

- 30 -

613-7 LA TECNICA DE LA FLUIDIFICACION APLICADA A LAS INDUSTRIAS DE LA CAL  
Y DEL CEMENTO.

(Fluidisation Applied to the Lime and Cement Industries)

W. G. Bauer.

De: "CEMENT AND LIME MANUFACTURE", 33, marzo 1950.

---

En alguna otra ocasión, se ha dado cabida en las páginas de Últimos Avances, a ciertas aplicaciones prácticas de la fluidificación de sólidos, tales como el transporte neumático de cemento y la fabricación de cal viva. La "fluidificación" es, en esencia, el fenómeno físico por el cual una masa o lecho de un sólido en forma granular, agitado con aire a presión se comporta, en ciertos aspectos, como un líquido, o mejor dicho, como un fluido. Las aplicaciones de los sólidos fluidificados a las técnicas del cracking y reforming en la industria del petróleo son sobradamente conocidas. También se han aplicado a la calcinación de la piedra caliza, desecación de minerales y arena, regeneración de granos y polvos reactivos, desulfuración de las menas y otros, con todo éxito.

Los aerosoles, de aplicación en las técnicas de pulverización de sólidos y líquidos, son suspensiones de partículas en el seno de un fluido. Estas suspensiones sólido-fluido cumplen algunas de las leyes que rigen el movimiento de los fluidos y en algunas ocasiones, el cambio de fluidez con la temperatura, forma, tamaño y peso específico de las partículas suspendidas es más considerable cuando el medio es un gas que cuando se trata de un líquido. Cuando una corriente de gas atraviesa un lecho de un sólido granulado depositado sobre una parrilla, hay una caída de presión en el gas, proporcional al espesor del lecho y que varía con el cuadrado de la velocidad del fluido hasta un estado límite en el cual las partículas comienzan a desplazarse debido a la fuerza ascensional de la corriente gaseosa. Cuando la velocidad de paso

- INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO -

del gas aumenta, llega un momento que la presión ejercida sobre las partículas es ligeramente superior al peso propio de las mismas, con lo cual se inicia el movimiento de cada gránulo deslizándose sobre los adyacentes e incrementándose los espacios existentes entre las partículas sólidas. Se obtiene así una masa gas-sólido que se comporta, a todos los efectos, como un líquido. Puede parecer extraño que, al aumentar la velocidad de paso del gas no se produzca un "arrastre" de las partículas. Esto es debido a que, por el paso del fluido a través de los orificios de la parrilla donde descansa el sólido granular, la corriente gaseosa se divide en numerosos "chorros" que pasan entre las partículas. Al pasar entre dos partículas muy próximas, la velocidad de paso aumenta, con lo cual se produce un pequeño arrastre y desplazamiento. Pero cuando éstas dos partículas se separan más, la velocidad del gas disminuye (por aumento de la sección del "tubo artificial" así formado), siendo incapaz la masa gaseosa de arrastrar al sólido. El canalillo de gas alcanza después a otras dos partículas inmediatas, produciéndose el mismo fenómeno. Todos estos movimientos y desplazamientos parciales tienen como consecuencia "esponjar" artificialmente la masa sólida, disminuir la cohesión interpartícula, aumentar el volumen aparente del lecho de gránulos y, en definitiva, airear o gasear la masa, es decir fluidificarla haciendo que se adapte a las paredes del recipiente que la contiene, que pueda transportarse por tuberías, en una palabra, que se comporte como un fluido. Esta es la explicación elemental de la fluidificación.

De lo anteriormente expuesto se deduce inmediatamente que, aunque la velocidad del gas sea menor que la velocidad necesaria para el desplazamiento, que llamaremos "velocidad crítica", puede verificarse la fluidificación, debido a unos incrementos locales en dicha velocidad en algunas zonas o canales del lecho de partículas, que puedan favorecer la formación de un tubo capilar de sección muy pequeña. Es lógico que, al aumentar la velocidad del gas, la masa sólido-fluido aumente de volumen aparente, disminuyendo su densidad. Al alcanzarse una cierta velocidad, que llamaremos "de desprendimiento", la fuerza del gas puede ser suficiente para separar por arrastre las partículas con lo cual se pierden las propiedades típicas del sólido fluidificado.

- INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO -

Los experimentos de Mr. Bauer muestran que la velocidad límite de una partícula que cae en el seno de un gas en reposo, cuando dicha partícula es muy pequeña (tamaño inferior a  $100 \mu$ ), y la velocidad es menor que 33,5 m/minuto, viene dada por la conocida ley de Stokes:

$$v = \frac{gD^2s}{18\mu}$$

en la que se ve que dicha velocidad es proporcional al cuadrado el diámetro (D) de la partícula; (g) es la aceleración de la gravedad, (S) la densidad de las partículas de sólido y  $\mu$  la viscosidad del gas en países (0,00018 para el aire). Las partículas de cemento y cal molidas son de tamaño inferior a los  $100 \mu$  y por tanto caen dentro de esta ley.

Cuando el diámetro medio de las partículas está comprendido entre 100 y  $1.500 \mu$ , como ocurre con la arena y otros sólidos granulados, y las velocidades están comprendidas entre 33,5 y 335 m/minuto, tienen lugar algunas alteraciones y desorden en la masa y la velocidad viene a ser casi directamente proporcional al diámetro (D). Se aplica entonces la ley de Allen:

$$v = \frac{0,15D (gS)^{2/3}}{p^{1/3}}$$

en la que las letras tienen el mismo significado que anteriormente y  $p$  es la densidad del gas (0,00123 para el aire). Para velocidades mayores, cuando ya tienen lugar flujos turbulentos se sigue la ley de Newton:

$$v = \frac{1,74(gDS)^{1/2}}{P}$$

que es válida para velocidades de 350 a 1.828 m/minuto y tamaños de partícula de 1.500 a 10.000.

Las tres fórmulas anteriores representan las velocidades límites de

las partículas sólidas cayendo en el seno de un gas en reposo, pero las consideraciones mencionadas pueden aplicarse íntegramente al caso inverso, es decir, a las partículas sólidas en reposo y al gas en movimiento. Las fuerzas que actúan sobre una partícula libremente suspendida en un gas en movimiento, son: la fuerza de la gravedad (hacia abajo), el roce o fricción y el impacto del gas sobre las partículas (hacia arriba) y la flotación, es decir, la fuerza hacia abajo debida al desplazamiento del fluido. Si estas fuerzas no se encuentran en equilibrio, las partículas se mueven hacia arriba o hacia abajo, (en el caso de una corriente vertical). La fluidificación viene controlada por la relación de las fuerzas que actúan sobre las partículas; las velocidades resultantes y las presiones debidas a la fricción son los efectos medios de las alteraciones producidas por las partículas colindantes.

Veamos, desde el punto de vista práctico, como se comportan un lecho de sólido estático y un lecho fluidificado. Cuando un gas pasa a través de una "lámina" de un sólido pulverizado, hay una pérdida de presión en el flujo gaseoso que es inversamente proporcional al tamaño de las partículas y a su superficie específica (fundamento del permeabilímetro) y que varía como el cuadrado de la velocidad del gas, dentro de ciertos límites (los usuales en los cambiadores de calor, hornos, etc.). La resistencia al paso del gas también depende de la densidad de éste que, como es natural, es función inversa de la temperatura absoluta (dilatación térmica). Si el flujo de gas se expresa, no en velocidades lineales sino en unidades de masa que pasan en el tiempo unidad por  $\text{cm}^2$  de sección útil, la temperatura y la densidad no afectan al cálculo de la resistencia al paso del gas. Hay que tener en cuenta que el área transversal útil en un lecho de partículas sólidas más o menos apelmazadas, es solamente un 10-20 % del área total. Esto es debido a que una gran parte de los huecos existentes son inactivos desde el punto de vista del flujo puesto que forman bolsas, cámaras cerradas y puntos muertos. Por ello la velocidad lineal del gas es más elevada que si todos los huecos formasen canales continuos para el flujo. Al incrementarse la velocidad hasta el punto en que se inicia el desplazamiento de las partículas, tiene lugar una marcada caída de presión, debido a la expansión instantánea de los espacios in-

terpartícula que hacen de canales de paso. El lecho deja entonces de ser - estático y el volumen de la masa aparente de sólido aumentan momentáneamente en un 25% en números redondos. Hemos pasado al sólido fluidificado. Si se quiere mantener la fluidificación basta sostener una presión gaseosa ligeramente inferior a la de desplazamiento puesto que ya se ha provocado el "desprendimiento" de las partículas y solo es preciso mantenerlas en tal estado.

La presión necesaria para mantener la fluidificación, a velocidad de paso de gas constante, varía en razón directa del espesor del lecho y es independiente del tamaño de las partículas, puesto que depende solamente de la densidad aparente, la cual, para materiales bien granulometrados, es bastante independiente de dicho tamaño. Aquí puede verse una diferencia radical entre el comportamiento del lecho fluido y el del estático, puesto que - en éste último la dimensión de las partículas es fundamental para el cálculo de la pérdida de presión. Una diferencia considerable entre ambos estados - sólidos, sólido-fluidificado y sólido-estático, se encuentra también en lo que refiere a la transmisión del calor. Cuando se enfría un lecho estático por paso de gas frío a su través, la transmisión térmica varía con la potencia 0,7 del gasto (en volumen), la potencia 0,3 de la temperatura absoluta - del gas y en proporción inversa a la potencia 0,9 del tamaño de la partícula. En un lecho fluidificado la transmisión del calor varía, probablemente, con relación a una potencia superior a 0,7 del gasto, pero la transmisión térmica por radiación puede ser menor que un lecho estático debido al efecto de "sombra" ejercido por las nieblas de partículas pequeñas que interfieren el paso de las radiaciones a través de la masa.

Para la fluidificación hay tres procedimientos principales: corriente ascendente, corriente descendente y flujo en conductos abiertos. Las denominaciones se refieren al paso del gas por y a través del sólido pulverizado. El método a elegir depende, aparte de otras cosas, del objeto que se - persiga en el proceso, volumen de gas empleado, tiempo requerido para la fluidificación, propiedades físicas del material sólido, etc. Así por ejemplo, cuando se pretende una desintegración, como ocurre en el apagado de la cal vi

va pulverizada, el aparato empleado en la fluidificación puede servir también como separador de las partículas hidratadas de las que aún no han reaccionado con el agua.

En cuanto a las aplicaciones de la fluidificación, aparte de las ya mencionadas en las páginas de este Boletín (Número 6, págs. 12 y 20), menciona Mr. Bauer, la separación de núcleos, es decir, partes no cocidas, en la industria calera y la calefacción por aire caliente. En este último caso, se trata de un intercambio de calor entre una corriente de aire frío que atraviesa un lecho fluidificado y el sólido mismo que está caliente. Se incluyen en el trabajo original tres esquemas correspondientes a otros tantos aparatos.

---