

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Materiales

- La muestra de polvo de papel que se analizó fue proporcionada por Compañía Procter & Gamble México, S. de R.L. de C.V. proveniente de la nave del proceso seco de su fábrica de papel "tissue".
- El fluido que se utilizó para suspender las partículas y simular su arrastre fue aire.
- Se empleó una cámara de video, una videocasetera y una televisión para capturar y grabar las imágenes.
- Se utilizó un termómetro de mercurio para tomar la temperatura de la corriente de aire a la salida del tubo.
- Se utilizó una balanza de precisión para la determinación de la densidad de las partículas.

4.2 Métodos

4.2.1 Selección del método de medición de partículas.

El primer intento que se hizo para estimar el tamaño de las partículas fue con tamices, pero la muestra se aglutinaba en grandes grumos y se pegaba en las mallas. Después se seleccionó el método de microscopía debido a que es sencillo y permite una muy buena observación directa de la forma y el tamaño de partículas fijas. Se tomaron algunas vistas del polvo en un microscopio con cámara digital integrada, ésta manda las imágenes directamente a una computadora que cuenta con un programa que permite realizar mediciones de las partículas directamente en micrómetros. Se obtuvieron imágenes como las que se muestran en la figura 7. La mayor parte de las fibras se encontraban en cúmulos como el que se observa en (a), o más densos, lo que hacía imposible su medición. Eventualmente se encontraban fibras aisladas como en (b), con la cual sí fue posible realizar algunas mediciones, que a final de cuentas resultaron poco significativas.

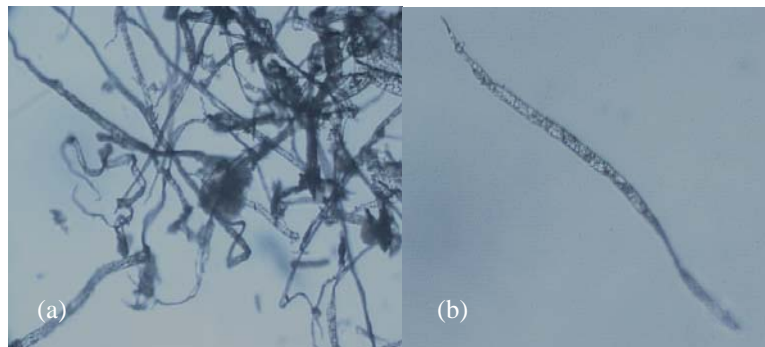


Figura 7. Partículas de polvo de papel observadas al microscopio.
(a) Cúmulo de partículas. (b) Fibra aislada.

Aunque estas imágenes dan una buena descripción de la forma de las partículas, no permiten un estudio de distribución de tamaño, ni representan el comportamiento ni la aglomeración natural del polvo en el ambiente. Debido a esto se pensó en un método similar a la microscopía, pero que permitiera observar a las partículas en estado fluidizado, y no estático como en el microscopio, de tal forma que se pudiera apreciar la forma natural de dispersión y aglomeración del polvo.

4.2.2 Diseño y construcción del sistema simulado de extracción y observación de partículas.

Se montó un equipo de fluidización de partículas que consta de un tubo graduado con un distribuidor de aire en el fondo, un rotámetro para medir el flujo de aire que se suministra y una trampa de aceite para evitar que el aceite que se fuga del compresor afecte al sistema. En el apéndice B se muestran imágenes del equipo utilizado.

La muestra se coloca en el fondo del tubo sobre el distribuidor, y una cámara toma imágenes de las partículas a diferentes alturas de la columna, y a diferentes flujos de aire. La cámara manda la señal a una videocasetera que graba en un casete las imágenes que se desea analizar, las cuales se pueden observar en un monitor.

Se cuenta con dos tubos graduados de diferentes diámetros: $1\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ ", con esto se podrá observar el efecto que tiene el diámetro del conducto en el arrastre de las partículas.

4.2.3 Diseño de experimento

Se manejaron tres variables: altura, diámetro de la columna y flujo de aire, por lo que se realizaron 18 tomas de imágenes a diferentes condiciones según se muestra en la tabla 1. Los flujos de aire se eligieron en base a las condiciones observadas en el tubo de 1½", el de 30 SCFH era el flujo mínimo a partir del cual se tenía un arrastre significativo que permitía observar las partículas a diferentes alturas, y el de 50 SCFH era el flujo máximo que mantenía a las partículas en suspensión, flujos más grandes arrastraban toda la muestra aglutinada a lo largo del tubo, como si fuera un tapón ascendente. Se midió la temperatura de la corriente de aire a la salida del tubo al realizar cada toma, y también se obtuvo la presión barométrica; esto es importante ya que los datos de temperatura y presión son necesarios para calcular la densidad y viscosidad del aire a las condiciones a las que se llevó a cabo el experimento. Estos cálculos se realizaron con ayuda del simulador HYSIS. Primero se comprobó que los resultados obtenidos con el simulador fueran confiables, de tal forma que se calcularon, con el simulador, densidades y viscosidades conocidas, y se compararon los resultados. Al no haber una diferencia muy significativa entre los valores conocidos y los calculados se concluyó que era confiable utilizar esta herramienta para obtener las propiedades del aire a las condiciones del laboratorio.

5.2.4 Análisis de las imágenes obtenidas

Las imágenes obtenidas por la cámara y grabadas en un videocasete, se digitalizaron acoplando la reproductora de video a una computadora que cuenta con el programa de cómputo Píxel View Station V4.22 TV, que permite digitalizar las imágenes observadas.

Tabla I. Matriz de experimentos.

Toma No.	Diámetro del tubo (in)	Altura (in)	Flujo de aire (SCFH)
1	1½	3	30
2			40
3			50
4		6	30
5			40
6			50
7		10	30
8			40
9			50
10	¾	3	30
11			40
12			50
13		6	30
14			40
15			50
16		10	30
17			40
18			50

Para realizar la medición de las partículas presentes en las imágenes digitalizadas se utilizó el programa Adobe Photoshop en su versión 7.0. Primero se mejoró la calidad de las imágenes eliminando el ruido, ajustando el brillo y el contraste, y acentuando los contornos de las partículas presentes en las imágenes, para hacer más sencilla y precisa su medición. Sobre las imágenes mejoradas se realizaron tres tipos de mediciones diferentes, para las partículas pequeñas y esféricas se midió el diámetro, para las fibras se midió ancho y largo, y se estimó el diámetro de una esfera de volumen equivalente a un cilindro (Ec. 3), para las partículas irregulares se midieron tres diámetros, el de Martin (d_M), el de Feret (d_F) y el diámetro de la esfera de equivalente al área proyectada (d_a); los cúmulos de partículas se tomaron como una sola partícula irregular, ya que se consideró que se comportan de esta

forma en su arrastre. Todas las bisectrices y las tangentes necesarias para obtener los diámetros de Martin y Feret respectivamente se trazaron en una misma dirección para todas las partículas y cúmulos; la dirección elegida fue la horizontal con respecto a la base de la imagen, debido a que es fácil de reproducir para todas las mediciones. En la figura 8 se ilustran los trazos que se hicieron para tomar las medidas necesarias de cada partícula.

Todas las medidas se tomaron en píxeles, debido a que, aunque el programa permite medir en unidades de longitud directamente, estas medidas no resultan ser las dimensiones reales de las partículas, ya que hay que tomar en cuenta la distancia a la que fueron tomadas y la magnificación que les proporciona el lente de la cámara, la cual no es conocida en números. Para obtener las dimensiones reales en micras se incluyó la escala de la columna dentro de las tomas de las imágenes, se midió sobre la imagen la distancia entre las dos líneas de la escala en píxeles, y como su dimensión real, en unidades de longitud, es conocida, se obtuvo un factor de conversión que al multiplicarse por las medidas obtenidas en píxeles, permitió conocer su valor real en micras.

4.2.5 Análisis estadístico de tamaño de partícula

Para obtener la distribución del tamaño de las partículas se utilizó el programa Minitab for Windows. Para cada imagen se introdujeron los datos correspondientes a los diferentes diámetros medidos de todas las partículas y cúmulos presentes, y se obtuvieron la media, la mediana, la desviación estándar, el histograma y la distribución normal del tamaño de las partículas. Todos estos resultados se presentan en el apéndice C.

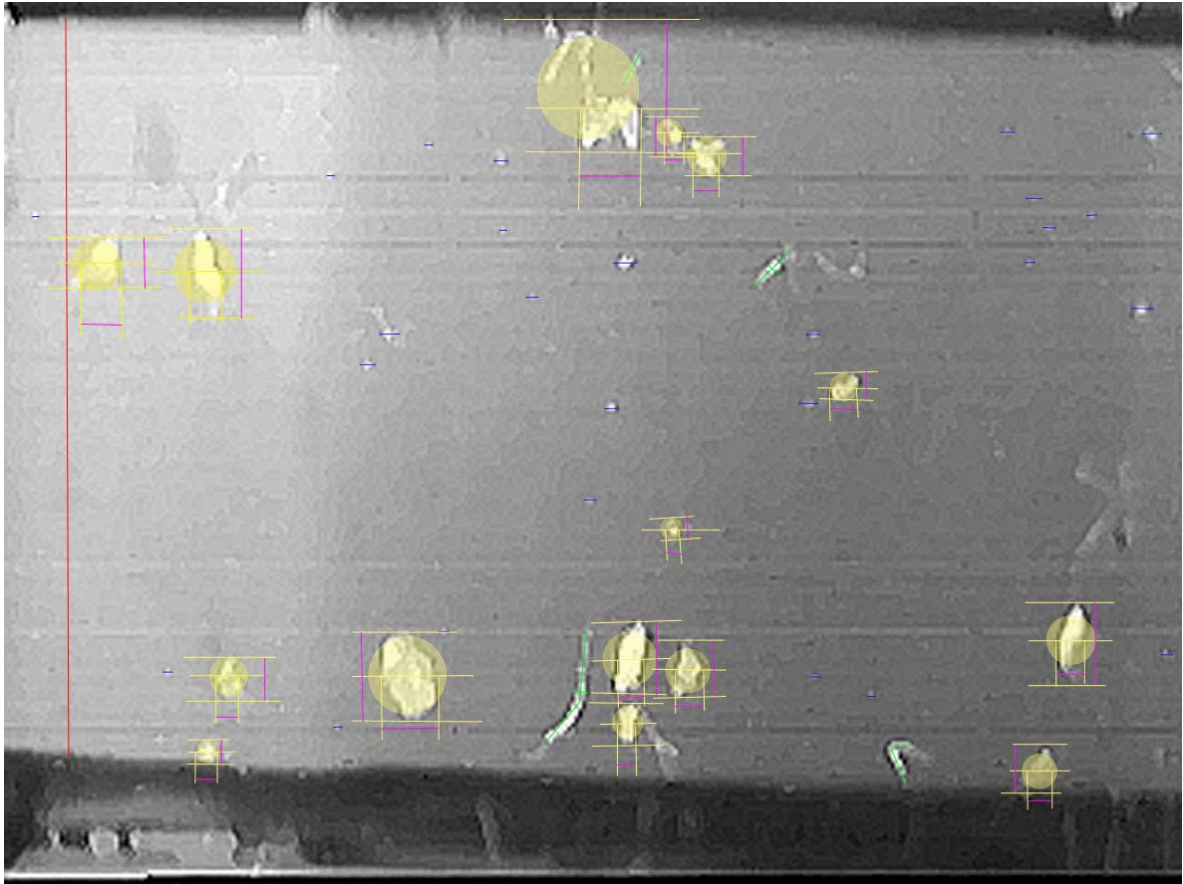


Figura 8. Imagen Obtenida a 3” de altura y 30 SCFH de flujo, donde se muestran los trazos efectuados para la medición de las partículas. La línea roja de la izquierda representa la distancia que existe entre las líneas de la escala del tubo. Las líneas azules representan el diámetro de las partículas esféricas. Las líneas amarillas son las bisectrices y las tangentes necesarias para obtener d_M y d_F , las líneas rosas horizontales representan la distancia equivalente al d_M y las verticales al d_F . Las líneas verdes marcan la longitud y el diámetro de las fibras, y los círculos amarillos representan la proyección de la esfera equivalente a la partícula.

4.2.6 Determinación de la densidad de las partículas

Para obtener un valor de densidad de las partículas se puso un tubo capilar, de dimensiones conocidas, a peso constante. Esto se logró pesando el tubo, secándolo en una estufa por 15 minutos, dejando que enfriara por otros 15 minutos en un secador y pesando de nuevo, este

procedimiento se repitió hasta que la diferencia entre la primera pesada y la segunda fue menor a 0.0002 gramos.

El tubo capilar es muy frágil, y si se rompe es fácil que los pedazos de vidrio puedan saltar y provocar lesiones en los ojos y en las manos, por lo que es importante utilizar lentes de seguridad y guantes. Estos últimos también previenen que el tubo se contamine con la grasa de los dedos, la cual produce un error si se encuentra presente al realizar el pesaje.

Una vez que el capilar estuvo a peso constante se procedió a rellenarlo con la muestra de polvo, de tal forma que quede perfectamente compactado dentro del tubo. Es importante asegurarse de que no queden espacios vacíos, ya que esto provocaría un error significativo en la estimación.

Cuando el capilar estuvo completamente lleno se llevó una vez más a peso constante; a esta cantidad se le restó el peso del capilar vacío, obteniendo así la masa del polvo compactado. El volumen se determinó con las dimensiones del capilar, por lo que, conociendo su diámetro interno y longitud, se realizó el cálculo correspondiente al volumen de un cilindro (Ec. 1). Finalmente con estos datos fue posible calcular una densidad aparente de la siguiente forma:

$$\rho_{\text{partícula}} = \frac{\text{masa del tubo lleno} - \text{masa del tubo vacío}}{(\pi/4)D^2h} \quad \text{Ec. 19}$$

4.2.7 Análisis del arrastre de las partículas

Para obtener la velocidad terminal de sedimentación se utilizó un método iterativo o por tanteos, se partió del valor de la velocidad axial de las partículas para calcular el número de Reynolds de partícula (Ec 13). Esta velocidad axial es la del fluido que rodea a las partículas, y se calculó dividiendo el flujo de aire suministrado entre el área transversal del tubo. Una vez calculado el número de Reynolds, se estimó el coeficiente de retardo (C_d) utilizando la fórmula correspondiente (Ec. 14 a 16) de acuerdo al intervalo de Re_p en el cayera el valor obtenido. Para calcular la velocidad final de sedimentación a partir del C_d se despejó de la ecuación 12, como a estas condiciones de velocidad terminal $F_d = mg = (\pi/6)D^3\rho_{partícula}g$, la ecuación resultante es:

$$V_t = \left(\frac{(4/3) D \rho_{partícula} g}{C_d \rho_{fluido}} \right)^{1/2} \quad \text{Ec. 20}$$

Una vez que se tuvo este nuevo valor de velocidad se recalculó el Re_p y se iteró hasta que la diferencia entre iteraciones fue mínima, obteniéndose así los verdaderos valores de V_t , C_d y Re_p .