

Aplicación de Métodos Numéricos a la Descarga de Áridos por Elevadores de Cangilones

Los sistemas de elevación de materiales, sólidos o líquidos, son tan antiguos como la civilización, y en particular los elevadores de cangilones son máquinas muy importantes en muchas industrias en las que el transporte de áridos es una necesidad fundamental. Aunque la tecnología de estas máquinas está en un buen nivel, los diseños se realizan casi exclusivamente a través de experiencia práctica o como mucho mediante experimentación a escala real o, en casos muy aislados, con prototipos reducidos. El análisis y simulación de la descarga se basa casi exclusivamente en modelos analíticos que consideran geometrías simplificadas de cangilones (p.ej. paredes rectas) y el movimiento de una sola partícula, lo que evidentemente no es muy realista considerando la importancia de los efectos de interacción entre la multitud de partículas contenidas en los mismos. Como se describirá en este artículo, es muy útil desarrollar herramientas más realistas que las actuales, para lo que son idóneos los métodos numéricos.



José L. Pérez-Aparicio

Instituto Investigación Tecnológica de la UPCO
Profesor propio del ICAI

Eduardo Granados Granados

Ingeniero del ICAI (1967)
Director STHIM Maquinaria



1. Introducción

El elevador de cangilones es una máquina que transporta materiales industriales a granel, en sentido vertical o según planos inclinados. El diseño y rendimiento de los elevadores varía considerablemente con las características fluidas del material que va a ser transportado. Este diseño incluye aspectos tales como la geometría del cangilón, la separación entre cangilones y la velocidad de operación. En la figura 1 se puede observar un cangilón típico y sus parámetros constructivos. El vaciado de los cangilones de un elevador se puede realizar de dos maneras, por gravedad o por fuerza centrífuga, según muestra la figura 2.

El vaciado por gravedad puede ser, a su vez, por descarga libre o dirigida. En la descarga libre por gravedad, es necesaria la desviación de la cadena de los cangilones descendentes mediante la estrangulación o inclinación del elevador de cangilones. En la descarga dirigida el material cae sobre el lado posterior de la pared exterior del cangilón previo y así se guía el material hacia la boca de la descarga, con velocidades de 0,5 a 0,8 m/s.

La descarga centrífuga se realiza mediante el vaciado del material por acción de la fuerza centrífuga, que se activa al pasar por la polea de reenvío.

Si se analizan las fuerzas que actúan sobre una partícula en

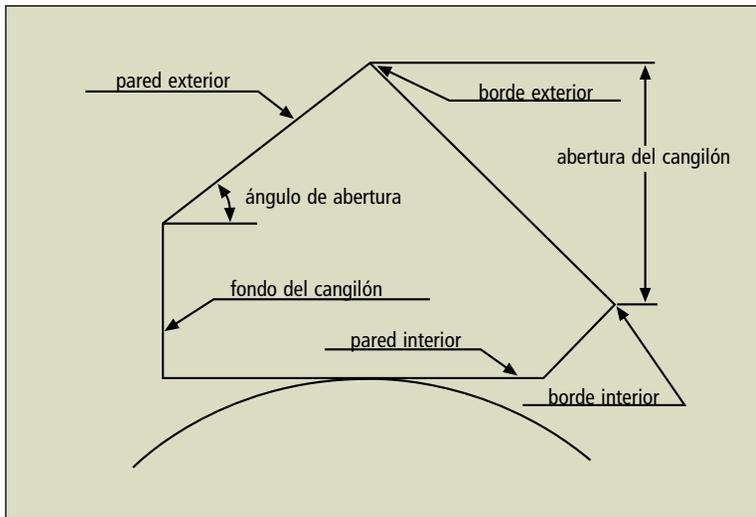


Figura 1: Descripción de un cangilón genérico

diferentes posiciones del cangilón se observa que, según se desplaza el cangilón en su movimiento de rotación, el peso y la fuerza centrífuga se combinan para dar una fuerza resultante. Esta fuerza varía en magnitud y dirección a medida que el cangilón avanza en su trayectoria cir-

cular y, para una velocidad de rotación dada, su dirección siempre pasa por el mismo punto, llamado punto polar.

La posición del punto polar es un buen método para clasificar el tipo de descarga del material [1]:

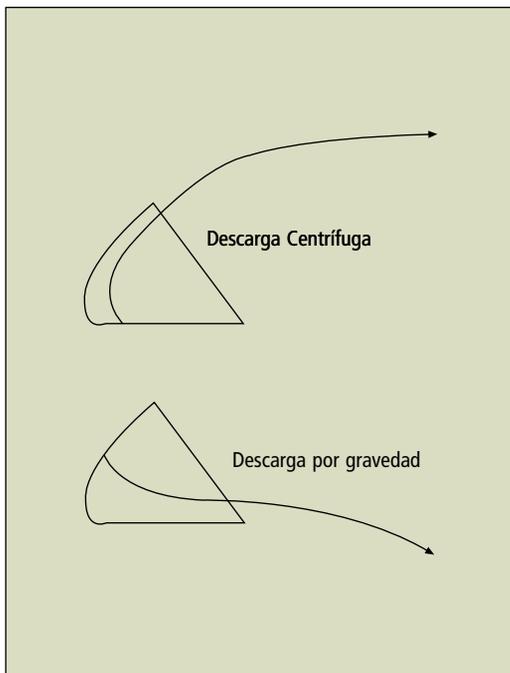


Figura 2: Tipos de descarga

- Si la distancia polar es menor que el radio de la polea, la fuerza centrífuga es mayor que la gravitatoria y las partículas tienden a moverse hacia la pared exterior del cangilón.
- Si la distancia polar es mayor que la distancia desde el centro de rotación hasta el borde exterior del cangilón, la fuerza gravitatoria es la dominante.

- Si la distancia polar se sitúa entre estos dos valores, el vaciado se produce tanto por acción centrífuga como gravitatoria.

Los experimentos publicados en la literatura [2-3] permiten observar, con la ayuda de estroboscopios y otros instrumentos de medida, cómo evoluciona la superficie libre del material en el interior del cangilón y qué configuración adopta. También se han podido determinar las fuerzas que actúan sobre una partícula situada en el interior del cangilón, comprobándose que las componentes fundamentales son la radial y la tangencial, siendo despreciable la componente fuera del plano, ya que rara vez se producen oscilaciones significativas en esta dirección.

La configuración que la superficie libre del material en el cangilón adopte en su movimiento de rotación es debida al hecho de que cada partícula está a una distancia diferente del centro de rotación, y, para una velocidad de giro de la polea constante, las partículas tienen distintas velocidades circunferenciales. Esto conduce a que las fuerzas que actúan sobre las partículas son distintas en cada instante y distintas de una a otra partícula.

1.1. Tipos de perfiles de un cangilón

El objetivo primario en todo elevador de cangilones es conseguir una descarga perfecta

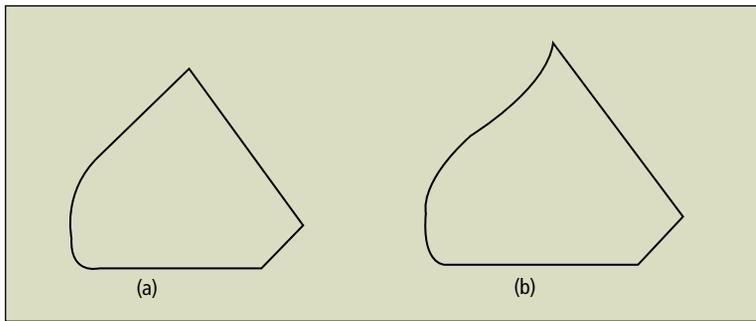


Figura 3: Cangilones logarítmicos y tipo T

del material que transporta. Para velocidades no muy elevadas, un perfil de cangilón recto como el que se representa en la figura 1 es perfectamente válido, ya que el material sólo se desplaza por la pared interior. Sin embargo, a medida que aumentan las velocidades de transporte, el llenado y vaciado de los cangilones se hace más problemático.

Cuando la partícula alcanza una posición tal que las resultantes de la fuerza centrífuga y la gravitacional tienen prácticamente la misma dirección, pero sentido contrario, sólo existe una pequeña componente que tiende a lanzar el material fuera del cangilón. En este punto el material es retenido, impidiéndose así su libre descarga.

Cuanto más profundo es un cangilón y menor su ángulo de abertura, más difícil será, bajo una elevada acción centrífuga, el vaciado de su contenido. Puede incluso llegar a ocurrir que, si usamos cangilones totalmente inapropiados y velocidades elevadas, no se produzca ninguna descarga del material en el recorrido del cangilón. Por tanto, si queremos obtener buenos resultados en los eleva-

dores de marcha rápida, deberemos hacer los cangilones con un ángulo de abertura suficientemente grande.

Para eliminar el problema anterior, se diseñó un cangilón de forma que su pared exterior era tal que, independientemente de la posición del cangilón en su movimiento de rotación, siempre existía una componente de la fuerza que empujaba el material hacia el exterior, gracias a una pared con forma de espiral logarítmica.

En el caso de acción centrífuga predominante, la nueva geometría del cangilón permite un vaciado más rápido y enérgico, obteniéndose buenos resultados incluso a la elevada velocidad de 2.5 m/s. Pero incluso en los cangilones de tipo logarítmico (figura 3a), se han encontrado problemas de vaciado cuando la velocidad es considerablemente elevada, en cuyo caso es conveniente recurrir a otros diseños de cangilones con mayor ángulo de abertura.

Otra modalidad es el llamado cangilón tipo T (figura 3b). Es un cangilón profundo de alta capacidad con un perfil en forma de tulipán, de manera que el ángulo de abertura del cangilón aumenta hacia la boca de salida. La ventaja especial de estos cangilones está en que son capaces de expulsar el material poco después de iniciar su rotación alrededor de la po-

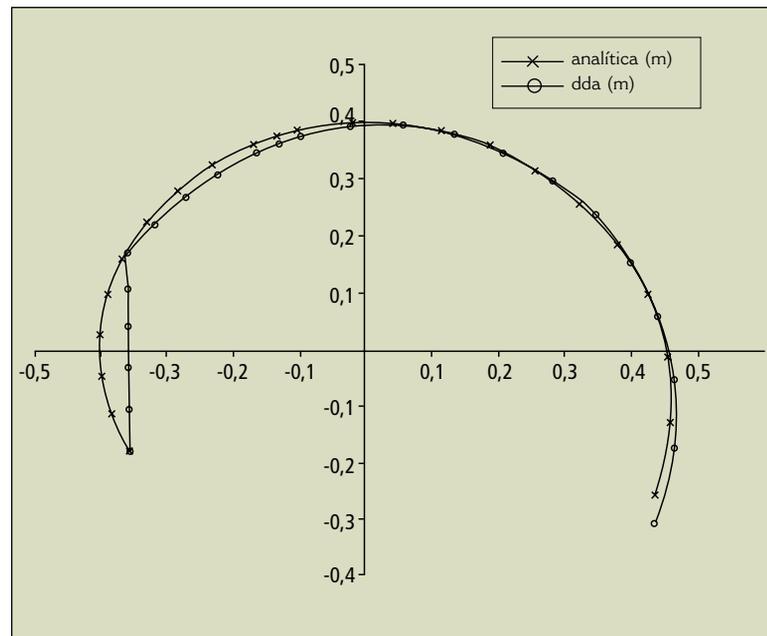


Figura 4

lea. También se pueden conseguir buenos vaciados en el último tramo de su trayectoria circular, lográndose en el paso de rotación a traslación un vaciado óptimo. Este tipo de cangilones es muy apropiado para todo tipo de áridos.

2. Modelización numérica

DDA (Discrete Deformation Analysis) [5-6], es un nuevo método numérico que emplea los desplazamientos como incógnitas. En la versión utilizada (procedente de la Universidad de Berkeley), múltiples discos en dos dimensiones interactúan siguiendo ecuaciones de cinemática y dinámica, con contribuciones de varios efectos como contacto, inercia, fuerzas de volumen y viscosas, restricciones de movimiento, etc. Todas estas contribuciones se formulan en energía potencial total del sistema que, una vez minimizada, proporciona las ecuaciones de equilibrio matriciales fácilmente resolubles, aunque para problemas grandes necesiten recursos informáticos potentes.

Para verificar el programa en este tipo de situaciones, se compararon los resultados con otros analíticos ya publicados [4]; aunque, dadas las limitaciones ya comentadas de las fórmulas cinemáticas, sólo se hizo para una partícula, con cangilón recto y bajo descarga de gravedad. La figura 4 muestra la posición de esta partícula durante el proceso, con origen en el centro de ro-

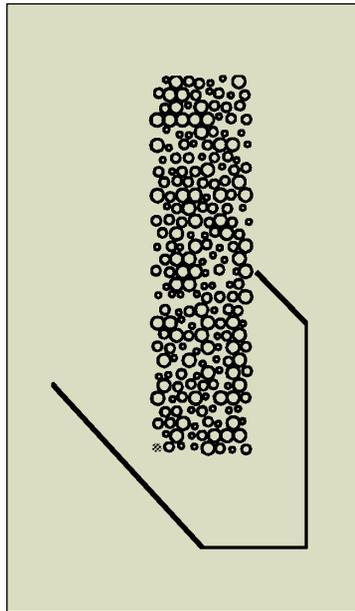


Figura 5: Muestra de material generada aleatoriamente

tación de la polea [7]. Nótese que la correspondencia es perfecta, excepto: 1) al inicio, en el que el resultado analítico no tiene en cuenta el deslizamiento que sufre la partícula en el fondo del cangilón debido a la aparición brusca de aceleración centrífuga, y 2) al final, en donde el primer método tampoco tiene en cuenta el ligero cambio de trayectoria obligado por el deflector del cangilón real. La primera diferencia y el hecho de que las fórmulas no tienen en cuenta la rotación de la partícula, provoca un pequeño desfase entre ambas trayectorias.

En la simulación real para obtener buenos resultados es necesario simular un material lo más parecido posible al que va a ser empleado en la práctica dado que la naturaleza particular de cada árido influye notablemente en su respuesta me-

cánica. Para ello, DDA permite generar muestras con distintos tamaños de partículas y distintas geometrías.

La formación de las muestras comienza con la generación de las partículas. El tipo de grano, radio y proporciones relativas correspondientes a la gradación de tamaños deseada, son entradas del programa. En primer lugar, se define una malla rectangular indicando el número de filas y de columnas, y la altura y el ancho de las mismas. A continuación, cada partícula se sitúa en una celda de la malla mediante una subrutina de generación de números aleatorios (figura 5). Finalmente se permite el asentamiento de esa muestra aleatoria en una caja rígida bajo la acción de la gravedad [7].

2.1. Aplicación a la descarga por gravedad

Para simular el comportamiento del material en el cangilón cuando se efectúa una descarga por gravedad, sometimos dicho cangilón a un movimiento de rotación alrededor de una polea de 1 m de radio, con una velocidad de rotación de 1,5 rad/s. Esto corresponde a una velocidad lineal de elevación de 1,5 m/s característica de una descarga gravitatoria. Las partículas tienen un radio constante de 15 mm (figura 6).

Empleamos para la simulación un rozamiento de 47° entre partículas, de 34° entre éstas y la superficie del cangilón y una densi-

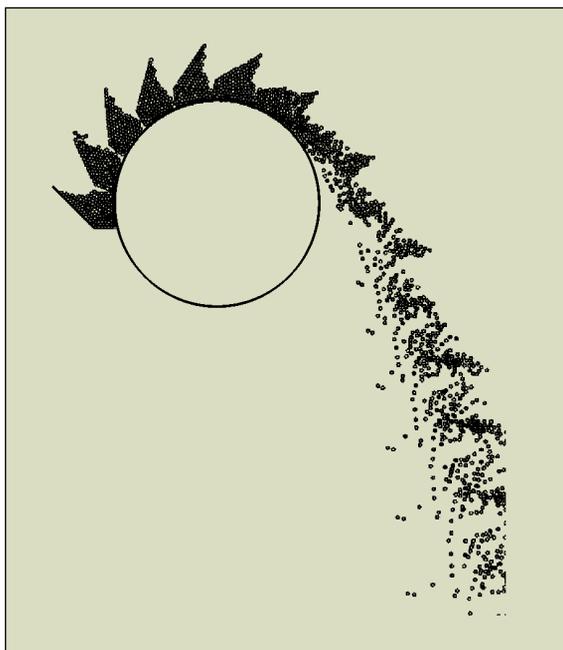


Figura 6: Descarga por gravedad, cangilón recto

dad de las partículas de 2.500 kg/m^3 . Los resultados se muestran en la figura 6 para diferentes ángulos girados por el cangilón en su recorrido alrededor del tambor.

La configuración que adopta la superficie libre del material, desplazándose hacia la pared exterior del cangilón, en un principio es debida a

En este caso (cangilón recto) se observa que, al entrar repentinamente en acción la fuerza centrífuga por pasar el cangilón del movimiento de traslación pura que lleva en su ascenso hacia la polea al de rotación pura alrededor de la misma, el material es sometido a una sacudida que lo impulsa contra la pared exterior del cangilón.

que, hasta unos 50° , la fuerza centrífuga predomina sobre la componente radial del peso, y tanto más cuanto más alejadas se encuentran las partículas del centro de rotación, ya que a igualdad de velocidad angular el radio es mayor y, por tanto, la fuerza centrífuga también lo es. A medida que el cangilón gira, la componente radial del peso pasa a predominar sobre la fuerza centrífuga, y, a partir de un ángulo de giro de unos 70° , las partículas se van depositando sobre la pared interior del cangilón, que es por la que se va a producir la descarga.

Gracias a la geometría de la pared interior, con el borde inclinado hacia arriba, se consigue tener controlado el desprendimiento de las partículas. La bondad del diseño del cangilón para estas condiciones se demuestra por el hecho de que la descarga comienza para un ángulo de giro de unos 110° , de manera que dichas partículas son retenidas hasta una posición en la que puedan abandonar el cangilón sin chocar contra la polea en su trayectoria, en cuyo caso se producirían rebotes y la descarga sería defectuosa.

También se observa que, cuando el cangilón ha completado prácticamente su rotación alrededor de la polea, todas las partículas contenidas en él han sido ya expulsadas. Esto significa que la descarga se ha realizado correctamente. Los resultados se muestran en las siguientes figuras para diferentes ángulos girados por

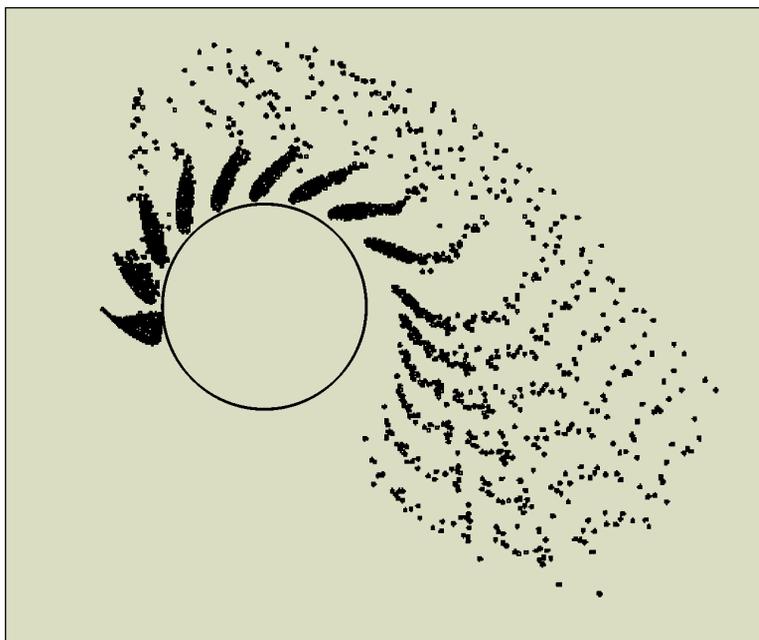


Figura 7: Descarga centrífuga, cangilón logarítmico

el cangilón en su recorrido alrededor del tambor.

2.2. Aplicación a la descarga centrífuga

Para simular el comportamiento del material en el cangilón cuando se efectúa una descarga centrífuga, aplicamos una velocidad de rotación de 2,3 rad/s dejando todos los demás parámetros idénticos a los del apartado anterior. Esto corresponde a una velocidad lineal de elevación de 2,3 m/s que corresponde a una descarga centrífuga.

En cuanto a la descarga producida empleando un cangilón logarítmico se observa que el material se desprende de la pared interna del cangilón y que la descarga se inicia para un ángulo entre 20° y 40°. Asimismo, aunque se produce descarga prematura, es en la etapa de vaciado principal cuando se produce la máxima salida del material. Se observa también que, aunque parezca una contradicción, no se produce el vaciado total del cangilón debido a la elevada fuerza centrífuga, a pesar de que están especialmente diseñados para trabajar en estas condiciones.

La figura 7 representa las posiciones de las partículas para diferentes ángulos de giro del cangilón. Aunque los cangilones dejan atrás a parte de las partículas durante su trayectoria, la velocidad horizontal de éstas es suficiente

para asegurar su movimiento en la dirección de descarga.

3. Conclusiones

La empresa STHIM Maquinaria y el Instituto de Investigación Tecnológica tienen un amplio programa de investigación cuyo fin es la optimización de las máquinas e instalaciones que esta empresa produce. Dentro del ámbito de este programa, se ha descrito el proyecto desarrollado para la mejora del diseño de cangilones aplicados a la descarga de áridos mediante equipos de elevación.

La utilidad de estos resultados no es sólo académica o para la verificación de instalacio-

nes existentes. La empresa está utilizando el método informático desarrollado para el diseño de nuevas máquinas a instalar en un futuro próximo. Estas nuevas instalaciones tendrán sus parámetros de diseño perfectamente ajustados, habiéndose reducido las aproximaciones de diseño y las pruebas en instalaciones piloto, con el consiguiente aumento en la calidad y en el ahorro de tiempo y recursos.

El método se puede aplicar fácilmente a otras situaciones en las que se utilice movimiento de cualquier partícula discreta, por ejemplo cintas transportadoras, silos, etc., o a problemas en los que gran cantidad de objetos de geometría regular interaccionan, por ejemplo en paredes o chimeneas de ladrillo, suelos etc. ¹

Bibliografía

- [1] "Bulk material discharge of bucket elevators, especially of high-capacity bucket elevators". K.H. Koster. 1984. Volumen 3-4 pag.: 853-859.
- [2] "Mechanics of high speed elevators discharge". G.J. Beberly, A.W. Roberts y J.W. Hayes. Bulk Solids Handling, Noviembre 1983.
- [3] "Centrifugal discharge of bucket elevators". K.H. Koster. Bulk Solids Handling, Abril 1985. Volumen 5/2 pag.: 449-460.
- [4] "The problem of complete emptying of high-speed elevator buckets". K.H. Koster. 1986 Aufbereitungs-Technik. Volumen 8, 1984, pag.: 450-463.
- [5] "Block system modeling by Discontinuous Deformation Analysis". Gen-hua Shi. Topics in Engineer (Volumen 11), 1993.
- [6] "Modeling of particulate media using Discontinuous Deformation Analysis" Te-Chih Ke y J. Bray. Journal of Engineering Mechanics, Noviembre 1995. pag.: 1234-1243.
- [7] "Simulación analítica y numérica de la descarga de áridos". R. Fernández. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Pontificia Comillas de Madrid. 1997.
- [8] "Diseño del cangilón en elevadores mediante métodos numéricos". A. Buenaventura, J.L. Pérez-Aparicio, N. Suárez. Cemento y Hormigón 1997.