# SEGREGATION OF A BINARY GRANULAR MIXTURE IN A FEED SHOE OF A SINGLE PUNCH PRESS USING DEM

Martínez Martínez, L.; Sainz García, E.; Muro Hernández, J.; Alba Elías, F.; González Marcos, A.

#### Universidad de La Rioja

This work analyzes the segregation phenomena during the die filling of a binary granular mixture in a feed hopper of a tablet compression machine. These phenomena, which are due to the alternative movement of the feed hopper, are investigated using DEM simulations and empirical tests. The optimal values of the model parameters were adjusted by comparison with compression tests performed with a real machine. In order to reduce the computational cost required by using a feed hopper with similar dimensions of a conventional one (fully 3D model), the width of the feed hopper was reduced by 60% (thin sliced model) both in the simulation and the experimental tests. Due the characteristics of the ingredients used in this study, the most relevant parameters of the simulation were the filling method of the feed hopper, its geometry and the value of different friction coefficients. The main result of this study is a model that allows simulating, in a reasonable way, the segregation phenomena that occur in the feed hopper of a tablet compression machine ('single punch' eccentric press). *Keywords:* Segregation: Discrete element method: DEM: Granular materials

# SEGREGACIÓN DE UNA MEZCLA GRANULAR BINARIA PRODUCIDA EN UN CARRO ALIMENTADOR DE UNA MÁQUINA COMPRESORA MONOPUNZÓN EMPLEANDO DEM

La presente comunicación muestra los trabajos relativos a la investigación de la segregación de una mezcla granular binaria producida por el movimiento alternativo en un carro alimentador durante el proceso de llenado de la matriz de una máquina compresora monopunzón usando simulaciones DEM (discrete element method) y pruebas empíricas. Los valores óptimos de las principales variables empleadas en las simulaciones se fueron ajustando mediante la comparación de la segregación ocurrida en las simulaciones y los experimentos reales. Debido al coste computacional que suponía realizar este estudio con un carro de dimensiones similares a las de un carro convencional, el ancho del carro empleado en las pruebas experimentales y de simulación fue reducido en un 60%. Debido a las características de los ingredientes empleados en este estudio, los parámetros de la simulación que se mostraron determinantes fueron: el método de llenado del carro, su geometría y el valor de los distintos coeficientes de fricción considerados. Como principales resultados del presente estudio cabría destacar que se ha obtenido un modelo que permite simular, de manera razonable, el fenómeno de segregación que se produce en un llenado de la matriz de una máquina compresora.

Palabras clave: Segregación; Método de los elementos discretos; DEM; Materiales granulares

Correspondencia: Fernando Alba Elías. Área de Proyectos de Ingeniería, Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad de La Rioja. C/ Luis de Ulloa 20. C.P. 26004. Logroño, España. Phone: +34 941 299 276. E-mail: fernando.alba@unirioja.es

# 1. Introducción

En la presente comunicación se muestra la aplicación del método de los elementos discretos (DEM, *Discrete Element Method*) para el estudio de los fenómenos de segregación que se producen en el depósito alimentador (carro) de una maquina compresora excéntrica.

El método de elementos discretos, enmarcado en la familia de métodos numéricos, permite simular modelos parametrizados de sistemas granulares sólidos y materiales discontinuos. Concretamente, el software empleado ha sido EDEM® (DEM Solutions), en el que se puede implementar la geometría de los elementos a simular, o importarla de una herramienta CAD.

Con el objeto de estudiar la segregación de una **mezcla binaria** (2 ingredientes) producida en el interior del depósito alimentador mediante el método DEM, en primer lugar, se ha realizado un ajuste de los parámetros del modelo simulado (principalmente los coeficientes de fricción) mediante la comparación con pruebas empíricas realizadas con un depósito construido con materiales transparentes (policarbonato) de dimensiones similares a las de un carro alimentador real.

La segregación se ve afectada por diversos factores tales como el tamaño de la partícula (Guo, Wu, Kafui & Thornton, 2011) y la densidad (Guo, Wu, Kafui & Thornton, 2009), la forma (Roskilly et al, 2010), y se rige principalmente por el efecto de las "nueces de Brasil" (Hong, Quinn, 2001).

El estudio de los procesos de segregación en los carros alimentadores de las maquinas compresoras posee gran importancia, sobre todo para la industria farmacéutica, donde la composición de cada comprimido debe estar perfectamente acotado. El modelo obtenido ha permitido identificar los mecanismos de segregación que se producen en este tipo de máquinas y ayudará, en futuras investigaciones, a estudiar las modificaciones precisas para mitigar la segregación, sin llevar a cabo numerosas y costosas pruebas reales de laboratorio.

# 2. Objetivos

Los objetivos del presente trabajo son los siguientes:

- Estudio de los fenómenos de segregación que se producen en una máquina de compresión directa, basado en la realización de ensayos empíricos y en simulaciones mediante el método de los elementos discretos DEM.
- Determinación de los parámetros de simulación para poder ajustar la simulación a las pruebas empíricas reales.
- Estudio de los fenómenos de segregación producidos durante el proceso de compresión
- Determinación de la influencia de la velocidad del carro en la segregación de los ingredientes de la mezcla.

# 3. Compresión de materia granular

#### 3.1 Máquinas compresoras

Se conocen dos tipos principales de máquinas compresoras o prensas:

• Excéntricas o hidráulicas ("alternativas", "de tolva móvil", "single punch tablet press" o "single stroke tablet press"): Las excéntricas cuentan con una sola matriz ("die cavity"), dotada de una o más cámaras de compresión e insertada en una pieza denominada **platina** ("*die platform*" o "*die plate*"). La platina permanece inmóvil, mientras que el carro alimentador, con un movimiento alternativo, facilita el enrasado del material sobrante de la alimentación y la expulsión definitiva del comprimido una vez eyectado aquel con el ascenso del punzón inferior (Figura 1a).

 Rotativas ("rotary tablet machine"): Las máquinas rotatorias cuentan con varias matrices y punzones ("punches"). La tolva permanece fija, pero las matrices se mueven dentro de una platina circular móvil de acero. El trabajo de los punzones está controlado por los rodillos ("rollers") de una rueda de oruga metálica ("pressure wheel"). La dureza de los comprimidos se regula ajustando la separación entre los dos rodillos con un tornillo ("die lockscrew").

Figura 1. [a] Máquina compresora excéntrica y [b] Carro alimentador



# 3.2 Carro alimentador

El carro alimentador de una máquina compresora excéntrica (Figura 1b) es un elemento que cumple 2 funciones: [1] rellena la matriz con una cantidad establecida de producto, antes de que los punzones conformen el comprimido y [2] empuja el comprimido una vez se ha conformado. Es un elemento móvil, sincronizado con el resto de los componentes de la compresora. Suele estar unido mediante un conducto flexible a otra tolva fija, de mayor capacidad, que repone su contenido a medida que éste se vacía al ir llenando la matriz. Este movimiento alternativo genera una vibración que provoca la segregación de los ingredientes de la mezcla que se va a comprimir (Figura 2).





# 4. Segregación de materiales granulados

Se considera que un material granular ha sufrido un proceso de segregación cuando presenta variaciones importantes en la distribución de las partículas que lo componen. Por diferentes motivos, unas partículas se separan de las otras, dando lugar a una mezcla no homogénea del producto. Existen varios tipos de mecanismos de segregación, algunos de ellos son:

- **Convección**: se presenta en mezclas con ingredientes granulares de diferentes tamaños que al someterse a ciertas condiciones de **vibración**, se acumulan de manera separada en regiones localizadas (Zuriguel, 2003).
- **Percolación**: se origina por la entrada de las **partículas pequeñas en los espacios vacíos** generados por las partículas grandes hasta que la estructura granular tiende a ser localmente de partículas iguales. Es conocida como la segregación "por tamaño".
- **Trayectoria de segregación**: por el cual los efectos de **fricción** reducen las velocidades de las partículas más pequeñas o más angulares en una fina capa de material en movimiento.

# 5. Metodología

## 5.1 Materiales de la experiencia

## • Ingredientes de la Mezcla:

Los ingredientes de los comprimidos que pueden fabricarse en una máquina compresora son muy variados. Algunos de estos ingredientes pueden ser: principios activos de comprimidos farmacéuticos, conservantes, saborizantes y aditivos en general de comprimidos de la industria agroalimentaria: sal, ácido cítrico, ácido ascórbico, etc., detergentes comprimidos para lavadoras, lavavajillas, etc., cloro y aditivos comprimidos para piscinas, etc.

Para el presente proyecto se ha empleado una mezcla binaria (2 ingredientes) que por sus características, permiten estudiar varios de los mecanismos de segregación citados anteriormente: distintos tamaños, densidades y coeficientes de fricción (Figura 3a).

- El ingrediente Mayoritario, I1 (85% en peso) corresponde al de mayor tamaño o "grueso" y menor densidad: Pasta alimenticia (sémola de trigo) con una forma prácticamente esférica de 3.8 mm diámetro. Densidad: 1335 kg/cm<sup>3</sup>
- El ingrediente minoritario, l2 (15% en peso) corresponde al de menor tamaño o "fino" y mayor densidad: con una forma prácticamente esférica de 1.6 mm diámetro. Densidad: 1730 kg/cm<sup>3</sup>

# • Máquina compresora utilizada:

# - Conjunto simulador de máquina compresora excéntrica:

Fabricado en policarbonato (carro y platina). Movimiento alternativo del carro mediante cilindro neumático con desplazamiento de 10 cm. Movimiento del punzón mediante cilindro neumático con desplazamiento de 2 cm. 2 cámaras fotográficas para tomar imágenes de perfil y de la parte inferior del simulador y 2 contadores para determinar el número de comprimido que se ha realizado, quedando así reflejado en las imágenes anteriores (Figura 3b).



Figura 3. [a] Ingredientes I1 e I2, [b] Simulador de máquina compresora excéntrica

#### - Simulador de carro alimentador:

Con el objeto de poder observar y estudiar el movimiento de las partículas en el interior del carro se construyó un carro de policarbonato de dimensiones muy similares al de una máquina compresora real. Este "simulador" de carro está formado por 2 placas laterales, atornilladas a otras placas, frontales y traseras, formando un conjunto rígido. Las placas frontales y traseras pueden intercambiarse, de manera que el ancho del carro modificarse (Figura 4ay b). En esta se estudian los ensayos realizados con la configuración de **20 mm** (carro "quasi-3D") de ancho interior del carro.

 Software empleado: Para el CAD, Catia v5r20 y para las simulaciones DEM, EDEM® Academics 2.3 de DEM Solutions (Edimburgo, Reino Unido)



Figura 4. [a] Vista isomética y [b] de perfil de carro convencional y carro "3D" (51 mm)

#### 5.2 Simulación del proceso de compresión

#### • Simulador de carro alimentador "quasi-3D" (20 mm)

En las pruebas preliminares de simulación en las que se empleó el modelo de carro de **51 mm** (con dimensiones similares a una carro convencional, Figuras 5a y b), se comprobó que el coste computacional era excesivo para el proceso de determinación de los parámetros óptimos. El tiempo de cálculo necesario para simular la descarga total del carro alimentador (8860 partículas de 11 y 16163 partículas de l2) era de 65 horas empleando 8 servidores en paralelo. Ante esta circunstancia, poniendo en práctica las experiencias de otros autores (Ketterhagen et al., 2008 y Guo, Wu, Kafui & Thornton, 2011), se construyó, y posteriormente simuló, un modelo de carro de **20 mm** de ancho interior, denominado "quasi-3D" (Figuras 5c y d). El modelo de carro de 51 mm se utilizó posteriormente para la validación del modelo obtenido a partir del modelo quasi-3D. Esta validación no se describe en la presente comunicación. Los citados autores, emplearon en sus trabajos "rebanadas" ("slides") de los elementos a simular sin que por esta razón los resultados obtenidos se

alejasen significativamente los resultados que se obtendrían con las dimensiones reales. En nuestro caso el tiempo de simulación del carro de 20 mm se redujo desde 65 horas a 6 horas.

Figura 5. [a] y [b] Carro "real" (51 mm) y simulado, [c] y [d] Carro "quasi-3D" real y simulado



• Modelo empleado para la simulación del carro y los ingredientes de la mezcla

El software EDEM® simula las partículas reales empleando un modelo basado en partículas esféricas. Para poder considerar las irregularidades de las partículas reales, EDEM puede emplear modelos de partículas en las que se empleen varias esferas (Martínez-Martínez et al., 2012) o modificar parámetros de la simulación, como el coeficiente de rodadura ("rolling friction"), que permite reproducir las "dificultades" para rodar (partícula-partícula y partícula pared) de las partículas no exactamente esféricas. En este proyecto, y debido a la práctica esfericidad de los ingredientes, se ha empleado este último método de aproximación. Las características de los ingredientes (Figura 3a) que se han considerado invariables en las simulaciones han sido las siguientes:

- El ingrediente mayoritario, **I2**: 1 esfera de 3.8 mm de diámetro y densidad: 1335 kg/cm<sup>3</sup>. **85% en peso** de la mezcla total.
  - ⇒ Carro "3D": 4430 partículas,
  - $\Rightarrow$  Carro "quasi-3D": 8860 partículas
- El ingrediente minoritario, I1: 1 esfera de 1.6 mm de diámetro y densidad: 1730 kg/cm<sup>3</sup>. 15% en peso de la mezcla total.
  - $\Rightarrow$  Carro "3D": 8082 partículas,
  - $\Rightarrow$  Carro "quasi-3D": 16163 partículas

#### Valores iniciales empleados en la 1ª iteración

Los valores iniciales de las variables de la simulación de la primera iteración se obtuvieron de la base de datos del software de simulación (Database EDEM®, 2011) y de referencias de otros trabajos (Yu & Saxén, 2010). Así mismo, se definieron los posibles rangos de variación de cada una de dichas variables, en función de las limitaciones propias del software empleado (Tabla 1 y 2). Las variables más significativas de la simulación del proceso de llenado/vaciado del carro fueron las siguientes:

	Coeficiente Poisson	Densidad (kg/m³)	Modulo de Corte (Pa)
11	0.4	1000	1x10 <sup>5</sup>
12	0.4	1000	1x10 <sup>5</sup>
Material carro- matriz-punzón	0.3	7850	8.4x10 <sup>10</sup>

abla 1. Valores	s <u>iniciales</u> de	los parámetros	de la simulación.
-----------------	-----------------------	----------------	-------------------

	Coeficiente Restitución	Coeficiente de fricción estática	Coeficiente de rodadura
1-  2	0.8	0.5	0.01
1 –  1	0.8	0.5	0.01
l1 – pared	0.8	0.15	0.01
12 – 12	0.8	0.5	0.01
l2 – pared	0.8	0.15	0.01
Pared – pared	0.8	0.15	0.01

Tabla 2. Valores	iniciales de los	parámetros relativos	a las interacciones

Una vez definidos los valores iniciales de los parámetros de la simulación se comenzó un proceso de iteración en el que dichos valores se fueron ajustando con el objeto de que los resultados de las simulaciones fueran convergiendo a los resultados de las pruebas empíricas (carro "real"). Para dicho proceso de iteración se tomó como referencia el porcentaje en peso del ingrediente I2, el de menor tamaño (fino) y minoritario (15% peso).

En la Figura 6 se muestra el porcentaje en peso del ingrediente l2 obtenido en cada uno de los 30 comprimidos de los que consta un ciclo completo (comenzando con el carro lleno y hasta que éste se vacía) correspondiente a media de las pruebas reales y a la simulación final, ambas relativas al carro "quasi-3D". En este proceso iterativo, los valores de los parámetros de la simulación se modificaron dentro de los rangos establecidos (Tabla 1 y 2). El criterio utilizado para determinar la bondad de cada una de las simulaciones fue el error RMSE (Root Mean Squared Error). Tras el proceso de ajuste se consiguió reducir el error inicial de un 16.5% al 4.05%. Durante el proceso de iteración se realizaron de 27 simulaciones.





#### Ciclo completo de las pruebas reales y simuladas

Un **ciclo completo** ensayado para el modelo de carro "quasi-3D" (tanto de las pruebas reales como de las simuladas), comienza con el llenado de una tolva situada en la parte superior del carro, con 200 gramos de mezcla binaria "perfecta" (Figura 7a). En las pruebas

reales, con el objeto de disminuir en lo posible la segregación en el llenado de este almacén intermedio, la carga de los 200 gramos se dividió en 20 porciones de 10 gramos que posteriormente se fueron introduciendo en la tolva de la manera más ordenada posible. Posteriormente, la placa-base-inferior que contiene la mezcla en la tolva se retira hacia atrás, vertiéndose el contenido de la misma en el interior del carro (Figura 7b). En la Figura 7c, se aprecia la disposición típica de los ingredientes de la mezcla. La superficie superior de la mezcla presenta una inclinación similar a la del cono de descarga de un silo.

Tomando como origen del desplazamiento del carro y punzón, la configuración que presenta el conjunto carro-punzón en el instante justo posterior a la carga, para cada uno de los instantes significativos del ciclo, se empleó la siguiente codificación, **FxPyTz**. Las letras "**F**x", indican la posición del alimentador o carro ("**F**eedshoe)", siendo F0, la codificación correspondiente su posición en el origen y F100, la correspondiente a la posición del carro a 100 mm del origen (encima de la matriz). De la misma manera, "**P**y", sirve para designar la posición del punzón inferior ("**P**unch"), siendo P0, la posición inicial (posición superior, enrasado con la platina) y P20, la posición del punzón cuando este se desplaza 20 mm hacia abajo, para alojar la porción de mezcla proveniente del carro. Con la letra "**T**z" se designa al número de comprimidos ("**T**ablets") conformados hasta ese momento. Para las simulaciones del carro quasi-3D (real y simulada), "z" varía entre 0 y 30. Según esto, la configuración en la que se llena el carro corresponde al código F0P0T0. Para mostrar la secuencia de producción de un comprimido, en la Figura 8, a modo de ejemplo, se presenta la producción del comprimido Nº8.



#### Figura 7. Llenado del carro a través de tolva

Una vez que se ha llenado el carro y los ingredientes de la mezcla se han estabilizado (Figura 8a), el carro se desplaza 100 mm hacia delante con una velocidad de 0.32 m/s, situándose encima de la matriz (instante F100P0T8, Figura 8b). Una vez que los ingredientes están completamente inmóviles el punzón se desplaza hacia abajo con una velocidad de 1 m/s (instante F100P20T8, Figura 8c). Posteriormente, el carro vuelve a su posición inicial con una velocidad de 0.32 m/s (instante F0P20T8) y las partículas alojadas en la matriz se contabilizan después de que el punzón haya vuelto a su posición inicial (instante F0P0T9, Figura 8d). Este ciclo se repite 30 veces hasta que el ingrediente minoritario l2, desaparezca prácticamente.



## Figura 8. Ejemplo de secuencia de producción de un comprimido: Nº8.

# 6. Resultados

# 6.1 Valores finales de los parámetros de la simulación

En las tablas 3 y 4, se presentan los valores finalmente obtenidos en el proceso de iteración y que han permitido ajustar la simulación a las pruebas reales, con el nivel de precisión que se muestra en la Figura 6 (RMSE del 4%).

Tabla 3. Valores finales de los parámetros de la simulación. Entre paréntesis, los rangos de
variación empleados en el ajuste del modelo

	Coeficiente Poisson	Densidad (kg/m3)	Modulo de Corte (Pa)
11	0.4 (0-1)	1335 (750-1500)	3.6x10 <sup>6</sup> (1x10 <sup>4</sup> -1x10 <sup>8</sup> )
12	0.4 (0-1)	1730 (750-1900)	3.6x10 <sup>6</sup> (1x10 <sup>4</sup> -1x10 <sup>8</sup> )
Material carro- matriz-punzón	0.4 (0-1)	7850 (7850)	1x10 <sup>5</sup> (1x10 <sup>4</sup> -1x10 <sup>13</sup> )

	Coeficiente Restitución	Coeficiente de fricción estática	Coeficiente de rodadura
l1- l2	0.9 (0-1)	0.05 (0-1)	0.01 (0-1)
1 –  1	0.8 (0-1)	0.4 (0-1)	0.1 (0-1)
I1 - pared	0.9 (0-1)	0.3 (0-1)	0.1 (0-1)
12 – 12	0.9 (0-1)	0.1 (0-1)	0.1 (0-1)
l2 - pared	0.9 (0-1)	0.05 (0-1)	0.01 (0-1)
Pared - pared	0.8 (0-1)	0.15 (0-1)	0.01 (0-1)

# Tabla 4. Valores finales de las variables relativas a las interacciones. Entre paréntesis, los rangos de variación empleados en el ajuste del modelo

#### 6.2 Análisis de la segregación durante el proceso de llenado del carro "quasi-3D"

Cuando se llena el carro con la mezcla a comprimir (Figura 7) se produce una primera segregación por la deposición de las partículas a distintas velocidades. La distinta forma en la que las partículas rebotan entre ellas y contra las paredes del carro, determinan la magnitud de la misma. Esta segregación depende de los siguientes factores: las propiedades de las partículas (densidad, tamaño, forma, etc.), los coeficientes de fricción (estático y "rolling") y restitución, en los contactos partícula-partícula y partícula-paredes (del carro) y la geometría del propio carro (pendiente, insertos, etc.). Esta segregación hizo que las partículas finas se depositarán en un porcentaje mayor al de su proporción teórica (15%) en la base del carro (Imágenes de la base del carro de la figura 7c). Por esta razón, el primer comprimido tuvo un porcentaje de finos del 20.7%.

## 6.3 Análisis de la segregación durante el proceso de vaciado del carro "quasi-3D"

A lo largo de un ciclo completo de ensayo (real y simulado) es posible identificar todos los mecanismos de segregación citados en apartado 4. Aunque en todo momento se produce una combinación de todos ellos debido a la geometría concreta del carro alimentador, la incidencia de cada uno varía a lo largo de un ciclo completo. Teniendo en cuenta la segregación identificada a lo largo del ciclo (Figura 6), los mecanismos de segregación han sido analizados en 3 intervalos de producción de comprimidos. En las figuras 9, 10 y 11 se muestran las imágenes correspondientes a los instantes previos al llenado de la matriz (instante F100P0Tz) que producirán los comprimidos 1º, 8º, 19º, 22º, 26º y 30º, correspondientes a los 3 intervalos identificados. En la Figura 9a, se definen las zonas (I, II, III y IV) en las que se ha dividido el contenido del carro y que permiten explicar con mayor claridad los mecanismos de segregación que se producen a lo largo del ciclo completo. Para cada comprimido se presentan las imágenes de perfil de la prueba real (en el que se observa que el contador muestra un número correspondiente al comprimido anterior, z-1), de la simulación y, para facilitar la compresión de los mecanismos de segregación, una imagen de detalle de la simulación en la que únicamente se muestran las partículas del ingrediente I2 (ingrediente de menor tamaño o fino).

Intervalo I (del comprimido Nº1 al Nº8): Las partículas más pequeñas o finos (I2) van rellenando los huecos que existen entre las partículas más grandes o gruesos (I1) haciendo que están partículas vayan desplazándose hacia abajo y acumulándose en la base del carro. Esta segregación por percolación (por diferencia de tamaño) va aumentado hasta que en el comprimido Nº8 alcanza un porcentaje de finos del 24%. En la imagen de detalle (en la que únicamente se muestran los finos) de la Figura 9e, se aprecia cómo han desaparecido parte de los finos de las zonas III y IV (de la punta del carro) lo que se ha traducido en un aumento de su porcentaje en los comprimidos producidos en este intervalo. Los finos de la base de la zona III (que se encuentra justo encima de la matriz) son desalojados en cada relleno de la matriz y su lugar va siendo ocupado por los finos de la parte superior de la zona III. Cuando el carro se desplaza

hacia atrás, los finos de la base de la zona IV quedan "atrapados" en los huecos que crean los gruesos que acaban de introducirse en la matriz. Por último, y también por percolación, la parte superior de la zona I ve reducida la cantidad de finos al desplazarse éstos a partes más bajas de la zona I (Figuras 9d,e).

#### Figura 9. Divisiones del contenido del carro e imágenes reales y simuladas de los instantes F100P0T1 y F100P0T8



Intervalo II (del comprimido Nº9 al Nº21): Los mecanismos de segregación identificados en el intervalo I siguen produciéndose, pero al ir agotándose los finos, el porcentaje de éstos disminuye desde el 23.9% del comprimido Nº9 hasta el 10.6% del comprimido Nº21 (Figura 6). En la imagen de detalle de la Figura 10b se aprecia cómo se ha ido acentuando la desaparición de los finos de las zonas III y IV pero, al contrario de lo que ocurrió en el intervalo I, no se ha traducido en un aumento del porcentaje de éstos, pues también se han "consumido" los finos de las partes superiores de estas zonas. También se aprecia en las imágenes (real y simulada) la disminución de finos de la parte superior de la zona I.



#### Figura 10. Imágenes reales y simuladas del instante F100P0T19

 Intervalo III (del comprimido Nº22 al Nº30): Durante los intervalos I y II, el principal fenómeno de segregación estaba relacionado con la percolación de finos (desplazamientos verticales en el sentido de la gravedad). El movimiento de las partículas estaba muy limitado por la geometría del carro y los desplazamientos en sentido horizontal, debido al movimiento alternativo del carro, eran prácticamente inexistentes. A partir del comprimido Nº22, habiéndose consumido las partículas de la zona I, la mezcla comienza a disponer de espacio para desplazarse horizontalmente en el interior del carro debido a la fuerza de inercia que le confiere éste en su movimiento alternativo. A partir de este momento comienza a producirse mecanismo de segregación por convección (o vibración). A medida que aumenta el espacio libre en la base del carro, las partículas se desplazan horizontalmente entre las zonas II, III y IV. Este desplazamiento (además del mantenimiento de la percolación identificada en los intervalos anteriores) explica el aumento repentino del porcentaje de finos que se produce en el comprimido Nº26 (21.0%). En la imagen de detalle de la figura 11b, se observa cómo las partículas gruesas que provienen de la zona I (libres de finos), ocupan la mitad derecha de la zona II. Este hecho, y la práctica desaparición de los finos de las zonas III y IV, hace que se genere una "bolsa de finos" que se desplaza horizontalmente por la mitad izquierda de la zona II (imagen de detalle de Figura 11d). Esta bolsa de finos se "consume" en la producción de los comprimidos Nº25, 26 y 27 (Figura 6) cuando ésta se posiciona en la zona III, justo encima de la matriz. En la imagen de detalle de la Figura 11e (solo partículas finas), se muestra la secuencia F100P20T26 (justo posterior a la F100P0T26) en la que se observa cómo al bajar el punzón, gran parte de las partículas finas de la bolsa caen en la matriz. Después de este suceso, a partir del comprimido Nº27, el porcentaje de finos disminuye dramáticamente hasta su práctica desaparición en el comprimido Nº30 (imagen de detalles de la Figura 11g).

Figura 11. Imágenes reales y simuladas de los instantes F100P0T22, F100P0T26 y F100P0T30



# 7. Conclusiones

En la presente comunicación se muestra una aplicación del método de los elementos discretos (DEM) en la que se ha llevado a cabo la simulación del proceso de vaciado completo del carro alimentador de una máquina compresora excéntrica.

Los valores óptimos de las variables del proceso han sido determinadas a través de un proceso iterativo, con el que se han alcanzado errores (RMSE) aceptables (4.0%).

Con el modelo obtenido ha sido posible analizar con mayor grado de detalle el proceso de segregación que se produce en este tipo de máquinas. Este modelo constituye el punto de partida que permitirá, en futuras investigaciones, proponer mejoras en el diseño de los elementos de estas máquinas para mitigar en lo posible el problema de la segregación.

# 8. Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo de EDEM Solutions (Edimburgo, UK) y al Plan Riojano de I+D de la Comunidad Autónoma de La Rioja, a través del proyecto FOMENTA 2010/02.

# 9. Referencias

- Database EDEM®, [Edingurgo, Escocia]. Base de datos bibliográfica disponible en el distribuidor DEM Solutions.
- Guo, Y., Wu, C. Y., Kafui, K. D., & Thornton, C. (2009). Numerical analysis of densityinduced segregation during die filling, *Powder Technology*, 197, 111-119.
- Guo, Y., Wu, C. Y., Kafui, K. D., & Thornton, C. (2011). 3D DEM/CFD analisys of sizeinduced segregation during die filling, *Powder Technology*, 206, 177-188.
- Hong, D.C., & Quinn, P. V. (2001). Reverse Brazil nut problem: competition between percolation and condensation. *Phys. Rev. Lett*, 86, 3423–3426.
- Ketterhagen, W. R., Curtis, J. S., Wassgren, C. R., & Hancock, B. C. (2008). Modeling granular segregation in flow quasi-three-dimensional, wedge.shaped hoppers. *Powder Technology*, 179, 126-143.
- Martínez-Martínez, L., Sainz-García, E., Muro-Hernández, J., González-Marcos, A. Simulación del fenómeno de segregación en un depósito de máquina compresora excéntrica mediante elementos discretos. XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyecto, Valencia, Julio 2012.
- Roskilly, S. J., Coulbourn, E. A., Alli, O., Williams D., Paul, K. A., Welfare, E. H., & Trusty, P.A. (2010). Investigating the effect of shape on particle segregation using a Monte Carlo simulation, *Powder Technology*, 203, 211-222.
- Schröter M., Ulrich S., Kreft J, Swift J, Swinney H.(2006) Mechanisms in the Size Segregation of a Binary Granular Mixture. Center for Nonlinear Dynamics and Department of Physics, University of Texas at Austin, Physical review E74, 011307.
- YU, Y., Saxén, H. (2010). Experimental and DEM study of Segregation of ternary size particles in a blast furnance top bunker model. *Chemical Engineering Science*,65, 5237-5250.
- Zuriguel I. Movimiento de convección en un medio granular agitado verticalmente. España, Departamento de Física y Matemática Aplicada, Universidad de Navarra, 2003.