina, adriana.pernich@fain.uncoma.edu.ar, <http://www.uncoma.edu.ar>*

^b*Departamento de Estructuras, Universidad Nacional de Córdoba, Casilla de Correo 916, 5000
Córdoba, Argentina, fflores@efn.uncor.edu, <http://www.efn.unc.edu>*

Palabras Clave: material granular, vaciado de silos, canal de flujo

Resumen. Durante el vaciado de una tolva o silo se definen dentro del material granular los bordes del canal de flujo. Dependiendo de factores geométricos del depósito, de la fricción que se desarrolla entre el material granular almacenado y la pared y las propiedades mecánicas del grano, la definición del canal de flujo puede iniciarse al principio de la descarga o ya avanzada la misma. En este trabajo se busca cual de los invariantes o parámetros utilizados en el modelo constitutivo define el borde del canal. Los resultados se utilizarán para implementar mejoras en las simulaciones de vaciado con el fin de mejorar la predicción de las presiones que actúan sobre la estructura afectando su estabilidad.

1 INTRODUCTION

Los silos y tolvas son estructuras utilizadas por muchas industrias por ser una manera eficiente de almacenar gran cantidad de material, ya sea para su procesamiento y/o distribución. Las formas típicas de los silos son cilindro y tolva cónica o una estructura de base rectangular y tolva en cuña, tanto en uno como otro caso la altura del depósito es dos o tres veces el diámetro o ancho de la misma. Las paredes de éstos depósitos están sometidas a las acciones atmosféricas (viento, lluvia, granizo) y a la acción que el material almacenado (presiones de llenado y vaciado). En lo referente a la seguridad de este tipo de estructuras, las mismas son las que han registrado mayor número de fallas respecto de cualquier otra estructura de almacenamiento (Rotter, 1998), siendo una de las causas principales de estas fallas las presiones que ejerce el material almacenado sobre las paredes y su variación durante la operación del silo.

En general se hace la distinción entre el flujo másico y el flujo canalizado o en chimenea, pero las diferencias entre ambos tienen menor efecto comparadas con el problema de generarse un canal de flujo casi vertical contra la pared del silo durante la descarga excéntrica, la cual ha producido fallas desastrosas (Chen et al., 2007). Tanto el flujo canalizado como la formación del canal de flujo contra la pared del silo tienen en común la manera en la cual se define el borde del canal de flujo en el material granular, el cual es influenciado por la manera en que fue llenado el silo, la fricción entre el grano y la pared y por la compacidad del material almacenado entre otras.

Durante la descarga, dentro del canal de flujo, el material se mueve a alta velocidad comparado con las zonas circundantes y tiene un muy bajo valor de presión. Dentro del material que permanece casi sin moverse se produce un pico en la distribución de presión. En el límite entre ambos estados del grano se produce una banda de corte, la cual define el borde del canal de flujo. Estas características han sido observadas en ensayos realizados en silos de tamaño real donde se valúa la distribución de las presiones en la pared del silo a partir de las mediciones de las deformaciones en la pared metálicas (Chen et al., 2007). Con el fin de determinar la posición del borde del canal de flujo en varios trabajos experimentales se utiliza la técnica de medición del tiempo de residencia utilizando trazadores de radiofrecuencia (Rotter et al., 1993), (Chen et al., 1994) y (Chen et al., 1995). En este trabajo se comparan los resultados obtenidos de las simulaciones con la información de los trabajos experimentales.

2 MODELO CONSTITUTIVO

El modelo constitutivo elasto-plástico considerado en este trabajo considera el aumento de la rigidez y la resistencia al corte del grano al aumentar la presión, la compresibilidad volumétrica y que en el estado crítico se produzcan deformaciones de corte mientras permanecen constantes el volumen y el valor de la presión.

La ley elástica considera una relación de Poisson constante mientras el módulo elástico tangente sigue una ley de potencia función de la presión Ec. (1). La superficie de fluencia esta compuesta por dos superficies Ec. (2) una es el modelo de Drucker Prager, para tener en cuenta la fluencia por corte en estado crítico, la cual permanece fija en el espacio de tensiones, y la otra el modelo Cam Clay modificado para considerar la fluencia por consolidación. Ésta última tiene una regla de flujo asociada y una ley de endurecimiento empírica función de la deformación volumétrica plástica. El modelo de Drucker Prager tiene una regla de flujo no asociada, que establece que en esa condición no se producen deformaciones volumétricas

plásticas. Este modelo fue utilizado para simular numéricamente el llenado y vaciado de tolvas y silos (Pernich, A. y Flores, F.G. 2009) y (Pernich, A. 2010). Una tratamiento detallado del modelo constitutivo utilizado puede encontrarse en (Pernich, A. 2010).

$$E_t = k_u p_a \left(\frac{p}{p_a} \right)^n \quad \nu = cte \quad (1)$$

$$f_1 = \frac{q}{\sqrt{3}} - 3\alpha p - K_p, \quad (2)$$

$$f_2 = q^2 - M^2 p(p_o - p)$$

siendo p y q los invariantes definidos en Ec. (3):

$$p = \frac{1}{3} \sigma_{ii} \quad q = \sqrt{\frac{3}{2}} \sqrt{\mathbf{S} : \mathbf{S}} \quad (3)$$

donde k_u, n, a, K_p, M y p_o son los parámetros de caracterización del material, p_a es la presión atmosférica y ν la relación de Poisson. Todos los parámetros de caracterización se obtienen a partir de ensayos estándar dentro de la mecánica de suelos. Con este modelo es posible que se generen deformaciones plásticas volumétricas D^p y desviadoras e^p a partir de éstas últimas se valúa la deformación plástica efectiva $e_p = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\mathbf{e}^p : \mathbf{e}^p}$. La variable termodinámica interna e_p no fue incluida en el desarrollo original del modelo constitutivo utilizada en (Pernich, A. y Flores, F.G. 2009).

El modelo utilizado en el presente trabajo ha sido propuesto a partir de modelos que han surgido dentro de la mecánica de suelos, donde los valores de tensiones de interés están en el rango de valores medios o altos mientras que en los silos y tolvas a lo sumo alcanzan valores medios siendo en general bajos comparados con los rangos de tensiones de interés de la mecánica de suelos. El modelo contempla la posibilidad de que se pierda el contacto entre partículas al producirse la expansión volumétrica del grano durante el vaciado.

El fenómeno de formación del borde del canal de flujo comparte similitudes con el modelo constitutivo propuesto por (Gajo et. al, 2004) propuesto por los autores con el objeto de modelar la formación de bandas de corte en materiales granulares. Los citados autores detectaron que en el caso de arenas en estado suelto el fenómeno de inestabilidad en el material produce oscilaciones en las tensiones y tiene similitudes que hacen acordar a la plasticidad ideal.

El fenómeno descrito por (Gajo et. al, 2004) similar al fenómeno que ocurre al inicio del vaciado de un silo que presenta flujo en chimenea. En el silo, al inicio del vaciado, se presentan oscilaciones en las tensiones provocadas por la formación del canal de flujo. Dentro del canal el material se descomprime y como consecuencia pierde rigidez, se expande volumétricamente y se descarga elásticamente, hasta alcanzar el denominado *estado disgregado* que corresponde a la pérdida de contacto entre los granos. Fuera del canal de flujo el material está comprimido (material con movimiento nulo o casi nulo) y posee una rigidez que sigue la ley de potencia de la presión a la cual está sometido (Ec. 1). En el borde se debe satisfacer por una parte equilibrio entre el material que se está moviendo y el que permanece detenido; por otra parte la cinemática indica que en el material inmediatamente interior al canal se produce una importante deformación de corte simultáneamente a la expansión volumétrica y a la pérdida de rigidez.

Se busca determinar cual o cuales de los parámetros constitutivos ahora disponibles es el

mejor indicador de la presencia del borde del canal de flujo. El objetivo es por una parte contar con una variable no cinemática que indique la posición del borde del canal de flujo. Adicionalmente podría ser utilizado algún criterio en función de ella o ellas para definir una superficie de contacto grano – grano que permita simular la descarga completa evitando las distorsiones excesivas de la malla que provocan el fin de la simulación ($\det(\mathbf{J}) \leq 0$).

Desde el punto de vista de la estructura del contenedor, la posición del borde del canal de flujo permite conocer la zona donde se produce una importante variación en la distribución de la presión normal a la pared que provoca importantes momentos flectores en la estructura. En contenedores metálicos estos momentos flectores localizados combinados con las tensiones de compresión a las que están sometidas las paredes han producido colapso por pandeo de estructuras de silos. Por ello es de importancia conocer la ubicación del borde del canal de flujo y su evolución durante la descarga. Una vez establecido el mejor indicador será posible incorporar modificaciones en el código que permitan conservar y seguir la evolución de los límites del canal de flujo y su interacción con la estructura.

3 CASO DE APLICACIÓN

Se utilizó un modelo simple de un contenedor cilíndrico con fondo plano en el cual está incorporada la compuerta para efectuar la descarga por gravedad del grano. Se utilizaron los valores de los parámetros constitutivos correspondientes a una arena de granulometría uniforme utilizados en (Pernich, A. y Flores, F.G. 2009). El material se incorporó en forma incremental, de la manera descrita en (Pernich, A. y Flores, F.G. 2009), hasta completar la altura de llenado, procedimiento indispensable para obtener las condiciones de tensiones y deformaciones en el material granular adecuadas.

La etapa de interés es el inicio del vaciado que comienza con la apertura de la compuerta, la cual se simula removiendo la condición de contacto mecánico entre el grano y la compuerta.

En la [Figura 1a](#) se presenta la malla utilizada a la cual se ha superpuesto la distribución de la presión p al finalizar el llenado y luego de un incremento de tiempo de iniciado el vaciado [Figura 1b](#). En la [Figura 1a](#) se observa una zona de alta presión en forma de domo sobre el fondo del contenedor inmediatamente sobre la compuerta, en la [Figura 1b](#) se observa un núcleo de baja presión inmediatamente por encima de la apertura de descarga y la disposición prácticamente vertical de las isobaras a partir del borde de la apertura y un núcleo de baja presión ubicado en la zona central del depósito. El cambio de posición de las isobaras podría ser un indicador de la presencia del canal de flujo. La descompresión y consecuente expansión volumétrica del grano dentro del canal de flujo es una de las características de esta forma de flujo.

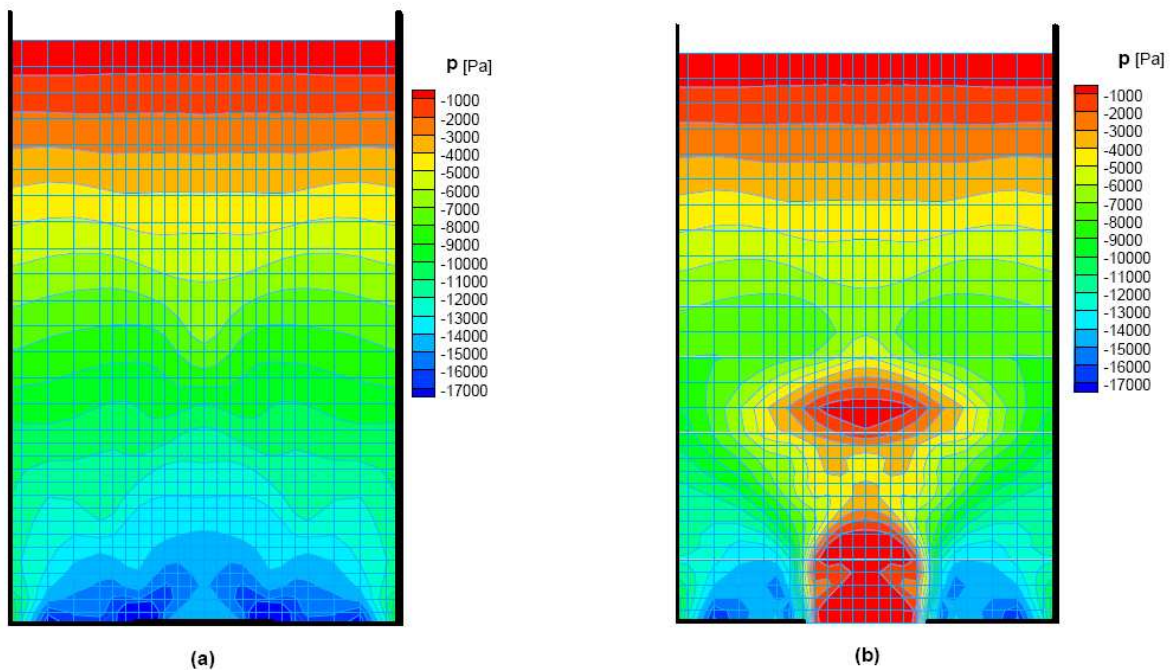


Figura 1: (a) distribución de presión al finalizar el llenado; (b) distribución de la presión inmediatamente iniciado el vaciado

Otra opción para realizar el análisis es la que se presenta en la Figura 2, donde se han graficado las distribuciones de desplazamiento vertical u_2 , la deformación plástica efectiva e_p y la presión p para puntos cuya coordenada $x_2 = 0.05\text{m}$ es constante. La elección de estas variables, entre otras disponibles, es la que se considera más interesante en función de los objetivos planteados. En la Figura 2 se incorporaron líneas verticales de trazos que conectan el valor máximo de la deformación volumétrica plástica y el eje X_1 . Teniendo en cuenta que la apertura de descarga corresponde a coordenada $x_2 = 0$ y coordenada $-0.25\text{m} \leq x_1 \leq 0.25\text{m}$ es de esperarse que el inicio del canal de flujo este posicionado en el borde de la apertura que coincide con la posición del valor máximo de e_p . Además el valor máximo de e_p se encuentra cercano a los puntos que registran un desplazamiento vertical muy pequeño en comparación con el desplazamiento de los puntos dentro del canal, inmediatamente por encima de la compuerta. La distribución de la presión presenta un fuerte gradiente y cambio de curvatura para el valor de la coordenada x_1 en la cual se produce la máxima deformación plástica efectiva, resultando ésta última el parámetro que con más claridad indica la posición probable del borde del canal de flujo. En la Figura 3 puede observarse un comportamiento análogo de las distribuciones de las tres variables que las observadas en la Figura 2 que se produce $x_2 = 0.10\text{m}$. Este patrón de comportamiento se observa en diferentes planos horizontales subsiguientes atenuándose hacia arriba. Al avanzar la descarga, la definición del canal de flujo continúa hacia arriba hasta alcanzar la superficie libre superior del material.

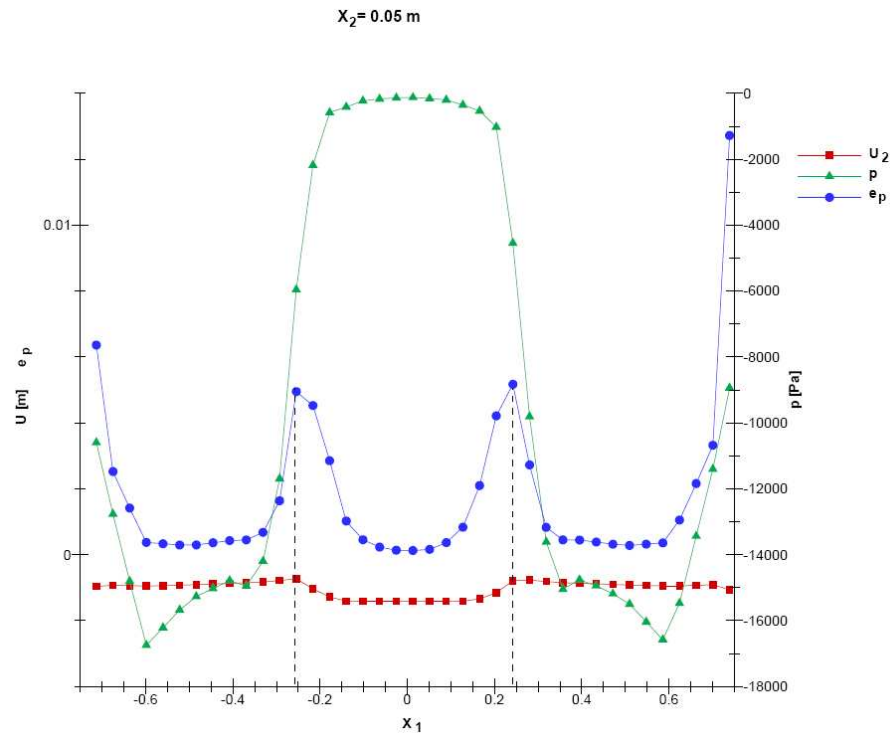


Figura 2: Distribución del desplazamiento vertical, la deformación plástica efectiva y de la presión para los puntos con coordenada $x_2 = 0.05 \text{ m}$ desde el fondo del depósito

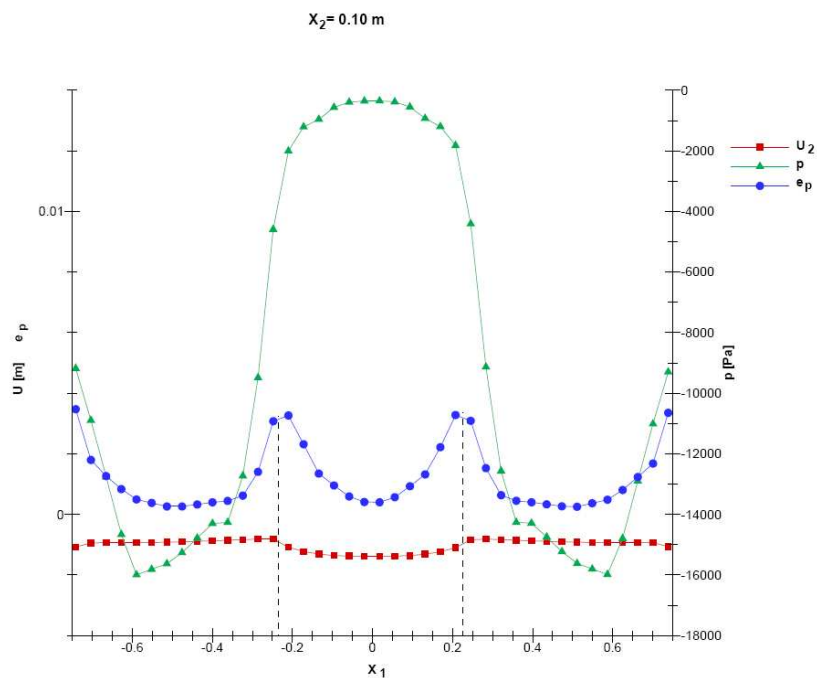


Figura 3: Distribución del desplazamiento vertical, la deformación plástica efectiva y de la presión para los puntos con coordenada $x_2 = 0.10 \text{ m}$ desde el fondo del depósito

En la [Figura 4a](#) se muestran superpuestas la malla original, la malla deformada y la distribución de presión y en la [Figura 4b](#) ambas mallas superpuestas junto con la distribución de la deformación plástica efectiva, en esta última puede apreciarse que la distorsión de los elementos inmediatamente dentro del canal coincide con los máximos valores de e_p , haciendo

a esta variable la mas apropiada para determinar la ubicación del borde del canal y seguir su evolución

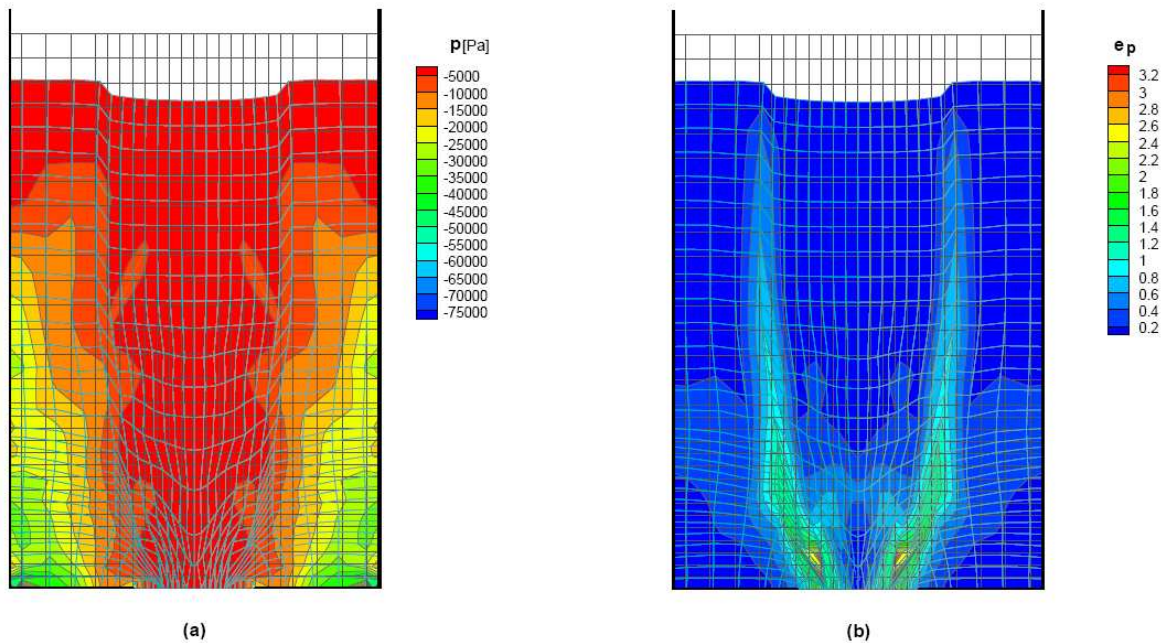


Figura 4: (a) distribución de la presión; (b) distribución de la deformación plástica efectiva

4 CONCLUSIONES

El análisis de las distribuciones en planos horizontales de la presión, el desplazamiento vertical y la deformación efectiva, ha permitido determinar que el mejor indicador de la probable posición del borde del canal de flujo es la deformación plástica efectiva, la cual presenta un máximo local. Estos gráficos también permiten cotejar la posición probable del borde con la que puede inferirse de la distribución de los desplazamientos verticales.

Cuando se observa la distribución de la deformación plástica efectiva y la presión en el material granular junto con las mallas correspondientes a la configuración indeformada y deformada correspondiente es posible de comparar la misma con los registros fotográficos de varios grupos experimentales que llenan depósitos de laboratorio con capas de material de diferentes colores o registran el ensayo con cámaras que permiten tener tiempos de exposición prolongados registrando la posición del borde del canal de flujo.

REFERENCIAS

- Chen, J.F., Ooi, J.Y., Rotter, J.M., Coker, I., Launder, C., Zhang, K.F. et al, Flow pattern measurements in a full scale silo. *Proc. Advances in engrg meas. Edimburg: Brit Soc. For Strain Measurement Int. Conf.*; 58-63, 1994
- Chen, J.F., Rotter, J.M. Ooi, J.Y., Zhong, Z , Correlation between the flow pattern and wall pressures in a full scale experimental silo. *Engineering Structures*, 29, 2308-2320, 2007
- Chen, J.F., Zhang, K.F., Ooi, J.Y., Rotter, J.M., Visualisation of solids flow in a full scale silo. *European symp.: Storage and flow of particulate solids (Jansen Centennial)*, 427-436, 1995
- Gajo, A., Bigoni, D., Muir Wood, D. , Multiple shear band development and related instabilities in granular materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 52:

2683-2724, 2004

Pernich, A. , Predicción Numérica de los Campos de Tensiones Durante el Llenado y la Descarga de Silos de Almacenamiento de Materiales Granulares, *Tesis de Doctorado en Ciencias de La Ingeniería, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba*, 2010

Pernich, A., Flores, F.G. , Modelo para materiales granulares gruesos en estado suelto. *Mécanica Computacional* , XXVIII: 2251-2272, 2009

Rotter, J.M., Shell structures: the new European Standard and current research needs. *Thin Walled Structures*, 31: 3-23, 1998

Rotter, J.M., Ooi, J.Y., Launder, C., Coker, I., Chen, J.F. ,A study of the flow patterns in an industrial silo. *Proc. Int. Symp. Reliable flow particulate solids II, Oslo: EFChE Publ S*; 96: 517-24, 1993