

NUEVOS DESARROLLOS DE TECNOLOGÍAS DE DECORACIÓN EN MASA PARA BALDOSAS Y LÁMINAS CERÁMICAS

R. Cenni, P. Testi, M. Cova, G. Pederzini

SACMI, Imola BO, Italy

1. RESUMEN

El desarrollo de tecnologías para la decoración en todo el espesor de la baldosa cerámica se remonta a principios de los años noventa. El objetivo era implementar la estética del gres porcelánico técnico frente a los simples productos de color sólido o los modelos "sal y pimienta". Así pues, se desarrollaron dispositivos específicos para la creación de efectos "desmezclados" multicolores mediante sistemas de alimentación simultánea de varios polvos atomizados en la fase de prensado. El uso de mezclas de colores, granos y escamas, distribuidos aleatoriamente, seguía permitiendo simular el efecto estético característico de los granitos naturales. Se siguió investigando para crear diseños gráficos más precisos, con vetas típicas del mármol y motivos geométricos, aunque a baja resolución. El explosivo crecimiento del gres porcelánico esmaltado limitó el desarrollo de la decoración en masa hasta épocas recientes. En particular, hasta la producción de grandes láminas decoradas con impresión digital por chorro de tinta.

La oportunidad de utilizar láminas cerámicas también en el segmento de las encimeras, como alternativa al mármol y al granito, ha dado un nuevo impulso al desarrollo de la decoración en masa, en particular para la creación de vetas pasantes. Las nuevas tecnologías propuestas se basan en una deposición precisa de los polvos con dispositivos de control digital adecuados y en la perfecta sincronización de los gráficos superficiales creados en la línea de esmaltado con impresoras normales de chorro de tinta.

El presente estudio muestra cómo el uso de técnicas computacionales de vanguardia como el DEM (Método de los Elementos Discretos) ha permitido simular y predecir el movimiento de los diferentes polvos cerámicos. Esto ha permitido componer el patrón estético tridimensional deseado en la lámina, acorde con los gráficos que luego se aplican a la superficie mediante decoración inkjet de alta resolución. De hecho, gracias a los análisis DEM es posible optimizar las geometrías de los sistemas de distribución para eliminar cualquier efecto artificial y conseguir que el aspecto final sea lo más "natural" posible y se corresponda con el modelo original. El enfoque DEM presentado aquí utiliza un modelo simplificado de interacción de partículas para obtener un compromiso aceptable entre precisión y tiempo de desarrollo del producto. Para alcanzar este objetivo, es esencial un escalado del sistema estudiado mediante un enfoque de "coarse graining" (grano grueso).

La utilización del DEM ha ido acompañada de una calibración de los modelos de interacción entre los materiales implicados y de herramientas de post-procesado. Estas herramientas proyectan hacia delante los resultados en estado estacionario para permitir simular un proceso de producción como el de la decoración en masa incluso en la fase de diseño conceptual con tiempos adecuados para el desarrollo del producto.

La combinación de estas tecnologías permite crear láminas cerámicas con vetas pasantes mediante procesos de producción digital automatizados, totalmente integrados en las líneas de conformado y decoración de última generación.

Las láminas con decoración sincronizada en masa y en superficie representan sin duda la punta de lanza de la tecnología cerámica, ideal para el sector del diseño y de la decoración.

2. INTRODUCCIÓN

La transformación digital va a desempeñar un papel clave en el desarrollo de las nuevas tecnologías para la industria cerámica. Mientras que el gemelo digital de procesos pretende ofrecer nuevas formas de gestionar el proceso industrial de fabricación de productos cerámicos, la virtualización física del proceso cerámico va a ayudar a los diseñadores a ofrecer soluciones eficientes e innovadoras. Aunque las pruebas físicas siempre serán esenciales en el desarrollo de productos, los modelos de simulación acercan a los fabricantes a su objetivo principal de encontrar la mejor solución con menos iteraciones.

La virtualización del proceso de fabricación de productos cerámicos puede proporcionar información sobre el rendimiento y la fabricabilidad en una fase más temprana del proceso de desarrollo. Puede proporcionar resultados que son difíciles o incluso imposibles de medir en prototipos físicos. Permite realizar pruebas virtuales en condiciones operativas poco habituales para terminar con un diseño robusto. Todas las etapas principales del proceso de fabricación de baldosas pueden simularse para alcanzar estos objetivos. En el presente estudio vamos a centrarnos en la fase de decoración y, en particular, en el proceso de decoración en seco en masa. La decoración en seco de baldosas y láminas juega un papel relevante en el proceso cerámico, aunque no implique ninguna transformación física ni química del material cerámico. De hecho, la decoración en seco a toda masa se basa en una combinación de procesos de manipulación de materiales granulares. La física que rige estos procesos puede reproducirse virtualmente. En los párrafos siguientes se describen las técnicas que subyacen a esta virtualización, junto con algunos ejemplos de aplicación.

3. MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS

El método de los elementos discretos (DEM) es una técnica de simulación numérica desarrollada para el análisis y la modelización de sistemas complejos y discontinuos compuestos por un gran número de cuerpos. Fue introducido por primera vez por Cundall y Strack [1] en 1979 durante sus estudios sobre materiales granulares. A lo largo de los años, el DEM también se ha aplicado en otros campos de la ingeniería y hoy en día representa una técnica numérica consolidada entre el mundo académico y la industria. El tiempo de cálculo necesario, especialmente cuando se trata de escalas industriales, sigue siendo una de las principales limitaciones de la difusión de esta técnica. El DEM debe su creciente éxito al aumento progresivo de los recursos computacionales disponibles en los procesadores modernos.

El DEM se basa en un enfoque lagrangiano puro [2], en el que los cuerpos del sistema se modelan de forma discontinua. Al mismo tiempo, los parámetros que definen los cuerpos evolucionan individualmente con el tiempo. Siguiendo la definición dada en [3] un código DEM sólo puede definirse si permite desplazamientos finitos, rotaciones y una separación completa entre los cuerpos que componen el sistema. La separación de todas las partículas en una simulación DEM requiere la necesidad de estudiar y seguir cada una de las trayectorias e interacciones. Esto implica la necesidad de una gran capacidad computacional.

En un algoritmo DEM, las partículas se representan numéricamente mediante un grupo de puntos móviles. A cada partícula se le asocia una masa y una forma. A pesar de la existencia de diferentes tipos de algoritmos DEM, es posible diferenciar los dos principios básicos que los rigen. El primero es la famosa segunda ley de Newton, que rige el movimiento de los cuerpos bajo la acción de diversas fuerzas. El segundo es el impacto entre dos cuerpos: la ley que describe estas acciones es crucial para el DEM. Los impactos se producen varias veces en los cómputos y proporcionan la información más importante para el problema que se está resolviendo. Cada algoritmo DEM sigue dos pasos principales en cada simulación. El primer paso es la generación de partículas dentro del dominio de simulación. El segundo paso es la determinación recursiva de las fuerzas resultantes de las interacciones de los cuerpos y de la evolución del movimiento.

Según el enfoque utilizado por el algoritmo, existen diferentes tipos de DEM. En el presente trabajo se utiliza el enfoque denominado "soft particle" (partícula blanda), introducido por Cundall & Strack. Es el enfoque más difundido ya que permite analizar sistemas con un gran número de partículas sin perder precisión en el modelo.

Los puntos clave de este método son la simplicidad de la formulación de partículas rígidas, al tiempo que se tiene en cuenta la rigidez de los materiales que constituyen las partículas. Aunque no se modelizan las deformaciones durante la colisión, se permite que los cuerpos se "solapen". En función de los parámetros de rigidez, el modelo de contacto y la extensión de este solapamiento, se calculan las fuerzas resultantes. La entidad del solapamiento será diferente en función de la velocidad de los cuerpos en el instante anterior a la colisión y de la fuerza resultante generada a partir del modelo de interacción específico. En consecuencia, la duración del contacto entre los cuerpos será más o menos prolongada. El suceso no es instantáneo, por lo que el modelo utiliza una discretización temporal mediante pasos de tiempo fijos. La elección del paso temporal es crucial para modelizar correctamente el sistema físico. Por un lado, si el paso temporal es excesivamente pequeño, puede dar lugar a una simulación excesivamente larga. Por otro lado, es necesario evitar sobrepasar un valor máximo a partir del cual se produce una resolución de contacto sin correspondencia real.

La utilización de un paso temporal incorrecto para la discretización temporal puede dar lugar a una pérdida de información debido a la omisión de interacciones entre dos pasos temporales consecutivos. Otro problema puede surgir cuando el solapamiento entre cuerpos es significativo: en este caso, las fuerzas de contacto pueden resultar poco realistas y demasiado grandes, lo que lleva a la divergencia de la simulación.

La elección del paso temporal correcto se realiza en función de los dos parámetros siguientes:

$$\text{Tiempo de Rayleigh: } t_{\text{Rayleigh}} = \frac{\pi R \sqrt{\rho/G}}{0.1631\nu + 0.8766}$$

$$\text{Tiempo de Hertz: } t_{\text{Hertz}} = 2.87 \left[\frac{(m^*)^2}{v_{\text{max}} R^* (Y^*)^2} \right]^{1/5}$$

donde ρ y G representan la densidad y el módulo de cizalla de la partícula, R es el radio de la partícula y ν es el coeficiente de Poisson. Por otro lado Y^* , R^* y m^* se definen según:

$$\frac{1}{Y^*} = \frac{(1-\nu_1^2)}{Y_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{Y_2}, \quad \frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \quad \frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}$$

donde Y es el módulo de Young de las partículas en contacto, R el radio y m la masa de las partículas. v_{max} es la velocidad máxima de la velocidad relativa entre las partículas. La elección del paso de tiempo suele ser el valor mínimo entre el 20% del tiempo de Rayleigh y el 10% del tiempo de Hertz.

El contacto entre los cuerpos se modeliza imaginándolos interconectados a través de un par de sistemas de muelles-amortiguadores paralelos, orientados respectivamente en las direcciones normal y tangencial a las superficies de contacto. La fuerza resultante originada por la colisión de los cuerpos puede expresarse como:

$$\vec{F} = \vec{F}_n + \vec{F}_t$$

donde \vec{F}_n y \vec{F}_t son las fuerzas orientadas respectivamente en las direcciones normal y tangencial. Estas fuerzas pueden expresarse en función de la superposición de las esferas, de la velocidad relativa en el momento de la colisión y de las características del material representadas por la rigidez del muelle y el factor de amortiguación del amortiguador.

$$F_n = -k_n \delta_n + \gamma_n v_{r,n}$$

$$F_t = -k_t \delta_t + \gamma_t v_{r,t}$$

donde δ_n y δ_t son la superposición respectivamente en dirección normal y tangencial, $v_{r,n}$ y $v_{r,t}$ son los componentes de la velocidad relativa en el contacto, con k_n y k_t la rigidez de los muelles elásticos utilizados para modelizar el contacto, γ_n y γ_t los factores de amortiguamiento de sus respectivos amortiguadores. El subíndice n indica la dirección de la componente normal, mientras que el subíndice t indica la dirección de la componente tangencial. Suponiendo por simplicidad, que las partículas tienen una geometría esférica y definiendo con r_a y r_b sus radios, r_{ab} la distancia entre los dos centros, t_0 el tiempo inicial de contacto, las superposiciones δ_n y δ_t se definen como:

$$\delta_n = (r_a + r_b - r_{ab}) \cdot \vec{n}_{ab}$$

$$\delta_t = \int_{t_0}^t v_{r,t} dt \approx \delta_{t,0} + v_{r,t} \Delta t$$

Dependiendo de las funciones utilizadas para definir los coeficientes de rigidez y amortiguación, la fuerza de contacto F^c asumirá diferentes características, permitiendo distinguir entre diferentes modelos de contacto para los diferentes materiales a modelizar.

En el mercado existen diferentes códigos DEM comerciales y de código abierto capaces de reproducir materiales granulares complejos en cuanto a la forma e interacciones de las partículas. En el presente trabajo se utiliza un código comercial.

Una vez fijados el modelo de material, la forma de las partículas y la duración física, cuanto mayor sea el número de partículas mayor será el tiempo de cálculo. Modelizar un sistema a escala industrial como los de la industria cerámica implica considerar un número enorme de partículas y, a menudo, tiempos de proceso largos. Esto conduce a un tiempo de cálculo inadecuado para los tiempos de diseño del producto. Se han estudiado y desarrollado diferentes técnicas y enfoques multiescala para ampliar la modelización de sistemas granulares desde la escala de laboratorio a la industrial (por ejemplo, modelos eulerianos, enfoques discretos y continuos, modelos basados en poblaciones, etc.). Un método muy difundido en la comunidad DEM es el denominado "coarse graining" (grano grueso). Una vez definido el factor coarse graining cg , el radio de las partículas se incrementa en este factor y, por lo tanto, la dimensión del modelo de cálculo se reduce en un factor de cg^2 . Además de eso, también el paso de tiempo se puede aumentar de acuerdo con las reglas sugeridas anteriormente. Como se describe en [4] el crecimiento del tamaño de las partículas también debe tenerse en cuenta en los modelos físicos. Sin embargo, no todos los modelos pueden ser estrictamente combinados con coarse graining y por lo tanto el analista debe tener cuidado con esto.

4. CALIBRACIÓN DEM

Los parámetros DEM deben calibrarse en función de los medios granulares estudiados y de la aplicación que debe simularse. Así pues, la etapa de validación de un modelo DEM es necesaria para comprobar la sostenibilidad de las características del modelo a la hora de reproducir el comportamiento real del sistema. No existe una regla general para elegir y calibrar el modelo DEM adecuado y los valores de sus parámetros. Según la aplicación, un modelo puede ajustarse o no a las necesidades requeridas. Si el objetivo de la simulación es la compresión en frío de baldosas, se debe utilizar un modelo cohesivo específico, mientras que el mismo polvo en condiciones de tensión cero puede no requerir ningún modelo cohesivo.

La elección y calibración del modelo de contacto es un punto clave para obtener resultados de simulación cercanos a los reales. A continuación, se resumen las características del modelo utilizado en este trabajo:

- Forma y tamaño de las partículas. El material estudiado es polvo cerámico secado por atomización para la producción de gres porcelánico obtenido mediante un proceso de atomización. Puede decirse que el polvo atomizado es casi esférico, por lo que es apropiado representar los gránulos simulados como esferas (por ejemplo, Figura 1). Esta suposición conduce a un modelo más simple y a un menor esfuerzo computacional. En la Figura 1 se representa una distribución de tamaños de partícula típica, DTP, de las partículas estudiadas: los resultados experimentales de tamizado se pueden modelizar como los 2 parámetros de la distribución másica de Weibull (consultar [5] para los detalles matemáticos).

El parámetro de escala es generalmente de alrededor de 350-400 μm y el parámetro de forma de alrededor de 2,5 - 3. Teniendo en cuenta estas DTP, el análisis DEM que trata con el proceso real tiene que elegir un límite inferior para el tamaño de partícula que es en realidad mayor que las partículas más pequeñas reales. Esto conduce a una primera aproximación que es necesaria para tratar con sistemas de partículas grandes.

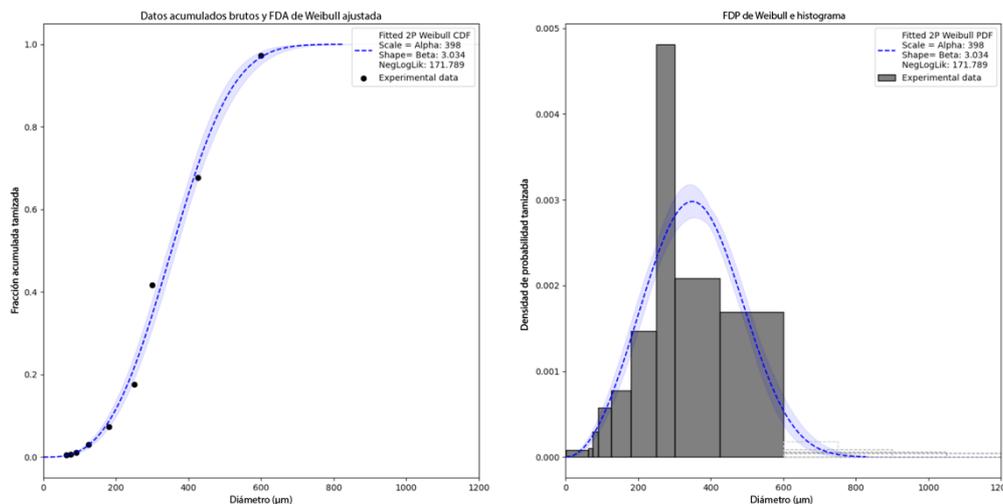


Figura 1 Imagen de microscopio (izquierda) y DTP típica de un polvo atomizado (derecha) [6]

- Modelo de contacto partículas-partículas. El polvo atomizado cerámico puede considerarse como un material de flujo libre según la clasificación de Jenike [7]. Esta afirmación ha sido demostrada por Amoros et al [8] y en la Figura 2 se muestran resultados similares. En ella se muestran los resultados del ensayo de cizalla para algunos polvos atomizados cerámicos con diferentes contenidos de agua (HR). De acuerdo con estas evidencias experimentales y en aras de la simplicidad, en el presente trabajo no se utiliza ningún modelo de cohesión para aquellas aplicaciones que tienen que ver con la manipulación de polvo atomizado cerámico. El modelo de contacto elegido para estas aplicaciones es el denominado modelo viscoelástico no lineal o modelo de Hertz-Mindlin.

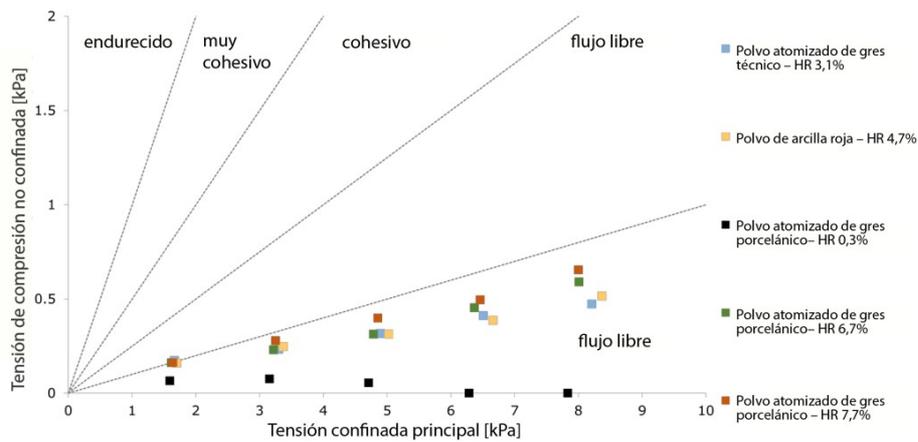


Figura 2 Resultados del ensayo de cizalla de diferentes polvos atomizados cerámicos con diferentes contenidos de humedad. Clasificación según el trabajo de Jenike [7].

- Modelo de contacto partículas-pared. Se utiliza el mismo modelo Hertz-Mindlin elegido para el contacto partículas-partículas. Si se utilizan diferentes materiales en la pared de las aplicaciones, entonces se podrían utilizar diferentes modelos de contacto. El modelo elegido se adapta bien a los materiales típicos de las paredes utilizados en las aplicaciones de manipulación de polvos cerámicos.
- Modelo de fricción por rodadura. En los sistemas físicos reales, la pérdida de energía debida a la rodadura está relacionada con los mecanismos que contribuyen a la histéresis en el punto de contacto y los efectos de forma. La forma es un aspecto costoso de modelizar en DEM: aunque las partículas estudiadas pueden considerarse fácilmente cercanas a esferas, no son esferas perfectas. La resistencia a la rodadura es, por tanto, un aspecto a tener en cuenta en la simulación. El modelo utilizado en este estudio es un modelo de rozamiento por rodadura ampliamente utilizado: el modelo elástico-plástico de muelle-manguito con un único parámetro [9]
- Coarse graining. No se ha demostrado que el coarse graining acoplado al modelo de rozamiento por rodadura elegido proporcione resultados consistentes. Sin embargo, el uso de la combinación de estos dos modelos proporciona resultados macroscópicos cercanos a las expectativas reales.

Tras elegir los modelos de simulación, hay que definir todos los parámetros de los modelos para terminar con resultados viables. A pesar de la importancia crucial de elegir los parámetros correctos, no existe una forma común reconocida de hacerlo. Especialmente cuando se trata de materiales cohesivos, hay muchos trabajos académicos sobre la calibración de modelos. En [10] y [11] los autores revisaron los procedimientos de calibración de DEM y en [12] hay un ejemplo de calibración de DEM aplicado a baldosas cerámicas. A continuación, describimos el enfoque que hemos seguido para el presente estudio.

Una vez fijada la forma y el tamaño de las partículas, los citados modelos utilizados requieren definir los siguientes parámetros: densidad de las partículas, ρ_p , módulo de Young de las partículas, Y_p , coeficiente de Poisson de las partículas, ν_p , coeficiente de fricción partículas-partículas, $c_{f_{pp}}$, coeficiente de restitución partículas-partículas, cr_{pp} , coeficiente de rozamiento por rodadura partículas-partículas, $cr_{f_{pp}}$, coeficiente de fricción partículas-pared, $c_{f_{pH}}$, coeficiente de restitución partículas-pared, cr_{pH} , coeficiente de rozamiento por rodadura partículas-pared, $cr_{f_{pH}}$. Si bien Y_p y ν_p pueden ser elegidos directamente por el analista para tener el paso de tiempo computacional correcto sin gran influencia en los resultados de las aplicaciones consideradas, todos los demás parámetros son desconocidos. No existe ninguna medición directa de estos parámetros: una forma de fijar sus valores es realizar algunas pruebas macroscópicas y reproducirlas en el DEM cambiando estos parámetros. En el contexto actual, calibrar significa resolver un problema de optimización en el que las variables de entrada son los citados parámetros del modelo, mientras que las variables de salida son las diferencias entre los resultados experimentales y los simulados. Está bien establecido en la comunidad DEM que se necesitan más pruebas para describir completamente los modelos utilizados. Es difícil encontrar un único experimento capaz de proporcionar suficientes resultados relevantes para calibrar todos los parámetros de los modelos DEM. En el presente estudio se han utilizado los siguientes experimentos para realizar la calibración:

Ángulo de reposo estático: es un experimento muy utilizado para caracterizar materiales granulares [13] y encontrar parámetros DEM. El montaje utilizado es un sistema de cilindro elevador hueco y se muestra en la Figura 3 (izquierda). El montaje consiste en un cilindro hueco que se coloca sobre una base circular. Se llena de polvo y se eleva. La base circular gira y una cámara recoge imágenes del cúmulo para determinar los resultados del experimento mediante un análisis automático de imágenes.

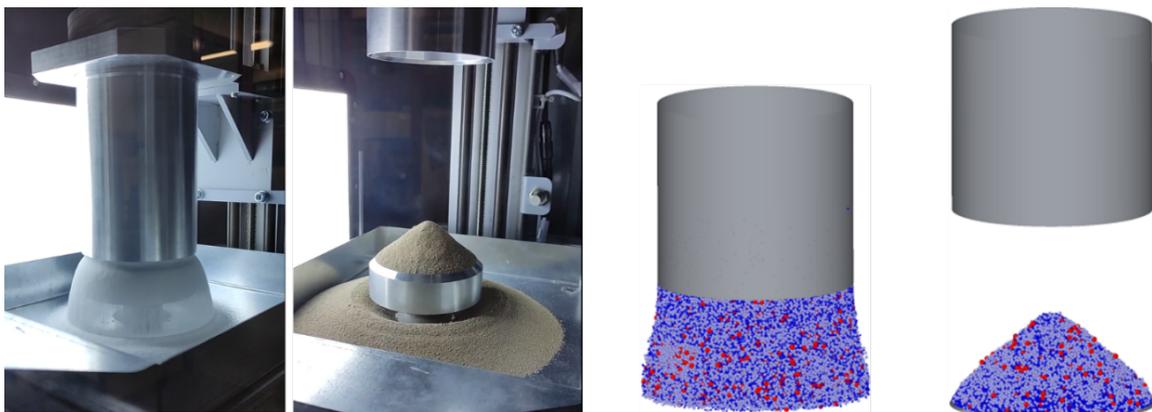


Figura 3 Secuencia experimental de ángulo de reposo estático (izquierda) y resultados DEM (derecha)

Ángulo de reposo dinámico: la máquina utilizada es un tambor de vidrio que puede girar a diferentes velocidades, como se muestra en la Figura 4. Durante la rotación, una cámara recoge imágenes y el análisis automático de imágenes de la interfaz aire/material proporciona los resultados del experimento.

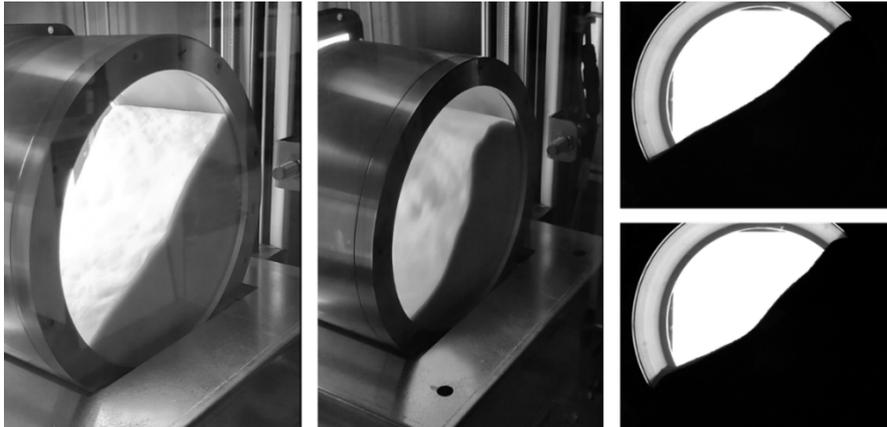
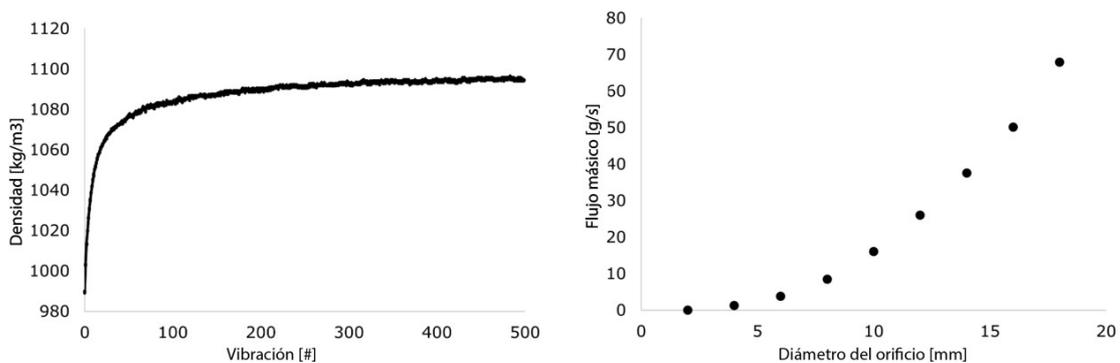


Figura 4 Montaje experimental del ángulo de reposo dinámico a diferentes velocidades

Densidad vibrada: es una prueba estándar para caracterizar materiales granulares. A pesar de los instrumentos comunes de densidad vibrada, la configuración utilizada mide automáticamente el volumen de polvo. Proporciona la curva completa del experimento de vibrado, como se muestra en la Figura 5 (izquierda) por lo que pueden obtenerse diferentes resultados (p. ej., densidad aparente, densidad vibrada, índice de Hausner ...).

Flujo de descarga: la medición del flujo a través de un orificio es una forma clásica de definir la fluidez del polvo. La configuración utilizada permite probar diferentes tamaños de orificio y medir automáticamente el caudal másico para obtener resultados como los de la Figura 5 (derecha).



Pared inclinada: la medición del ángulo de deslizamiento de una pared inclinada de un determinado material es una forma grosera de estimar la interacción partículas-pared. El ensayo de fricción de pared también puede utilizarse para calibrar diferentes partículas-pared.

Se pueden seguir diferentes estrategias de calibración. La más directa consiste en realizar una optimización directa para encontrar el mejor conjunto de parámetros de acuerdo con los resultados experimentales para un determinado polvo.

Otra se basa en la creación de superficies de respuesta para las salidas de las simulaciones y luego encontrar el mejor conjunto optimizando las entradas de acuerdo con estas superficies. El segundo enfoque requiere más simulaciones para encontrar las superficies de respuesta, pero la optimización es inmediata. Este segundo enfoque puede utilizarse para diferentes polvos hasta que la DTP utilizada en la simulación sea representativa de la DTP real del polvo. Un ejemplo típico es considerar el mismo polvo con diferentes contenidos de humedad. Una vez obtenido el conjunto óptimo de parámetros del modelo DEM, es posible validarlo en las aplicaciones reales.

5. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

La decoración en masa implica diferentes etapas de manipulación del polvo atomizado: aquí se ofrecen ejemplos de simulaciones DEM de algunas aplicaciones relevantes.

Sistema de descarga piezoeléctrico digital

Un sistema digital de descarga de decoración en seco está compuesto por una tolva y varias puntas piezoeléctricas. La vibración se induce en las puntas para descargar el polvo correctamente en la cinta inferior. La vibración de las puntas se activa en función del efecto gráfico deseado. El estudio del flujo dentro de la tolva del sistema es crucial para identificar la mejor geometría para alcanzar los requisitos deseados en términos de productividad y definición de la decoración. El sistema estudiado se representa en la Figura 6 (izquierda): la punta en verde, la tolva en negro y la zona de medición del caudal másico en rojo. El dominio de simulación es periódico en dirección Z para reducir el tiempo de cálculo: en realidad sólo se simula una punta, pero los resultados reflejan la situación de todas las puntas trabajando juntas. El color de las partículas de la Figura 6 (izquierda) representa su radio. Al cambiar la geometría de la tolva, cambia el flujo másico descargado. Como se muestra en la Figura 6 (derecha) se consigue una buena concordancia entre el caudal másico experimental y el simulado.

El caudal másico es un KPI (indicador clave de rendimiento) de la aplicación actual y gracias al análisis DEM se puede predecir la eficiencia de diferentes geometrías.

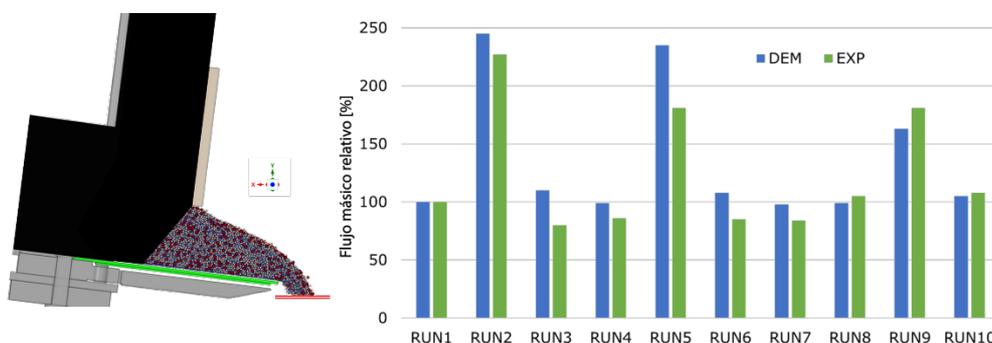


Figura 6 Resultados de la simulación durante la fase de descarga (izquierda) y comparación de los resultados experimentales y de simulación en términos de caudal másico relativo (derecha).

Sistema digital de alimentación de polvo en masa

Un sistema digital de alimentación de polvo en masa se compone de diferentes tolvas que alimentan diferentes polvos. Cada tolva termina en el mismo enlace común gracias a un sistema automático de actuadores móviles que es crucial para la definición de la veta. Uno de los KPI para diseñar este sistema es la capacidad de proporcionar un flujo másico determinado constante a pesar de considerar un polvo u otro. Gracias a la simulación DEM ha sido posible cuantificar este flujo másico y elegir el mejor diseño en función de los requisitos de diseño. Una vez identificada una región objetivo de descarga, la variable *objetivo* se define como sigue:

$$\text{objetivo} = 1 - \frac{m_{\text{total}} - m_{\text{objetivo}}}{m_{\text{total}}}$$

donde m_{total} es la masa total descargada y m_{objetivo} es la masa descargada en la región objetivo. Un objetivo de diseño era alimentar toda la masa en la región objetivo, en otras palabras, tener el *objetivo* cercano a 1 durante toda la fase de descarga. En la Figura 7 se muestran los resultados de tres actuadores simulados diferentes en términos de *objetivo* durante el ciclo de alimentación. El ciclo de alimentación comienza en 0 s y termina en 1 s. Las simulaciones DEM mostraron que el actuador correspondiente a la línea verde presenta un mejor rendimiento que los otros dos actuadores.

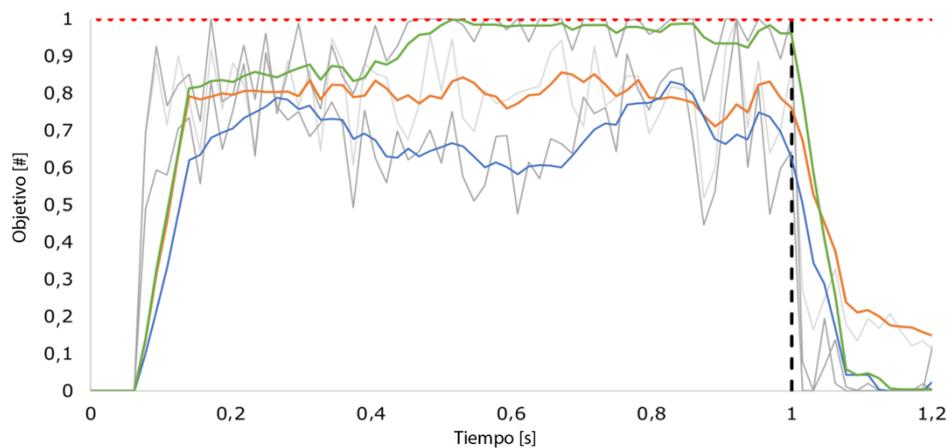


Figura 7 Salida del objetivo en función del tiempo para tres actuadores diferentes. En gris los datos puntuales, en color los valores medios promediados.

Sistema de transporte de polvo

Se utilizan diferentes sistemas para transportar el lecho de polvo en la línea cerámica. Su diseño y funcionamiento afectan a la forma y calidad de la veta. En la Figura 8 se muestra un ejemplo de un aparato de este tipo. La simulación de este tipo de aparato implica alrededor de un millón de partículas una vez que el dominio físico se limita a un dominio periódico de 5 mm.

Para seguir la evolución de la veta a lo largo de todo el proceso hay que simular muchos segundos físicos. Esta duración, junto con el número de partículas implicadas, da lugar a tiempos de cálculo demasiado largos para ajustarse a los requisitos de temporización del diseño. Gracias al hecho de que el "campo de flujo" de las partículas alcanza una condición de estado estacionario después de unos segundos, sólo estos segundos se simulan con DEM. La evolución de la veta a lo largo de todo el proceso se obtiene así gracias a una proyección hacia delante de la posición inicial de la veta según el campo granular estacionario [14].

Se trata de un enfoque "heurístico" que funciona bien en condiciones de estado estacionario ya que, aunque un determinado proceso sea largo, no genera nueva información si es estadísticamente estacionario.



Figura 8 Ejemplo de deformación de la veta en masa debida al transporte.

6. CONCLUSIONES

Los DEM representan una técnica de vanguardia para modelizar materiales granulares. Su aplicación a escalas industriales sigue planteando algunos problemas en términos de tiempo de cálculo y esfuerzos de calibración, que es un punto clave para acabar con resultados fiables. Las etapas de manipulación de polvos del proceso de fabricación de productos cerámicos pueden virtualizarse mediante DEM una vez que los materiales implicados están bien caracterizados desde el punto de vista DEM. Se ha descrito una estrategia de calibración junto con algunos ejemplos de aplicación para la decoración en masa. El diseño del proceso para láminas con decoración sincronizada en masa/superficial puede explotar la potencia de la virtualización física para acabar con el mejor diseño posible.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. A. Cundall and O. Strack, "A discrete numerical model for granular assemblies," *Géotechnique*, vol. 29, no. 1, pp. 47-65, March 1979.
- [2] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Fluid Mechanics*, Second edition ed., Volume 6 of Course of theoretical physics, Pergamon Press.
- [3] P. A. Cundall and R. Hart, "Numerical modelling of discontinua," *Engineering computations*, 1992.
- [4] Y. T. Feng and D. R. J. Owen, "Discrete element modelling of large scale particle systems-I: exact scaling laws," *Computational Particle Mechanics*, vol. 1, pp. 159 - 168, 2014.
- [5] W. Meeker, L. Escobar and F. Pascual, *Statistical Methods for Reliability Data*, 2021.
- [6] SACMI, *Tecnologia Ceramica Piastrelle*, II ed., vol. 2, 2022.
- [7] A. W. Jenike, "Storage and flow of solids," *Bulletin No. 123*, vol. 53, no. 26, November 1964.
- [8] J. L. Amorós, G. Mallol, B. Campos, M. J. Orts and M. C. Bordes, "Study of the rheological behaviour of different ceramic powder materials," in *Qualicer*, Castellón, 2008.
- [9] K. Iwashita and M. Oda, "Rolling Resistance at Contacts in Simulation of Shear Band Development by DEM," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 124, no. 3, p. 285-292, 1998.
- [10] C. J. Coetzee, "Review: Calibration of the Discrete Element Method," *Powder Technology*, vol. 310, pp. 104-142, 2017.
- [11] C. J. Coetzee and O. C. Scheffler, "Review: The Calibration of DEM Parameters for the Bulk Modelling of Cohesive Materials," *Processes*, vol. 11, no. 1, 2022.
- [12] J. M. Tiscar, A. Escrig, G. Mallol, J. Boix and F. A. Gilabert, "DEM-based modelling framework for spray-dried powders in ceramic tiles industry. Part I: Calibration procedure," *Powder Technology*, vol. 356, p. 818-831, 2019.
- [13] H. M. Al-Hashemi and O. Al-Amoudi, "A review on the angle of repose of granular materials," *Powder Technology*, vol. 330, pp. 397-417, 2018.
- [14] A. König, "Residence time calculation algorithm for long-duration processes," in *Aspherix and CFDEM Conference*, 2023.