

Aplicación de métodos numéricos a la descarga de áridos por elevadores de cangilones

Arturo Buenaventura, Angel de Andrés:
 Investigadores, Instituto Investigación Tecnológica
 Eduardo Granados Granados:
 Director STHIM Maquinaria

1. Introducción

Los sistemas de elevación de materia, 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. Este trabajo ha sido realizado dentro de una colaboración entre el Instituto de Investigación Tecnológica y la empresa STHIM Maquinaria, para mejorar el diseño de los propios cangilones y de la instalación en elevadores de áridos utilizados en la industria del cemento.

El elevador de cangilones es una máquina para transportar 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, separación entre cangilones y velocidad de operación. En la Fig. 1-1 se puede observar un cangilón típico y sus parámetros constructivos.

El vaciado de los cangilones de un

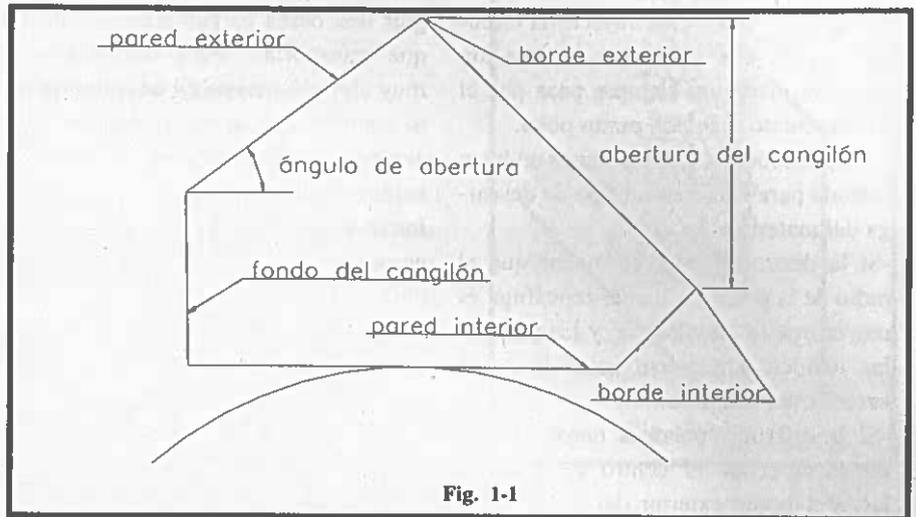


Fig. 1-1

elevador se puede realizar de dos maneras, por gravedad o por fuerza centrífuga, según muestra la Fig. 1-2.

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, como muestra la Fig.

1-3. En la descarga dirigida el material cae, a través del borde interior del cangilón, sobre el lado posterior -provisto de listones laterales- de la pared exterior del cangilón previo y así se guía el material hacia la boca de la descarga. Esta manera de descarga de los cangilones se realiza con velocidades de 0.5 a 0.8 m/s.

La descarga centrífuga se realiza mediante el vaciado del material por

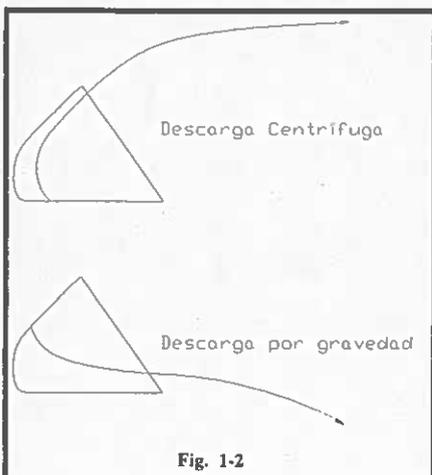


Fig. 1-2

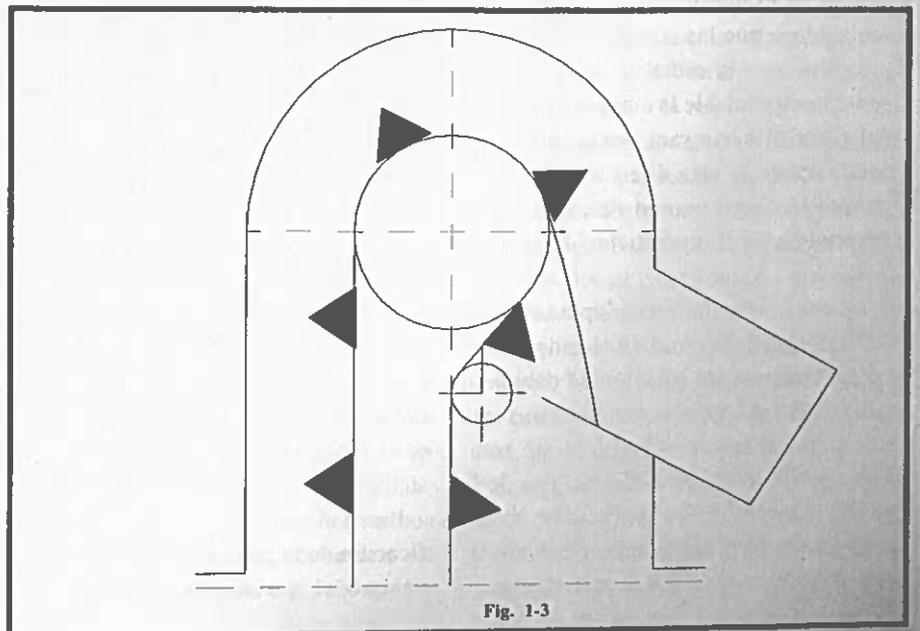


Fig. 1-3

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 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 circular 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:

-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 llevados a cabo en el pasado, permiten observar, con la ayuda de estroboscopios y otros instrumentos de medida, cómo evoluciona la superficie 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 en esta dirección y en caso de que las haya no son de importancia relevante para el movimiento de la partícula.

La configuración que adopta la superficie libre del material en el cangilón 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 del material que transporta. Para velocidades no muy elevadas, un perfil de cangilón recto como el que se representa en la Fig. 1-1 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 de material. Por tanto, si queremos obtener buenos resultados en los elevadores de marcha rápida, se deberán construir 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. Esto es posible gracias a una pared con forma de espiral logarítmica, en cuyo caso esta componente de fuerza tiene siempre la misma dirección.

Para velocidades pequeñas esta modificación de la geometría no es relevante, ya que el vaciado se produce por la

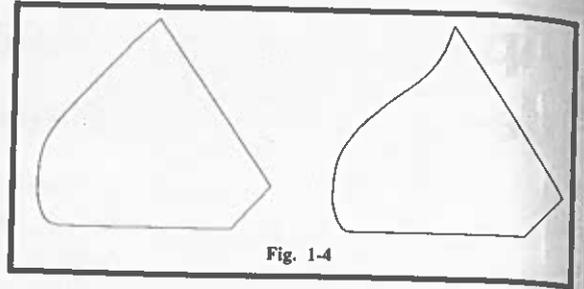


Fig. 1-4

acción predominante de la gravedad y el material resbala por la pared interior del cangilón, que sigue siendo recta. 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. Incluso en los cangilones de tipo logarítmico (Fig. 1-4a), que ofrecen muy buenos resultados en la descarga centrífuga, se han encontrado problemas de vaciado cuando la velocidad es considerablemente elevada, en cuyo caso es conveniente recurrir a otros diseños con mayor ángulo de abertura.

Otra modalidad es el llamado cangilón tipo T (Fig. 1-4b). 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 polea. 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. Estudio analítico

El análisis del comportamiento del material contenido en el cangilón durante la descarga y los cálculos correspondientes están tradicionalmente basados en el comportamiento de una sola partícula de material que se desplaza por el interior del cangilón. Este método de análisis fue establecido por Beckert y Föll en 1966, y todavía proporciona el acercamiento matemático básico al diseño de los elevadores de cangilones de baja velocidad.



En primer lugar hay que determinar el momento en el que la partícula comienza a deslizar sobre la pared del cangilón para lo que es necesario establecer el equilibrio estático de las fuerzas que actúan sobre la partícula. Posteriormente se establece el equilibrio dinámico, en función de la posición de la partícula en el momento en que empieza a deslizar, obteniéndose el momento y la posición correspondiente en que la partícula abandona el cangilón y comienza su caída libre.

Con estos datos se puede calcular la trayectoria de la partícula, teniendo en cuenta que ésta tiene tres clases de movimiento cuando el cangilón rota alrededor del tambor: primero gira solidaria con él (movimiento de rotación pura), después comienza a deslizar sobre éste a la vez que gira (movimiento de rotación más traslación) y, por último, describe una parábola cuando abandona el cangilón (proyección libre). Durante cada uno de estos movimientos, la partícula está sometida a diferentes fuerzas, por lo que cada tramo de trayectoria está regido por ecuaciones diferentes.

En el caso de descarga centrífuga el material desliza, no por la parte interior del cangilón, sino por la exterior. Al llegar al borde exterior las partículas son lanzadas según una trayectoria en una cierta dirección y con una cierta velocidad inicial. El instante en el que el movimiento de la partícula de material es tal que empieza a deslizar puede ser calculado por la aproximación adoptada por B & F, que es aplicable también a la descarga centrífuga, es decir, a esta extensión su método puede todavía reclamar validez general.

A medida que el material se desplaza sobre la pared exterior del cangilón, el radio del centro de las partículas que van a ser descargadas, es decir, su distancia al centro de rotación, varía progresivamente. La magnitud de este radio depende de las características de diseño del cangilón, sobre todo del ángulo de apertura. En descarga centrífuga ocurre además un cambio de posición del centro de gravedad del material en el interior del cangilón.

Cuando una partícula ha alcanzado el

borde exterior del cangilón, entra en una trayectoria de tipo parabólico, al no estar sometida a otra fuerza exterior que la de la gravedad, despreciando la resistencia del aire. Esta aproximación es bastante permisible en materiales granulares, pero no así en materiales pulverizados. A partir de este punto y con la ayuda de las fórmulas de tiro parabólico, se puede determinar el modo en que caerán las partículas en la tolva.

3. Simulación numérica

DDA es un nuevo método que permite la simulación numérica de cualquier proceso industrial en el que esté involucrado un material formado por partículas, de distintos diámetros y formas, interactuando entre sí. DDA emplea los desplazamientos como incógnitas y resuelve las ecuaciones de equilibrio minimizando la energía potencial total, debida a fuerzas y deformaciones, del sistema de discos de dos dimensiones con el que se modela una muestra de material.

En general, conocida la geometría y condiciones de contorno que definen el proceso industrial concreto en estudio, y las propiedades del material (fricción, cohesión y amortiguamiento entre partículas) se obtienen los desplazamientos en el tiempo de cada una de las partículas que forman la muestra.

En el proceso que nos ocupa, 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 mecánica. Para ello, se generan muestras con distintos tamaños de partículas y distintas geometrías de las mismas.

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 de número de filas y de columnas determinadas. A continuación, cada partícula se sitúa en una celda de la malla mediante una subrutina de

generación de números aleatorios (Fig. 3-1). Finalmente se permite el asentamiento de esa muestra aleatoria en una caja rígida bajo la acción de la gravedad.

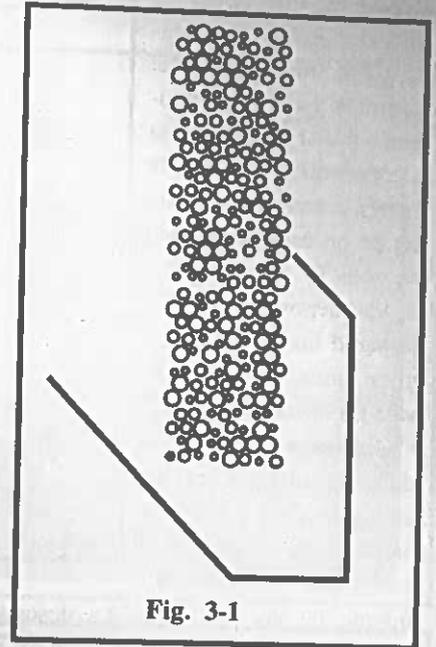


Fig. 3-1

3.1. Aplicación a la descarga por gravedad

Para simular el comportamiento del material en el cangilón cuando se efectúa una descarga por gravedad, se prescribe a dicho cangilón a un movimiento de rotación alrededor de una polea de 0.5 m de radio, con una velocidad de rotación de 1.68 rad/s. Esto corresponde a una velocidad lineal de elevación de 0.84 m/s que es característica de una descarga gravitatoria.

Empleamos para la simulación un rozamiento de 47° entre partículas, de 34° entre éstas y la superficie del cangilón y una densidad por unidad de superficie de las partículas de 2500 kg/m². Los resultados se muestran en la Fig. 3-2 y la Fig. 3-3 para diferentes ángulos girados por el cangilón en su recorrido alrededor del tambor.

En el caso del cangilón recto se observa que, la configuración que adopta en un principio la superficie libre del material, desplazándose hacia la pared exterior del cangilón, es debida a que hasta unos 50° la fuerza centrífuga predomina sobre la componente radial del peso (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). 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 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 significando que la descarga se ha realizado correctamente.

3.2. 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 4.4 rad/s dejando todos los demás parámetros idénticos a los del apartado anterior. Esto corresponde a una velocidad lineal de elevación de 2.2 m/s característica de una descarga centrífuga.

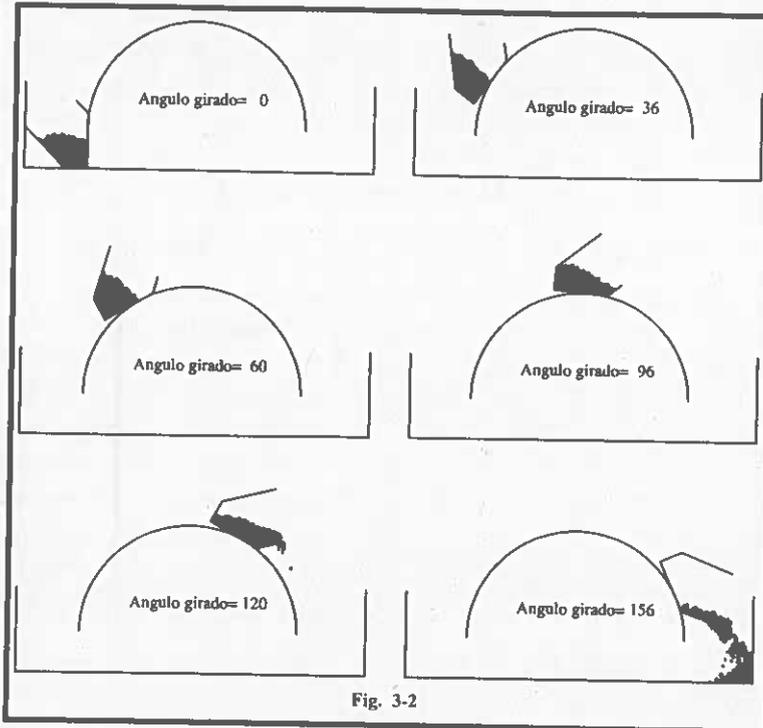


Fig. 3-2

En cuanto a la descarga producida empleando un cangilón logarítmico se observa que inicialmente 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 cierta descarga prematura, es en la etapa de vaciado principal cuando se produce la máxima descarga del material. Se observa también que se producen problemas de vaciado residual

debido a la elevada fuerza centrífuga, a pesar de que estos están especialmente diseñados para trabajar en estas condiciones.

La Fig. 3-3 representa las posiciones de las partículas para varios ángulos en el giro del cangilón. Aunque los cangilones dejan atrás parte de las partículas durante su trayectoria, la velocidad horizontal de éstas es suficiente para asegurar su movimiento en la dirección de descarga.

4. Conclusiones

Como se pretendía, se ha desarrollado una herramienta, mucho más completa que las conocidas hasta ahora, para el diseño de cangilones y de instalaciones en elevadores de áridos, en particular cemento a granel, cemento crudo, marga, caliza, clinker, pirita, y puzolana en descargas tipo gravedad y centrífuga. Los resultados concuerdan con las observaciones experimentales, y la empresa STHIM Maquinaria está aplicando este método a la mejora de los diseños de sus nuevas instalaciones.

Este tipo de métodos numéricos, implementados en programas de ordenador, pueden aplicarse a un gran número de problemas en ingeniería, y existe un acuerdo general entre la empresa y el Instituto para proseguir con un amplio programa de investigación cuyo fin es la mejora de los diseños e instalaciones que esta empresa produce ■

Ref. 1000

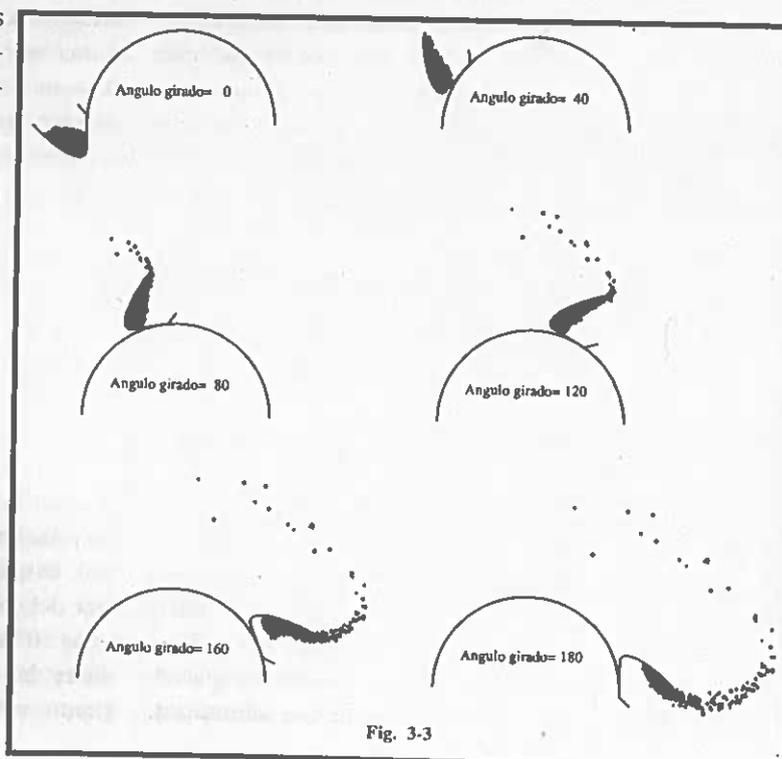


Fig. 3-3