



# Estudio del comportamiento de silos de chapa corrugada mediante modelos de elementos discretos

J.M. Fuentes<sup>1</sup>, E. Gallego<sup>1</sup>, F. Ayuga<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de investigación EIPIRMA, Universidad Politécnica de Madrid; jm.fuentes@upm.es

**Resumen:** Los silos metálicos son estructuras ampliamente utilizadas para el almacenamiento y manejo de productos agrícolas. El correcto diseño de estas estructuras requiere predecir correctamente las presiones ejercidas por el material almacenado sobre el silo y otros parámetros tales como el patrón de flujo, la velocidad de las partículas durante el vaciado y la tasa de descarga. De acuerdo con la norma EN 1991-4, las presiones que actúan en las paredes de un silo pueden obtenerse utilizando las ecuaciones clásicas de Janssen o Reimbert. Aunque las fórmulas clásicas anteriormente citadas y la mayor parte de la investigación en el campo de los silos se han desarrollado para ejemplares de paredes lisas, la mayor parte de los silos comerciales se construyen en la actualidad con chapa corrugada, dada su mayor rigidez frente a la flexión. El método de los elementos discretos (DEM) se ha utilizado con éxito para simular el movimiento de sólidos disgregados y determinar las fuerzas que estos sólidos ejercen sobre los elementos que los contienen. El propósito de este trabajo es aprovechar las ventajas del método de elementos discretos para el análisis de paredes corrugadas. Utilizando el software EDEM Academic 2018, se ha modelado un silo a escala con paredes de chapa corrugada y se comparan los resultados (tasas de descarga, velocidades de partículas, rozamiento en las paredes y fricción movilizada entre partículas) con los obtenidos en un silo similar de paredes lisas.

**Palabras clave:** silos; chapa corrugada; rozamiento; DEM

## 1. Introducción

Los silos de acero con paredes de chapa corrugada representan una solución técnica muy utilizada por los fabricantes, dada la mayor rigidez a la flexión y resistencia al pandeo que ofrece este tipo de paredes frente a una pared de chapa lisa de similar espesor. La geometría del corrugado, sin embargo, determina el rozamiento existente entre el material almacenado y la pared, condicionando, por tanto, las presiones ejercidas por el material almacenado sobre la pared, así como la tasa de descarga y el flujo de las partículas durante el vaciado del silo.

La norma europea EN 1991-4 [1] plantea la existencia en silos de paredes corrugadas de una zona próxima a la pared, correspondiente aproximadamente al espacio situado entre las crestas de las ondulaciones, en la que el material almacenado permanece en reposo durante el vaciado del silo. La separación con el restante material en movimiento se produce a través de una superficie de rotura denominada "banda de corte". Dicho mecanismo para explicar la fricción se basa en los resultados obtenidos en trabajos experimentales previos [2-5].

De acuerdo con esos trabajos, el rozamiento ejercido por el grano sobre una superficie corrugada de acero puede explicarse como una combinación de fricción del grano sobre una superficie de chapa lisa y de fricción entre partículas. El coeficiente de rozamiento efectivo a

utilizar en ese caso para determinar las fuerzas tangenciales ejercidas por el grano sobre la pared del silo tomaría un valor comprendido entre dos valores límite: el coeficiente de fricción ejercido por el grano sobre una superficie lisa de metal (límite inferior) y el coeficiente de fricción entre las partículas (límite superior). A pesar de las bases teóricas anteriormente descritas, existen distintos factores tales como la geometría del corrugado o las dimensiones de las partículas, entre otros, cuya influencia detallada en el mecanismo de rozamiento requieren aún estudios adicionales.

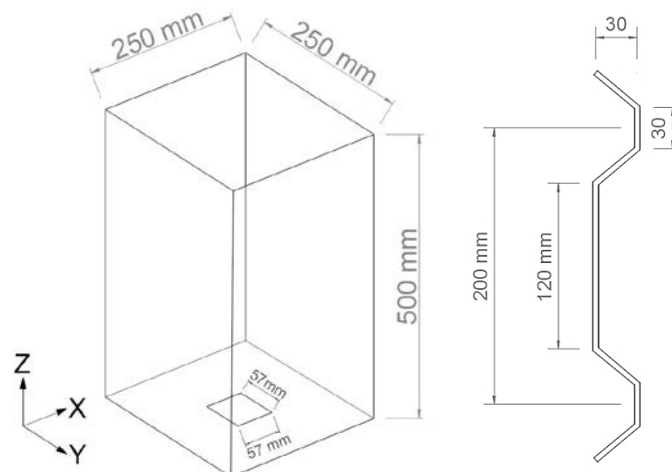
El Método de Elementos Discretos (DEM) se ha utilizado con éxito para simular el movimiento de sólidos disgregados en el interior de los silos y determinar las fuerzas que las partículas ejercen sobre las paredes en los procesos de llenado y vaciado del silo [6-12].

El propósito de este trabajo es aprovechar las ventajas que ofrece el método de elementos discretos para el análisis de las paredes de chapa corrugada en silos. Utilizando el software *EDEM Academic 2018* [13], se ha modelado un silo a escala con paredes de chapa corrugada y se comparan los resultados obtenidos (tasas de descarga, velocidad de las partículas, rozamiento en las paredes y fricción movilizada entre partículas), con los que se producirían en otro silo de similar geometría y paredes lisas del mismo material.

## 2. Materiales y métodos

El método de los elementos discretos (Discrete Element Method, DEM) es una técnica numérica utilizada para simular el comportamiento mecánico de medios granulares. Se basa en un esquema numérico explícito en el que la interacción entre partículas está monitorizada contacto a contacto y en el que el movimiento de las partículas se modeliza partícula a partícula [14]. La interacción entre las partículas en sus puntos de contacto estará modelizada mediante una ley de fuerza-desplazamiento, a través de la cual se relaciona la magnitud del solape entre dos partículas o entre una partícula y una pared con la fuerza desarrollada en el contacto. La relación entre el movimiento de las partículas y las fuerzas actuantes en ellas se obtiene mediante la segunda ley de Newton.

El modelo tridimensional de silo a escala utilizado en las simulaciones presenta una sección transversal cuadrada de 0,25 x 0,25 m y una altura de 0,50 m. La boca de salida está situada en la posición central del fondo plano, y presenta unas dimensiones de 0,057 x 0,057 m. (Figura 1). Como material granular de llenado se utilizaron partículas esféricas de vidrio cuyo diámetro sigue una distribución normal de diámetro medio igual a 13,8 mm y una desviación estándar de  $\pm 0,55$  mm, limitada al intervalo  $0,91 \cdot d - 1,11 \cdot d$ . Las paredes delantera y trasera del silo se simularon de metacrilato y las dos paredes laterales de chapa de acero.



**Figura 1.** Modelo de silo a escala utilizado en las simulaciones.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos, se desarrollaron dos modelos diferentes, cuya única diferencia reside en las paredes laterales, en un caso de chapa lisa de acero galvanizado y en el otro formadas por chapa corrugada de perfil trapezoidal con una altura de corruga de 41,4 mm (3 veces el diámetro medio de las partículas utilizadas) y el resto de parámetros de su geometría los indicados en la Figura 1.

Tanto para los contactos partícula-partícula como para los contactos partícula-pared, se utilizó el modelo de Hertz-Mindlin, con amortiguación viscosa y deslizamiento en la dirección tangencial del contacto [15]. Las características mecánicas de los materiales y los parámetros de interacción considerados en los modelos se tomaron de la literatura [16-18] y son los expuestos en la Tabla 1.

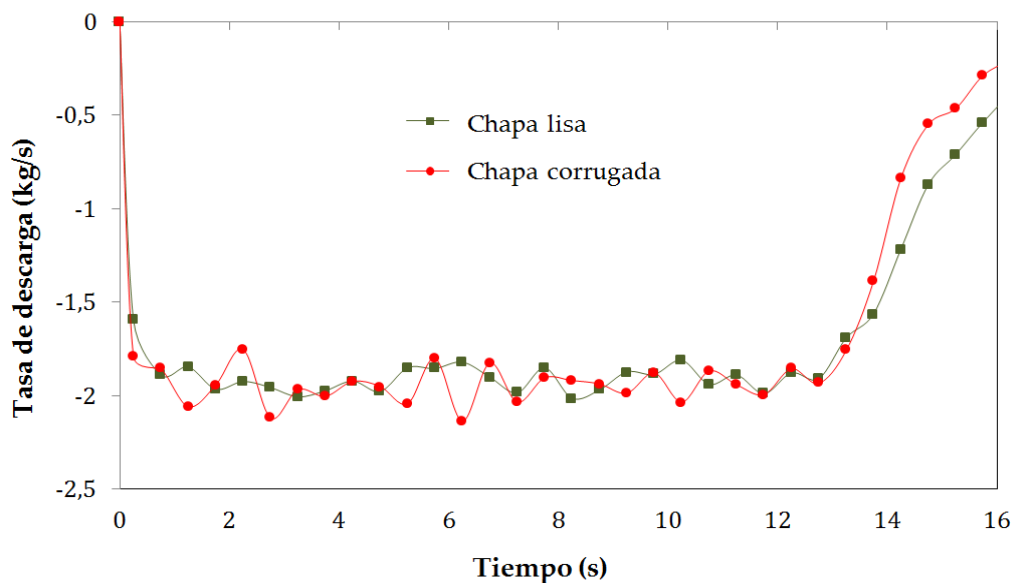
**Tabla 1.** Parámetros del material empleados en los modelos DEM.

Propiedades mecánicas de los materiales			
Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidad (Pa)	Módulo de Poisson
Canicas de vidrio	2530	$3,15 \cdot 10^9$	0,22
Chapa de acero	7860	$2,1 \cdot 10^{11}$	0,3
Metacrilato	1190	$4,1 \cdot 10^{10}$	0,45
Parámetros de interacción entre materiales			
Materiales que interactúan	Coeficiente de restitución	Coeficiente de fricción estática	Coef. de fricción por rodadura
Partícula-partícula	0,75	0,3	0
Partícula – pared (acero)	0,71	0,251	0
Partícula – pared (metacrilato)	0,62	0,3	0

La masa total de las partículas utilizadas en ambos modelos fue de 29,3 kg y el tiempo total de descarga resultó ser de 16 segundos.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Tasas de descarga del material granular



**Figura 2.** Caudales máxicos durante la descarga

El gráfico de la figura 2 muestra la evolución del caudal másico de descarga en los dos modelos de elementos discretos desarrollados. Como puede observarse, el caudal másico de descarga aumenta rápidamente en ambos modelos desde el comienzo de la descarga, hasta alcanzar un valor más o menos estable a partir de los 2 s ( $0,125 \cdot T$ ), en torno a 1,9-2 kg/s, que se mantienen más o menos estable y constante hasta completarse las  $\frac{3}{4}$  partes de la descarga ( $0,75 \cdot T$ ). A partir de ese momento, el caudal másico disminuye de forma rápida hasta el instante final del vaciado.

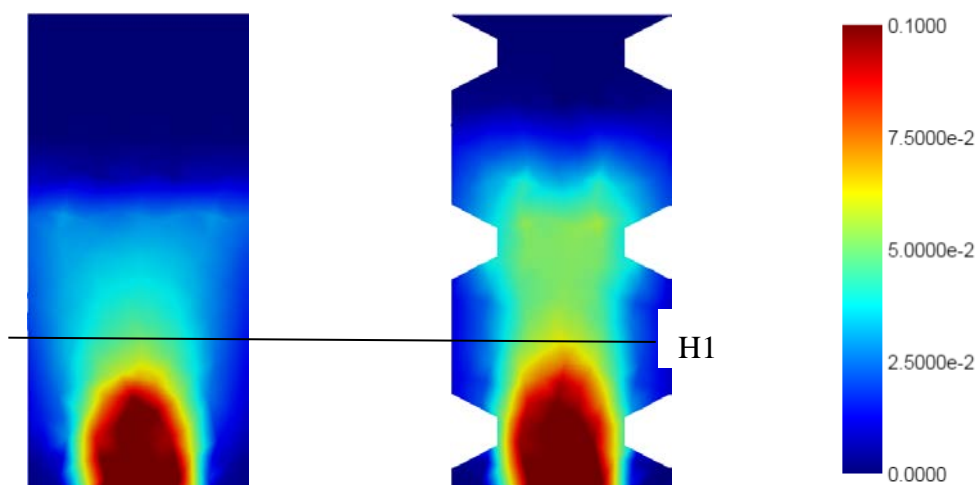
La Tabla 2 muestra el valor promedio del caudal másico en cuatro intervalos de tiempo del proceso de descarga. Según puede observarse, el modelo con chapa corrugada presenta un mayor caudal másico durante el período de descarga comprendido desde el inicio hasta el instante  $0,75 \cdot T$ . En la última parte de la descarga ( $0,75 \cdot T - 1,00 \cdot T$ ), sin embargo, los caudales másicos son mayores en el modelo de chapa lisa.

**Tabla 2.** Caudal másico promedio (kg/s) durante la descarga

Intervalo de la descarga	Modelo de pared lisa	Modelo de pared corrugada
0 T – 0,25 T	1.90	1.95
0,25 T – 0,5 T	1.91	2.02
0,5 T – 0,75 T	1.92	1.97
0,75 T – 1 T	1.20	1.05

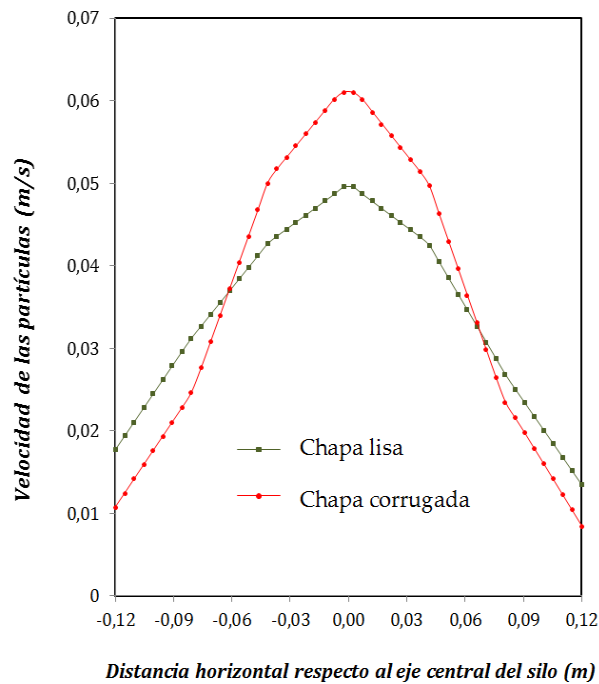
### 3.2. Velocidad de las partículas

En la figura 3 se representa gráficamente el campo de velocidad de las partículas en la sección central del silo, equidistante de ambas paredes de metacrilato, para el instante de descarga  $0,25 \cdot T$  (correspondiente a 4s). En ambos modelos, las velocidades más altas las muestran las partículas situadas justo encima de la boca de salida del silo. Sin embargo, puede observarse que las partículas con velocidades superiores a 0,1 m/s (10 cm/s) alcanzan una mayor altura sobre el fondo en el modelo de pared corrugada, lo que resulta consistente con la mayor tasa de descarga previamente reportada en ese instante para el modelo de pared corrugada. La existencia de una zona de material en reposo en la proximidad de la pared se muestra, asimismo, con claridad en ambos modelos.



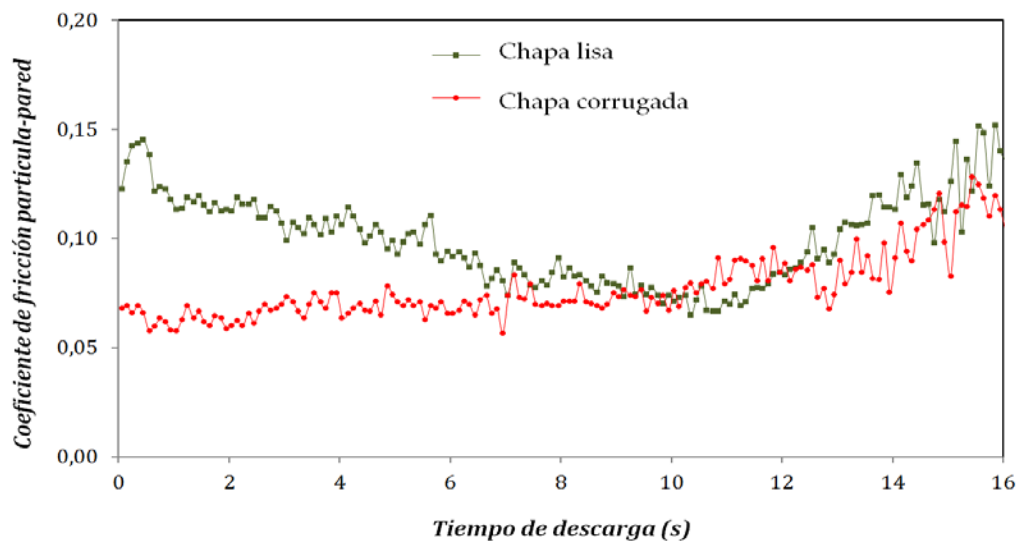
**Figura 3.** Velocidad de las partículas en m/s correspondientes al instante de descarga  $0,25 \cdot T$ . Izquierda: silo de pared lisa; derecha: silo de pared corrugada.

La Figura 4 muestra el perfil de velocidades de las partículas obtenido en ambos modelos en un corte efectuado a la altura H1 situada a 160 mm sobre el fondo del silo ( $0,32 \cdot H$ ) en el instante  $0,25 \cdot T$ . En ambos modelos, las gráficas de velocidades ofrecen patrones similares, con un pico de velocidades en la posición central más alejada de las paredes y velocidades que se reducen progresivamente para las partículas localizadas en las proximidades a la pared del silo, cuya velocidad es cercana a 0 m/s, ofreciendo un valor más bajo en el modelo de pared corrugada. En el modelo de pared corrugada, asimismo, el pico de velocidades alcanzado en la posición central del silo es considerablemente mayor que en modelo de paredes lisas (6,1 cm/s vs 4.9 cm/s).



**Figura 4.** Perfil de velocidades de las partículas a una altura H1 de 160 mm respecto al fondo del silo, correspondiente al instante de descarga  $0,25 \cdot T$ .

### 3.3. Rozamiento en las paredes



**Figura 5.** Coeficiente de fricción entre las partículas y la pared a lo largo de la descarga

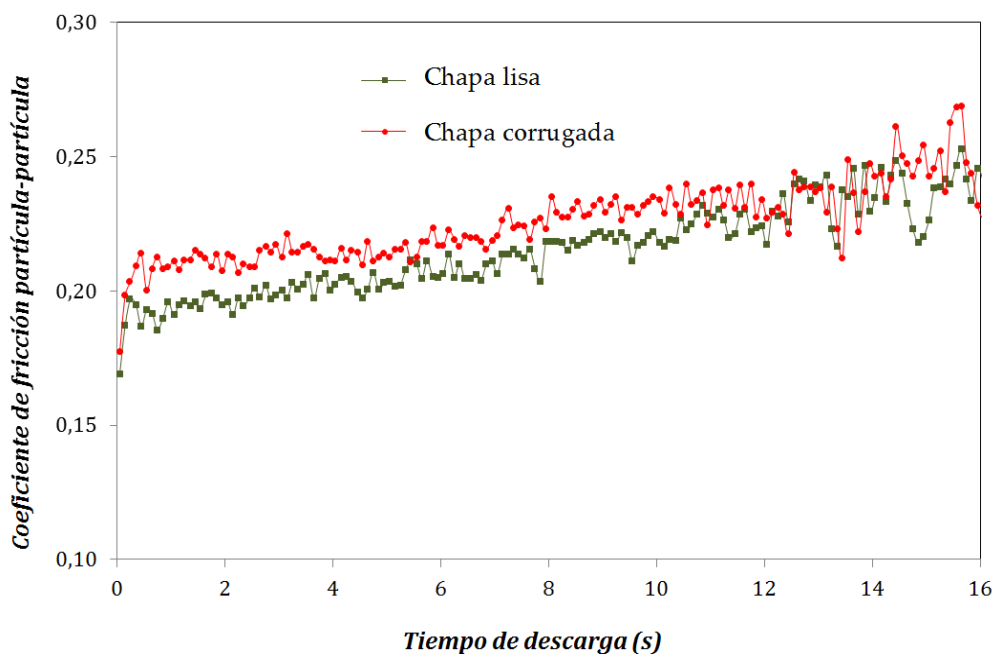
La figura 5 muestra la evolución del coeficiente de fricción partícula-pared durante la descarga en los dos modelos desarrollados. El modelo de silo con paredes corrugadas ofrece menores coeficientes de fricción durante el intervalo de descarga 0-0,5T, sin diferencias significativas en la segunda mitad de la descarga.

El valor promedio del coeficiente de rozamiento global entre las partículas y la pared en el intervalo de descarga comprendido entre 3 y 5 s. fue de 0,092 para el modelo de pared corrugada y de 0,117 para el modelo de pared lisa. El rozamiento partícula pared resultó ser, por tanto, un 21,3% menor en el modelo de pared corrugada que en el similar de pared lisa.

#### 3.4. Fricción movilizada entre las partículas

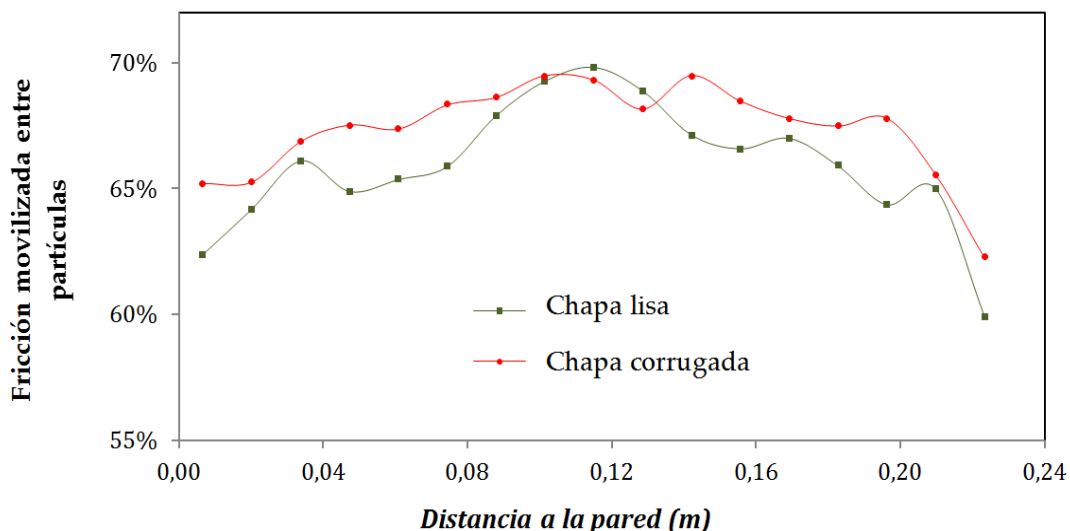
El rozamiento entre las partículas se ha analizado estudiando los contactos existentes en una rebanada virtual de espesor igual a 3 veces el tamaño medio de la partícula situada el centro del silo y a lo largo de toda su altura, suficientemente alejada de las paredes de metacrilato situadas en ambos fondos. Para determinar el coeficiente de rozamiento entre las partículas, se obtuvieron las fuerzas tangenciales y normales para todos los contactos producidos en el interior de la rebanada virtual, y posteriormente se sumaron para calcular el valor deseado del coeficiente de rozamiento como el cociente de ambas fuerzas (tangenciales frente a normales).

Como puede observarse en la figura 6, el coeficiente de fricción entre las partículas tiende a aumentar progresivamente a lo largo de la descarga en ambos modelos y, en general, ofrece valores ligeramente superiores en el modelo de pared corrugada. En el modelo de pared corrugada el valor promedio del coeficiente de fricción entre las partículas obtenido en el período comprendido entre el inicio y las  $\frac{3}{4}$  partes del tiempo de descarga fue de 0,218 y el modelo de pared lisa el valor promedio obtenido fue de 0,205. Estos valores representarían respectivamente una movilización de la fricción microscópica entre partículas en la sección central vertical del silo del 72,7% y del 68,3%, considerando un valor de entrada de 0,3 para el coeficiente microscópico de fricción entre partículas. Dicho nivel de movilización de fricción entre partículas está de acuerdo con los valores reportados por otros autores [19].



**Figura 6.** Coeficiente de rozamiento entre partículas en la sección central del silo

La figura 7 muestra cómo varía la fricción movilizada de partícula a partícula a lo largo del eje horizontal a la altura H1 en el momento de descarga 0,25 T. Con independencia de cuál sea el modelo considerado, la fricción entre partículas se moviliza en menor medida en las proximidades de las paredes, con valores comprendidos entre el 59% y el 65,2%. Los valores máximos de la movilización de fricción entre partículas producen cerca del centro del silo, con valores comprendidos en el intervalo entre el 65 y el 70%.



**Figura 7.** Movilización del rozamiento microscópico entre partículas a la altura H1 ( $0,32 \cdot H$ ) correspondiente al instante de descarga  $0,25 \cdot T$

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se ha analizado el efecto del uso de paredes de chapa corrugada en los silos sobre la fricción ejercida por el material almacenado sobre la pared. El análisis se ha realizado mediante simulaciones en un silo modelo utilizando el método de los elementos discretos (DEM). Las principales conclusiones del trabajo se resumen a continuación:

- Los caudales máxicos de descarga son mayores en el modelo de pared corrugada que en el de pared lisa, especialmente durante el período inicial de descarga, cuando la mayor parte del material se encuentra aún almacenado el silo.
- El modelo de pared ondulada respecto al de pared lisa ofrece una mayor velocidad de las partículas, especialmente en la parte central del silo, validando así las observaciones encontradas para la tasa de descarga. El material situado en la proximidad de las paredes se encuentra en reposo.
- El modelo de pared corrugada ofrece menores coeficientes de fricción entre las partículas y la pared durante la descarga, especialmente durante la parte inicial de la misma.
- El coeficiente de fricción global entre partículas en la sección central del silo aumentó progresivamente en ambos modelos desde el comienzo de la descarga. Los valores promedio obtenidos en el modelo de pared corrugada fueron 6,3% superiores a los obtenidos en el modelo de pared lisa. Los valores obtenidos representan una movilización de la fricción entre partículas en la sección central del silo en torno al 70% del valor del coeficiente de fricción microscópica entre partículas. Dicho nivel de movilización está de acuerdo con los valores reportados por otros autores.
- Los resultados obtenidos con este trabajo son prometedores para entender el mecanismo de fricción existente en las paredes de los silos corrugados y permitir la



validación de las ecuaciones propuestas en las normas. Sin embargo, se deben realizar trabajos adicionales teniendo en cuenta otros aspectos como las diferentes características o formas de las partículas, o el tipo y tamaño de las corrugas.

## Referencias

1. EN 1991-4. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras - Parte 4: Silos y depósitos. 2011. Madrid: AENOR.
2. Moore, D.M., White, G.M., Ross, I.J. Friction of wheat on corrugated metal surfaces. Transactions of the ASAE. 1984, 27 (6), 1842 – 1847.
3. Versavel, P.A.; Britton, M.G. Interaction of Bulk Wheat with Bin Wall Configuration in Model Bins. Transactions of the ASAE. 1986, 29(2), 533–537.
4. Zhang, Q., Britton, M.G., Kieper, R. J. Interactions between wheat and a corrugated steel surface. Transactions of the ASAE. 1994, 37 (3), 951-956.
5. Molenda, M., Thompson, S.A., Ross, I.J. Friction of wheat on corrugated and smooth galvanized steel surfaces. Journal of Agricultural Engineering Research. 200, 77 (2), 209-219.
6. Goda, T.J., Ebert, F. Three-dimensional discrete element simulations in hoppers and silos. Powder Technology. 2005, 158(1-3), 58–68.
7. González-Montellano, C., Gallego, E., Ramírez-Gómez, A., Ayuga, F. Three dimensional discrete element models for simulating the filling and emptying of silos: Analysis of numerical results. Comput. Chem. Eng. 2012, 40, 22- 32.
8. Wang, P.; Zhu, L.; Zhu, X. Flow pattern and normal pressure distribution in flat bottom silo discharged using wall outlet, Powder Technology. 2016, 295, 104-114.
9. Weinhart, T., Labra, C., Luding, S., Ooi, J. Influence of coarse-graining parameters on the analysis of DEM simulations of silo flow. Powder Technology. 2016, 293: 138–148.
10. Balevicius, R., Sielamowicz, I., Mroz, Z., Kacianauskas, R. Investigation of wall stress and outflow rate in a flat-bottomed bin: A comparison of the DEM model results with the experimental measurements. Powder Technology. 2011, 214(3), 322–336.
11. Kobyłka, R., Molenda, M. DEM simulations of loads on obstruction attached to the wall of a model grain silo and of flow disturbance around the obstruction. Powder Technology. 2014, 256: 210–221.
12. González-Montellano, C., Ramírez, A., Fuentes, J. M., Ayuga, F. Numerical effects derived from en masse filling of agricultural silos in DEM simulations. Computers and Electronics in Agriculture. 2012, 81 (1), 113-123.
13. EDEM (2018). DEM Solutions Ltd. User Guide. Edimburgo (Reino Unido).
14. Cundal, P., Strack, O. A discrete numerical model for granular assemblies. Geotechnique. 1979, 29(2), 47-65.
15. Tsuji, Y., Tanaka, T., Ishida, T. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesion-less particles in a horizontal pipe. Powder Technology. 1992, 71(3), 239-250.
16. Chung, Y.C. Discrete element modelling and experimental validation of a granular solid subjected to different loading conditions. 2006. University of Edinburgh. PhD thesis.
17. Chung, Y.C., Ooi, J.Y. Confined compression and rod penetration of a dense granular medium: discrete element modelling and validation. Modern Trends in Geomechanics. 2006, 106, 223–239.
18. González-Montellano, C., Fuentes, J.M., Ayuga-Téllez, E., Ayuga, F. Determination of the mechanical properties of maize grains and olives required for use in DEM simulations. Journal of Food Engineering. 2012, 111 (4): 553-562.
19. Horabik, J., Parafiniuk, P., Molenda, M. Stress profile in bulk of seeds in a shallow model silo as influenced by mobilisation of particle-to-particle and particle-to-wall friction: experiments and DEM simulations. Powder Technology. 2018, 327: 320-334.