

III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Descripción de forma y tamaño de partícula.

Para realizar el análisis de arrastre del polvo, es necesario obtener un diámetro promedio de las partículas que lo conforman. Para lograrlo se debe analizar una muestra significativa y realizar una distribución del tamaño de las partículas presentes en dicha muestra. Si las partículas fueran esféricas sería relativamente sencillo realizar el cálculo, ya que sólo bastaría con medir diámetros; pero como las partículas son irregulares, resulta muy complicado describir con exactitud cada una de las partículas presentes en la muestra.

Cuando se mide el tamaño de un cuerpo tridimensional simple, como un cubo, es necesario dar las dimensiones de su largo, ancho y alto; un total de tres números por cuerpo. Esto resulta poco práctico si se desea hacer una distribución del tamaño de muchos cuerpos diferentes, y se complica todavía más si se considera que las partículas tienen formas más complejas e irregulares que un cubo. La esfera es la única forma cuyas dimensiones pueden ser descritas con un solo número, por lo que se busca aproximar el tamaño de la partícula al de una esfera equivalente. Es decir, se mide alguna propiedad dependiente del tamaño de la partícula, como el peso, el volumen o el área superficial, y se asume que ésta se refiere a una esfera; por lo tanto se deriva a un único número, el diámetro de esta esfera, para describir a la partícula en tamaño. De esta forma, no tenemos que describir las tres dimensiones de la partícula con tres o más números, que aunque darían más precisión, resultaría inconveniente para propósitos prácticos.

Un ejemplo de lo anterior se presenta a continuación con una esfera equivalente a un cilindro. Si se tienen las dimensiones de un cilindro, como se muestra en la figura 1, se puede obtener el diámetro de una esfera equivalente a partir de su volumen (d_v).

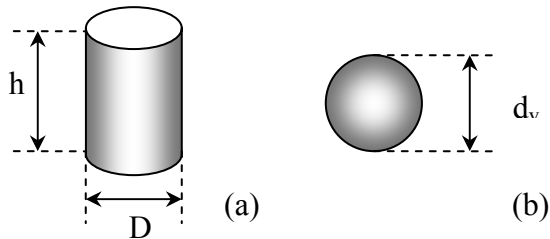


Figura 1. Dimensiones de un cilindro (a) y una esfera de diámetro equivalente (b) (Rawle, 2002).

Se tiene que:

$$\text{volumen del cilindro} = \pi/4D^2h \quad \text{Ec. 1}$$

y

$$\text{volumen de la esfera} = \pi/6d_v^3 \quad \text{Ec. 2}$$

si se igualan ambos volúmenes y se despeja d_v , se puede conocer el diámetro de la esfera de volumen equivalente:

$$d_v = (3/2D^2h)^{1/3} \quad \text{Ec. 3}$$

Otros diámetros equivalentes que definen el tamaño de partícula son:

- Diámetro de una esfera con la misma área superficial que la partícula (d_s), donde la

superficie es:

$$S = \pi d_s^2 \quad \text{Ec. 4}$$

- Diámetro de una esfera con la misma relación superficie-volumen que una esfera

(d_{sv}), donde:

$$d_{sv} = d_v^3/d_s^2 \quad \text{Ec. 5}$$

- Diámetro de retardo (d_d), es el diámetro de una esfera con la misma resistencia al movimiento que la partícula en un fluido de la misma viscosidad, y a la misma velocidad. Para Reynolds menores a 0.2 d_d se aproxima a d_s .
- Diámetro de caída libre (d_f), es el diámetro de una esfera con la misma densidad y la misma velocidad de caída libre que la partícula, en un fluido con la misma densidad y viscosidad.
- Diámetro de Stokes (d_{st}), es el diámetro de caída libre de una partícula que se encuentre en la región de flujo laminar ($Re_p < 0.2$), de tal forma que:

$$d_{st}^2 = d_v^3 / d_d \quad \text{Ec. 6}$$

- Diámetro de un círculo con la misma área que la proyectada por la partícula en reposo, en una posición estable (d_a), de esta forma: $A = \pi/4 d_a^2$. Ec. 7
- Diámetro de un círculo con la misma área que la proyectada por la partícula en una orientación aleatoria (d_p), de esta forma el valor de este diámetro será la media de todos los valores obtenidos para todas las orientaciones posibles. Para partículas convexas $d_p = d_s$.
- Diámetro de un círculo con el mismo perímetro que el proyectado por la partícula (d_c).
- Diámetro de criba (d_A), es el ancho de la apertura mínima, a través de la cual pasa la partícula.
- Diámetro de Feret (d_F), es el valor medio de la distancia entre pares de líneas paralelas, tangentes al perímetro proyectado de la partícula, se ha observado que $d_F = d_c$.

- Diámetro de Martin (d_M), es la distancia media de la bisectriz del perímetro proyectado de la partícula.

3.1.1 Métodos de medición de tamaño de partícula

Medir las partículas es una tarea difícil debido a muchos factores, entre los que destaca el hecho de que las partículas son muy pequeñas, por lo que se debe tener algún método de observación que las magnifique, o bien debe emplearse un método en el que no sea necesaria la observación directa de las partículas. Existen diferentes métodos que permiten realizar mediciones precisas de las partículas, o bien hacer estimaciones prácticas de su tamaño. Algunos de los métodos utilizados se presentan a continuación.

3.1.1.1 Tamices

Esta es la técnica empleada más antigua y de mayor uso para partículas grandes, como las que se pueden encontrar en la minería o en análisis de suelos. Su principal ventaja es ser muy barata y práctica. El método consiste en hacer pasar una muestra de peso conocido a través de una serie de tamices de diferentes aperturas colocados uno sobre otro, siendo el primero el de orificios mayores. Después de un determinado tiempo de agitación que permite que las partículas caigan a través de los tamices de diferentes aperturas, se pesa el contenido de cada nivel, y con esto se sabe que proporción de la muestra original quedó retenida en cada nivel; y como se sabe con exactitud la apertura de cada malla, se puede establecer la frecuencia de las partículas que recurren en cada intervalo de tamaño, y con

esto se obtiene la distribución de tamaño de partícula. Las principales desventajas de este método son:

- Existen dificultades de reproducibilidad de los tamices.
- No es posible la medida de sprays o emulsiones.
- Es complicado medir polvo seco por debajo de malla #400 (38 micras); y con el tamiz en húmedo los resultados observados para estos valores dan muy poca reproducibilidad y son complicados de realizar.
- Hay complicaciones para materiales cohesivos y aglomerados como las arcillas.
- El método no tiene inherentemente alta resolución.
- Existen grandes tiempos de medida o pequeños tiempos de respuesta, como partículas orientadas sobre sí mismas, que caen a través del tamiz.
- No se produce una correcta distribución de peso; mas bien, el método retransmite sobre la medida la segunda mayor dimensión de la partícula. Esto puede dar resultados extraños en partículas con forma de bastón.

3.1.1.2 Sedimentación

Este ha sido el método tradicional de medida en la industria de la cerámica y de la pintura. El intervalo aplicable está entre 2 y 50 micras. El principio de medida está basado en la ecuación de la Ley de Stokes que se muestra a continuación:

$$V = \frac{gD^2(\rho_{\text{partícula}} - \rho_{\text{fluido}})}{18\mu} \quad \text{Ec. 8}$$

donde:

V = velocidad terminal de sedimentación, g = aceleración de la gravedad

D = diámetro de la partícula y μ = viscosidad del fluido

El equipo puede ser sencillo, como la pipeta de Andreason, o más complicado cuando se usan centrifugas o rayos X.

Examinando la ecuación 1 se observa una o dos fuentes de error potenciales. La densidad del material es necesaria, por tanto el método no es adecuado para emulsiones donde el material no sedimenta, o para materiales muy densos donde sedimentan muy rápidamente. El resultado final es un diámetro de Stokes, que no es el mismo que el diámetro en peso, y es simplemente una comparación de la velocidad de caída de las partículas a una esfera que cae a la misma velocidad. El término de viscosidad del denominador indica que se necesitará un control de la temperatura con mucha precisión; cambios de 1 °C en la temperatura producen un cambio del 2 % en la viscosidad.

Con la ecuación, es relativamente fácil calcular los tiempos de sedimentación, aunque las medidas son lentas y tediosas de repetir; por ejemplo, una partícula de 1 micra de SiO₂ ($\rho = 2.5$) tardará 3.5 horas en sedimentar 1 cm. sobre el agua a 20 °C bajo el efecto de la gravedad. Debido a esto se tiende a incrementar “g” para reducir el tiempo de muestreo y remediar la situación.

La Ley de Stokes sólo es válida para esferas que tienen la forma más compacta de volumen o área superficial, por lo tanto, partículas con formas más irregulares a la normal, poseerán más área superficial que la esfera, con lo que caerán más lentamente y ofrecerán más resistencia a su propio movimiento. Para objetos como el caolín que tienen formas de disco, este efecto es mucho más acentuado, por lo que se esperarán grandes variaciones en el

resultado. Con partículas pequeñas hay dos procesos en competencia: la sedimentación gravitacional y el movimiento Browniano; debido a que en la Ley de Stokes sólo aplica la sedimentación gravitacional, se producirán errores muy grandes, aproximadamente del 20%, si la sedimentación es usada para partículas menores de 2 micras y los errores serán máximos, de hasta el 100 %, para partículas de 0.5 micras.

La técnica de sedimentación da respuestas más pequeñas que la realidad. En resumen, las principales desventajas son las siguientes:

- Velocidad de medida: los tiempos promedio están entre 25 minutos y 1 hora para una medida. Haciendo repeticiones del análisis, éste se dificulta y se incrementan los cambios por reaglomeración.
- Control preciso de la temperatura: es necesario prevenir gradientes de temperatura para evitar cambios en la viscosidad que alterarían la medida.
- Imposibilidad de manejar muestras de diferentes densidades.
- Uso de rayos X: algunos sistemas usan rayos X, por lo que el personal deberá ser revisado por seguridad.
- Rango limitado: por debajo de 2 micras predomina el movimiento Browniano y el sistema genera error. Por encima de 50 micras, la sedimentación es turbulenta y la Ley de Stokes de nuevo es inaplicable.

3.1.1.3 Electrozone sensing (coulter counter)

Esta técnica fue desarrollada a mediados de 1950 para el análisis del tamaño de las células de la sangre, las cuales son suspensiones monomodales en una dilución electrolítica. El

principio de operación es muy sencillo, se dispone de una vasija de cristal con un orificio, por donde se introduce una suspensión diluida y se aplica un voltaje a lo largo del mismo. Al fluir las partículas a través del orificio se genera un pequeño pulso de voltaje o pico; en instrumentos antiguos, la altura del pico es medida y relacionada con la altura de un pico de una muestra de látex estándar, es decir, no es un método absoluto sino comparativo. Se presentan problemas con la orientación de las partículas a lo largo del haz, que son corregidos normalmente con la medida del área que queda bajo la altura del pico. Para las células de sangre la técnica es excelente, y el método es capaz de dar tanto el conteo en número, como la distribución del volumen. Sin embargo, para materiales industriales como por ejemplo los pigmentos, los principales inconvenientes son:

- Dificultad para medir emulsiones: no es posible medir sprays.
- Los polvos secos necesitan ser suspendidos en un medio, por lo que no pueden ser medidos directamente.
- Se debe medir en un electrolito: para materiales con base orgánica la medición es muy difícil. No es posible medir en xileno, butanol y otras soluciones pobremente conductoras.
- El método requiere estándares de calibración que son caros y cambian de tamaño si se dispersan en agua destilada o en electrolitos.
- Para materiales con una distribución de tamaño relativamente ancha el método es inadecuado y además los orificios tienen que ser cambiados, ya que hay peligro de bloqueo en los más estrechos.
- El límite real de éste método está definido por la disponibilidad del orificio más pequeño y no es fácil la medida por debajo de aproximadamente 2 micras.

- Partículas porosas dan errores significativos, ya que se mide el contorno de la partícula.
- Materiales densos o grandes son difíciles de conducir a lo largo del orificio y además pueden sedimentar antes de llegar al punto de medida.

En resumen, ésta técnica es excelente para células sanguíneas, pero es dudosa para muchos materiales industriales de diversa naturaleza.

3.1.1.4 Difracción láser

Este sistema también se denomina “Low Angle Laser Light Scattering” (LALLS), se desarrolló hace unos 20 años y su método se basa en el factor de que el ángulo de difracción es inversamente proporcional al tamaño de la partícula. Un instrumento de estas características consiste en un láser como fuente de luz coherente con una longitud de onda fija. Los láseres de He-Ne son los más comunes, ya que proporcionan mayor estabilidad, especialmente con respecto a la temperatura, y una mejor relación señal – ruido, que los láseres de diodo que disponen de altas longitudes de onda. También cuenta con un detector apropiado, normalmente suele ser una estructura muy fina tipo diapositiva de sílice fotosensible, que dispone de un número de detectores discretos. En algunas técnicas, donde la intensidad de luz dispersada es muy baja, es necesaria la incorporación de un tubo foto multiplicador, junto con un correlador de señal para que tenga sentido la información descrita sobre el número de detectores. Se necesitan algunos medios de paso de la muestra a través del haz del láser, en la práctica es posible medir aerosoles de forma directa, únicamente haciéndolos pasar por dicho haz. Un polvo seco puede ser soplado a través del haz por medio de un compresor de presión y ser recogido con la ayuda de una aspiradora

para evitar la contaminación ambiental. Las partículas en suspensión pueden ser medidas con la ayuda de un sistema de recirculación, que haga pasarlas al interior de la célula de medida, por donde pasa el haz del láser.

Los instrumentos antiguos y algunos actuales, sólo aplican la teoría de Fraunhofer que asume que una partícula es mucho más grande que la longitud de onda empleada, normalmente 5 veces; por lo tanto un equipo que disponga de un láser de He-Ne tendrá un límite inferior de medida de 3 micras aproximadamente. También asume que todos los tamaños de partícula dispersan luz con la misma eficiencia y que la partícula es opaca y no transmite luz. Estas suposiciones no son correctas para muchos materiales y además, para muestras con tamaños pequeños, pueden llegar a dar errores de hasta el 30%, especialmente cuando el índice de refracción relativo de la partícula y el medio está cercano a la unidad. Cuando el tamaño de partícula se aproxima a la longitud de onda de la luz del láser, la dispersión provoca una compleja función con un máximo y un mínimo presentes.

Los últimos instrumentos desarrollados incluyen el uso de la teoría "Mie", que resuelve completamente las ecuaciones por interacción de la luz con la materia. Esto permite una total seguridad y precisión de la medida en todo el intervalo de tamaño entre 0.02 y 3500 μm típicamente. La teoría "Mie", asume el volumen de la partícula en contraposición de la teoría de Fraunhofer, que implica una predicción del área proyectada. Algunos inconvenientes de esta técnica son:

- Se necesita conocer el índice de refracción, tanto de la partícula como del medio, y la parte de absorción del índice de refracción (absorbancia), o por lo menos suponerla.
- Es un método muy costoso y sofisticado.

3.1.1.5 Microscopía

Esta es una excelente técnica, ya que se pueden observar las partículas directamente y estudiar la forma de las mismas, lo que permite juzgar muy bien sobre si se ha realizado una correcta dispersión, o por el contrario existen aglomeraciones presentes en el sistema. El método es relativamente barato y además en algunos sistemas de microscopía, es posible incluir sistemas de análisis de imagen que sirven para obtener listas de números, normalmente hasta 6 u 8 cifras decimales, demostrando la buena resolución de la técnica.

Es interesante resaltar que nunca podrán ser examinadas todas las partículas individualmente por microscopía, por ejemplo: 1 gramo de partículas de 10 micras de densidad 2.5 contiene 760×10^6 partículas. Relativamente unas pocas partículas son examinadas, por lo que existe un riesgo real de realizar un muestreo no representativo. Además, si es medida una distribución en peso, los errores se incrementan, ya que ignorando una partícula de 10 micras se produce el mismo efecto que ignorando 1000 partículas de 1 micra.

La microscopía electrónica requiere una preparación de la muestra muy lenta y laboriosa. En la microscopía manual, muy pocas partículas son examinadas, alrededor de 2000 partículas al día con un operador especialista, y además se produce una gran fatiga de la

persona. También se presenta el problema de cuestionarse sobre cuál debe ser la dimensión que debe medirse, por lo que existe una gran variabilidad entre un operador especialista y uno que no lo sea, sobre la misma muestra. En combinación con la técnica de difracción, la microscopía proporciona unos valores añadidos muy interesantes a la tecnología de cualquier tipo de material particulado en el que la forma sea un factor de importancia.

3.1.2 Análisis de imágenes bidimensionales

Como las imágenes obtenidas por la mayoría de los métodos ópticos, como el de la microscopía, son bidimensionales, se debe hacer una estimación del tamaño de la partícula.

Los diámetros aceptados para caracterizar estas partículas plasmadas en dos dimensiones se representan en la figura 2 y son:

- Diámetro de Martin (d_M): es la distancia de la bisectriz de la imagen de la partícula. Las líneas pueden ser trazadas en cualquier dirección, la cual debe mantenerse constante en todas las mediciones de la imagen.
- Diámetro de Feret (d_F): es la distancia entre dos tangentes trazadas en lados opuestos de la partícula, paralelas a alguna dirección fija.
- Diámetro de un círculo cuya circunferencia sea equivalente al perímetro de la partícula.

- Diámetro del área proyectada (d_a): es el diámetro de un círculo de área equivalente a la de la partícula vista normal a la superficie del plano en el que la partícula descansa en una posición estable.

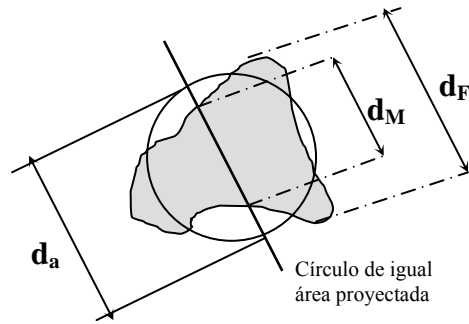


Figura 2. Representación de diámetros equivalentes para una imagen bidimensional. (Allen, 1975)

Los diámetros promedio obtenidos de estas mediciones son independientes de la orientación de las partículas, ya que son tomados en alguna dirección en particular o, como en los dos últimos casos, son mediciones bidimensionales. Experimentos han confirmado que, en general, $d_M < d_a < d_F$; y que las relaciones entre estos tres diámetros no permanecen constantes para un determinado material, y pueden ser expresadas en función de su forma. (Allen, 1975)

3.2 Principios básicos del arrastre de partículas.

Las fuerzas que actúan sobre una partícula esférica que sedimenta a través de un fluido bajo la influencia de la gravedad son de empuje, de retardo y de gravedad; y se muestran en la figura 3.

La ley de Newton para dicha partícula tomaría la siguiente forma:

$$ma = \rho_{\text{partícula}} (\pi/6)D^3 g - \rho_{\text{fluido}} (\pi/6)D^3 g - F_d \quad \text{Ec. 9}$$

↓
↓
↓
↓

Aceleración hacia abajo
Fuerza de gravedad
Fuerza de empuje
Fuerza de retardo

donde:

D = diámetro de la partícula, g = aceleración de la gravedad,

m = masa de la partícula, a = aceleración de la partícula

y ρ = densidad

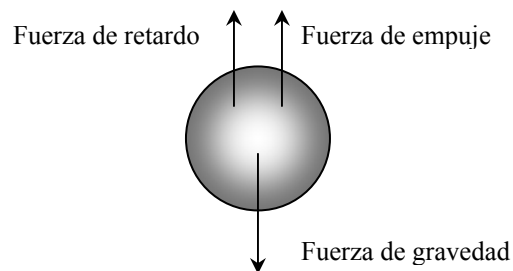


Figura 3. Fuerzas que actúan sobre una partícula que sedimenta en un fluido. (De Nevers, 1998)

Las fuerzas de retardo, o de resistencia del aire, crecen al aumentar la velocidad y son cero para la velocidad cero. De esta forma, si una partícula parte del reposo su velocidad inicial es cero, por lo que en este punto la fuerza de retardo tendrá el mismo valor; conforme la partícula se acelera la fuerza de retardo crece, al aumentar la velocidad, hasta igualar a la

fuerza de gravedad menos la fuerza de empuje. En esta condición, donde la suma de fuerzas que actúan es cero, la partícula continúa su movimiento a velocidad constante; esta velocidad es conocida como velocidad final de sedimentación, y se puede encontrar igualando a cero la aceleración en la ecuación anterior, con esto se tiene que:

$$F_d = (\pi/6)D^3g(\rho_{particula}-\rho_{fluido}) \quad \text{Ec.10}$$

Para encontrar la velocidad final de sedimentación es necesario relacionarla con las fuerzas de retardo. Stokes encontró esta relación y la expresó matemáticamente de la siguiente forma:

$$F_d = 3\pi\mu DV \quad \text{Ec. 11}$$

Donde μ es la viscosidad del fluido. Si se sustituye esta ecuación en la anterior, despejando la velocidad, se obtiene una ecuación conocida como ley de Stokes (Ec. 8). Esta ecuación sólo es válida para determinado intervalo de tamaño de partículas. Conforme va aumentando el tamaño de las mismas, llega un momento en el que el movimiento del fluido en torno a la esfera ya no se ajusta a la aproximación de que los términos que contienen las velocidades elevadas al cuadrado son despreciables. La ecuación de Stokes se basa en esta hipótesis, por lo que se vuelve inexacta cuando esto ya no se cumple.

Debido a lo anterior se debe tomar en cuenta otro parámetro conocido como coeficiente de retardo definido por la siguiente ecuación:

$$C_d = \frac{F_d}{(\pi/4)D^2\rho_{fluido}(V^2/2)} \quad \text{Ec. 12}$$

El coeficiente de retardo está en función del número de Reynolds para una partícula:

$$Re_p = \frac{DV\rho_{\text{fluido}}}{\mu} \quad \text{Ec. 13}$$

En la figura 4 se puede observar el comportamiento del coeficiente de retardo a diferentes números de Reynolds para esferas, discos y cilindros.

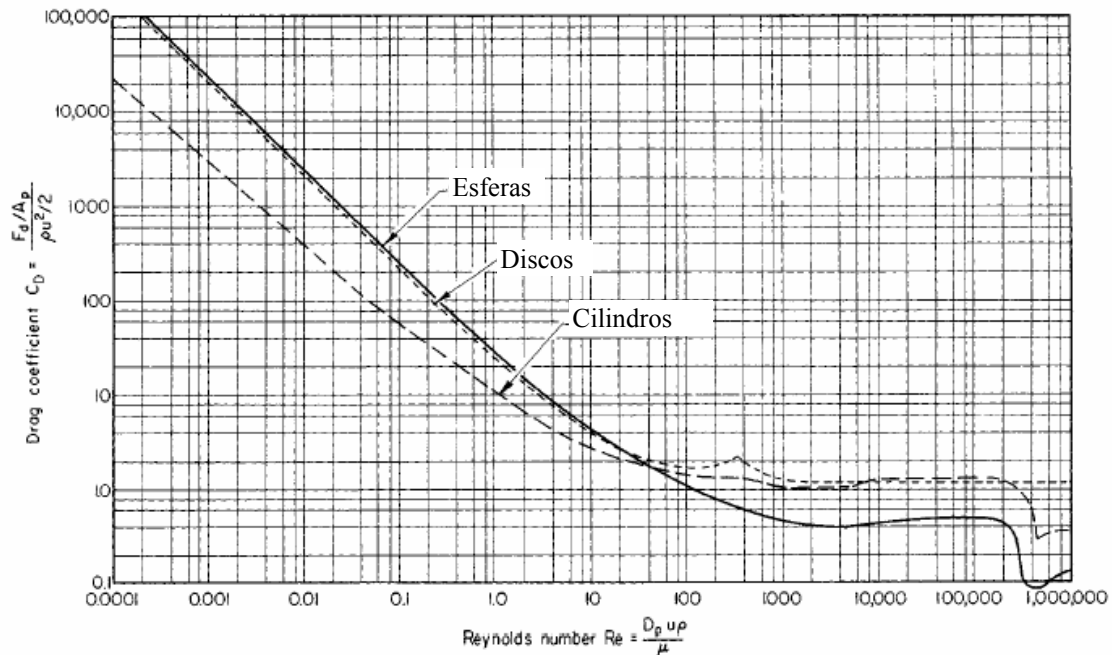


Figura 4. Coeficientes de retardo para esferas, discos y cilindros. A_p = área de la partícula proyectada en el plano normal a la dirección del movimiento, C_D = coeficiente de retardo global, D_p = diámetro de partícula, F_d = retardo o resistencia al movimiento del cuerpo en el fluido, Re = número de Reynolds, u = velocidad relativa entre la partícula y el fluido, μ = viscosidad del fluido, ρ = densidad del fluido. (Lapple y Shepherd en Tilton, 1999)

Está comprobado que para Reynolds de partícula menores a 0.1 el coeficiente de retardo que se obtiene a partir de la ley de Stokes funciona muy bien, de esta forma se tiene:

$$C_d = 24 / Re_p. \quad \text{Ec. 14}$$

Para la región intermedia ($0.1 < Re_p < 1,000$) el coeficiente de retardo se puede estimar mediante la siguiente ecuación empírica:

$$C_d = (24/Re_p)(1+0.14Re_p^{0.7}) \quad \text{Ec. 15}$$

En la región de la Ley de Newton ($1,000 < Re_p < 350,000$) el valor de C_d es aproximadamente 0.445. Para el intervalo de Reynolds entre 350,000 y 1×10^6 el coeficiente de retardo disminuye dramáticamente debido a la transición hacia flujo turbulento en la capa límite alrededor de la partícula. Cuando el Reynolds de la partícula es mayor a 1×10^6 el C_d puede estimarse a partir de la siguiente correlación obtenida por Clift, Grace y Weber (Tilton, 1999):

$$C_d = 0.19 - (8 \times 10^4 / Re_p) \quad \text{Ec. 16}$$

Otra de las suposiciones en las que se basa la ley de Stokes, es que el fluido en el que se está moviendo la partícula es un medio continuo. Los gases, líquidos y sólidos reales están formados por átomos y moléculas, por lo que no son continuos; pero si las partículas son mucho más grandes que los espacios entre las diversas moléculas o átomos del gas, el fluido interactúa con las partículas como si fuera un medio continuo, y la suposición resulta válida. Cuando una partícula es igual o menor que la distancia promedio entre las moléculas cambia su interacción con éstas, ya que cuando una partícula tiene un número grande de colisiones moleculares por unidad de tiempo, la mayor parte de las moléculas rebotan esa partícula como si fueran un espejo, con un ángulo de reflexión que es igual al de incidencia (De Nevers, 1998). Si el número de colisiones es pequeño, alguna fracción significativa de las moléculas del gas que chocan es adsorbida sobre la superficie de la partícula y permanece el tiempo suficiente para perder la dirección que tenían las

moléculas, es decir, su dirección de salida se vuelve difusa o aleatoria y sujeta a algunas reglas estadísticas. El cambio de la reflexión especular a la difusa tiene el efecto de disminuir la fuerza de retardo, lo que hace que la partícula se mueva más rápido. Para considerar este efecto se utiliza el factor de corrección de Cunningham de la siguiente forma:

$$F_d = \frac{F_{d \text{ Stokes}}}{C} \quad \text{Ec. 17}$$

donde:

$$C = \text{factor de corrección de Cunningham} = 1 + A\lambda/D \quad \text{Ec. 18}$$

$F_{d \text{ Stokes}}$ = fuerza de retardo calculada según la Ley de Stokes

A = constante determinada experimentalmente

λ = camino libre medio, es decir, la distancia promedio de recorrido de una molécula de un gas entre colisiones sucesivas.

El factor de Cunningham sólo es aplicable para valores de λ/D con orden de magnitud de uno. La constante A es determinada experimentalmente, y por lo tanto, diferente para cada clase de partícula; pero la mayoría de los investigadores utilizan el valor de $A = 1.728$, encontrado por Millikan para gotitas de aceite que sedimentan en aire debido a que no se cuenta con más información. El camino libre medio (λ) depende de la temperatura, presión y masa molecular del fluido; para aire a una atmósfera y temperatura ambiente tiene un valor aproximado de $0.07 \mu\text{m}$.

En la figura 5 se muestra una gráfica en escala logarítmica de la velocidad de sedimentación, de esferas de la misma densidad que la muestra del polvo de papel, en aire a condiciones estándar de temperatura y presión, como función del diámetro de la partícula. Se observa el intervalo de tamaño de partícula para el que la Ley de Stokes es válida y las desviaciones que sufre cuando sus hipótesis ya no son aceptables, estas desviaciones se producen al aplicar las correcciones correspondientes; utilizando el factor de corrección de Cunningham para las partículas muy pequeñas y el coeficiente de retardo correspondiente, según el número de Reynolds, para las partículas grandes.

3.3 Sistemas de control de polvos

El control eficaz de los polvos producidos en la manipulación de los materiales exige un planteamiento sistemático:

- Evaluación de la capacidad de empolvamiento por parte de cada operación.
- Prioridades de control, en base a los riesgos, tiempo, costos y posibilidades de actuación.
- Medidas preventivas de control de polvos.
- Medidas de control de los polvos formados.
- Reevaluación del nivel de empolvamiento tras la aplicación de las medidas previstas y para comprobar que se han alcanzado los objetivos propuestos.

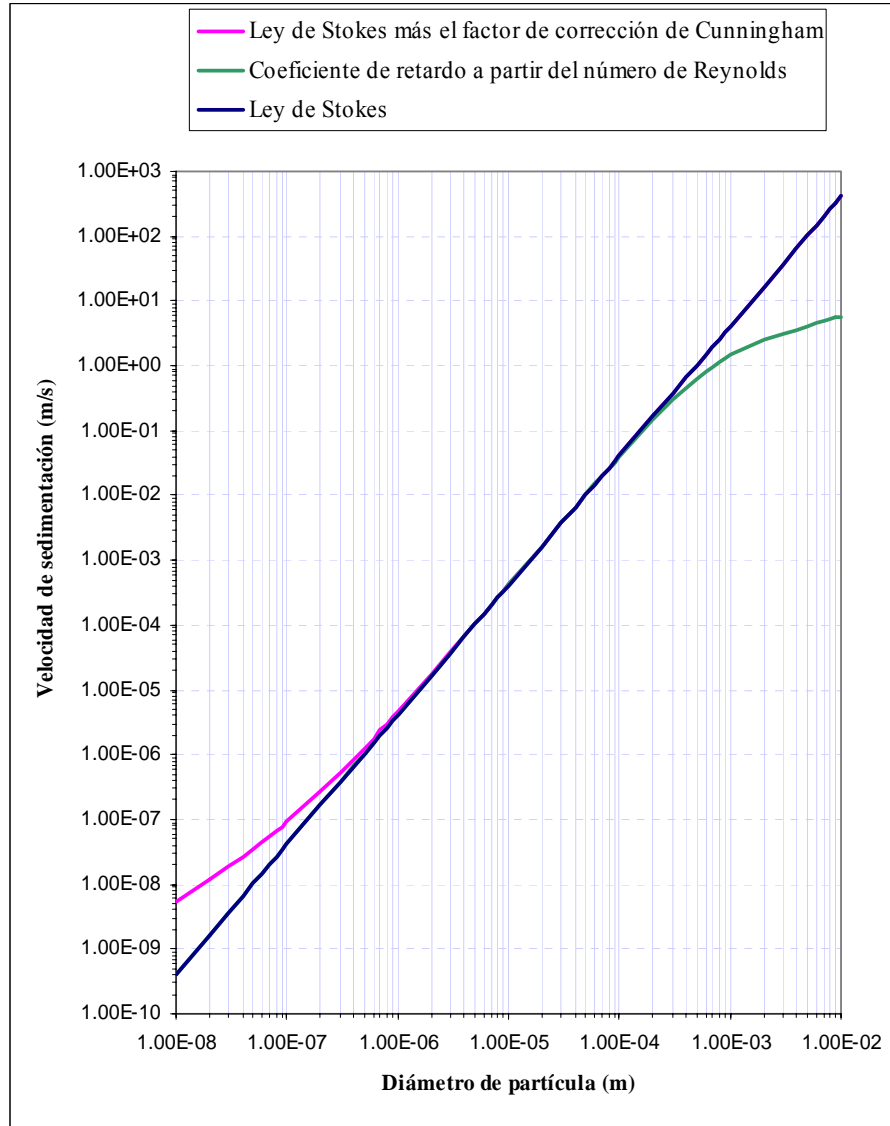


Figura 5. Velocidades terminales de sedimentación para partículas esféricas con densidad de 136.94 Kg/m³ en aire a condiciones estándar.

Los sistemas de control de polvo reducen la formación y/o la migración de los polvos.

Estos sistemas pueden dividirse en dos categorías:

- Sistemas de recogida de polvos: son los también denominados sistemas de aspiración localizada, que son utilizados amplia y eficazmente. El procedimiento

tiene una relación calidad-costo mucho mejor que la ventilación general de los locales. Un sistema de aspiración correcto se compone de los siguientes elementos básicos:

- Campana de aspiración para captar las emisiones de polvos en el origen.
 - Conducto de transporte de los polvos aspirados.
 - Acumulador o colector de polvos para la separación de las partículas de la corriente de aire, antes de descargarla a la atmósfera.
 - Ventilador y su motor para suministrar la suficiente energía y capacidad de aspiración.
- Sistemas de supresión de polvos: son los que previenen la liberación de las partículas de polvo en la atmósfera y la creación de concentraciones potencialmente combustibles de polvos. La supresión utiliza uno u otro de los siguientes sistemas:
 - De supresión mediante humidificación que aplican agua, una solución acuosa de un agente químico o una espuma pulverizada sobre la superficie del material generador de partículas de polvo.
 - De captura por pulverización de agua sobre la nube de polvo, aumentando así el tamaño de las partículas que se decantan de la corriente de aire.
 - De estabilización que reducen la formación de polvo evitando el contacto del aire en movimiento con el material (estabilización física) o modificando las propiedades del material (estabilización química).

Los sistemas recogedores (aspiradores) proporcionan rendimientos mayores de control que los sistemas de supresión pero necesitan una inversión mayor e introducen un riesgo de explosión. La elección correcta del sistema de control para cada caso exige un procedimiento sistemático, para ello, hay que conocer también las diferentes tecnologías, junto con las exigencias de su diseño correcto.

Instalar u optimizar un sistema de control de polvos en una planta, mejora la seguridad de los trabajadores, minimiza los costos de seguros de gastos médicos, compensaciones a los trabajadores así como otros beneficios económicos, esto se debe a que se mejora la calidad del aire en el sitio de trabajo, de tal forma que los trabajadores pueden realizar sus funciones productivamente y con seguridad. Otra razón por la que se instalan sistemas de colección de polvos es para reducir los costos de operación, esto puede sonar raro si se tiene la opinión de que estos sistemas afectan las utilidades de las empresas en lugar de pensar que mejoran a largo plazo la economía de operación. Para obtener el mejor sistema de colección al menor costo, se debe evitar pensar que estos equipos son causantes de incrementos en costos de operación, en lugar de eso debe pensarse que son una parte integrada al proceso de fabricación.

Un sistema efectivo de control de polvos debe estar orientado a tener tres objetivos de operación:

- Mejorar la Seguridad y Productividad del trabajador. Debe reducir, suprimir ó remover polvos peligrosos para crear un ambiente en el cuál los trabajadores puedan laborar con más seguridad y ser más productivos.
- Cumplir con las normas que impone el Gobierno. Debe cumplir con las normas del gobierno, así como con las normas de cualquier institución local ó reglas internas de planta orientadas a incrementar la calidad del aire.
- Mejorar la Economía de la Producción de la Planta. Puede reducir los costos de producción de varias maneras:
 - Puede recuperar producto bueno.
 - Puede mejorar la calidad del aire en el área de trabajo, y en consecuencia reducir el ausentismo de los trabajadores así como la rotación de los mismos, mejorando la moral y productividad, reduciendo los costos de los seguros de gastos médicos y compensaciones para los obreros.
 - Reduce los costos de limpieza de las naves al ser menos frecuentes las operaciones de limpieza de las estructuras, ventanas, así como el lavado de las ropas de los trabajadores.
 - Puede reducir también el mantenimiento de los equipos capturando el polvo que causa fallas ó mal funcionamiento en componentes eléctricos ó electrónicos, excesivo desgaste ó fallas de otros equipos.

Inhalar grandes cantidades de cualquier polvo incluyendo partículas suficientemente pequeñas (menos de un micrón) para ser consideradas humos, es dañino a pesar de que el cuerpo humano tiene diferentes mecanismos naturales de defensa. Como resultado,

cualquier equipo dentro de la planta que produzca polvo en el área de trabajo deberá conectarse a un sistema apropiado de control de polvos.

3.3.1 Descripción del equipo de arrastre.

3.3.1.1 Campanas.

De los varios componentes de un sistema de control de la contaminación del aire, el dispositivo de captura es el más importante, porque si las emisiones no son capturadas eficientemente en la fuente, no pueden ser conducidas, y removidas por un dispositivo de control. Hay dos categorías generales de dispositivos de control: direct exhaust connections o DEC (conexiones de escape directas) y campanas.

Una DEC es una sección de conducto, típicamente un codo, dentro del cual fluyen directamente las emisiones. Estas conexiones son utilizadas con frecuencia cuando la fuente de emisión es en sí misma un conducto o un desfogue.

Las campanas son utilizadas para capturar particulados, gases y/o rocíos emitidos desde una variedad de fuentes. Los procesos encampanados son generalmente divididos en dos categorías que son “calientes” y “fríos”, una delineación que, a su vez, influye la selección, colocación y diseño de la campana. Las condiciones de la fuente también influyen los materiales con que se fabrica.

El material de elección para las aplicaciones donde la corriente de emisión es no corrosiva y de temperatura moderada, es el acero al carbón o templado. Sin embargo, donde están presentes sustancias corrosivas en altas concentraciones, se necesita acero inoxidable o plásticos.

Hay cuatro tipos de campanas: envolturas, cabinas, campanas de captura, y campanas receptoras. Las envolturas son de dos tipos: aquellas que están completamente cerradas al ambiente exterior y aquellas que tienen aberturas para la entrada y salida de material. El primer tipo es utilizado solamente cuando se maneja material radioactivo, el cual debe manejarse con manipuladores remotos, también son herméticas al polvo y gas. Estos tipos de envolturas raramente son utilizadas en control de la contaminación del aire. El segundo tipo, de envoltura total, tienen aplicaciones en varias áreas, tales como en el control de emisiones de hornos de arco eléctrico y de operaciones de estampado y de llenado de recipientes de carga. Están equipadas con pequeñas aberturas en la pared que se llaman natural draft openings o NDO (aberturas de tiro natural), que permiten que el material sea movido hacia adentro o afuera y para ventilación. Sin embargo, el área para estas aberturas debe ser pequeña comparada con el área total de las paredes de la envoltura, típicamente 5% o menos.

Las cabinas son como las envolturas, rodean a la fuente de emisión, excepto una pared o porción de ésta, que se omite para permitir el acceso a operadores y a equipo. Como las envolturas, las cabinas deben ser lo suficientemente grandes para prevenir que las partículas

incidan sobre las paredes interiores; son utilizadas con operaciones y fuentes de emisión, tales como rociado de pintura y esmerilado portátil, pulido y operaciones de abrillantado.

Contrario a las envolturas y cabinas, las campanas de captura, también llamadas campanas activas o externas, no encierran a la fuente del todo. Consisten de uno a tres lados, se localizan a una distancia de la fuente y succionan a las emisiones hacia ellas vía ventiladores. Las campanas de captura se clasifican también como side-draft/backdraft (de tiro lateral o posterior), slot (de ranura), downdraft (de tiro hacia abajo) y high-velocity, low-volume (HVLV) hoods (campanas de alta velocidad, bajo volumen).

Una campana de tiro lateral o posterior se localiza típicamente a un lado o detrás de la fuente de emisión, pero tan cerca a ella como sea posible, ya que las velocidades del aire disminuyen inversa y abruptamente con la distancia. Ejemplos de estas campanas incluyen las snorkel-type welding hoods (campanas para soldadura tipo tubo de respiración) y las side shake-out hoods (campanas de lado sacudido).

Una campana de ranura opera en una manera similar a las de tiro lateral/tiro posterior, sin embargo, la abertura de entrada o cara es mucho más pequeña, siendo larga y angosta. Una campana de ranura se sitúa en la periferia de una fuente de emisión, tal como un tanque abierto angosto.

Mientras que las campanas de ranura y de tiro lateral o tiro posterior se localizan al lado o detrás de una fuente, las campanas de tiro hacia abajo se sitúan en seguida por debajo de ella y succionan al aire cargado de contaminantes hacia abajo a través de la fuente y, por lo tanto, hacia el dispositivo de control. Las aplicaciones de campanas de tiro hacia abajo incluyen operaciones de foundry shake-out (fundición con sacudida), soldadura de banco y corte con soplete.

Las campanas HVLV se caracterizan por el uso de velocidades de captura extremadamente altas, para recolectar los contaminantes en la fuente y por la distribución óptima de esas velocidades a través de la cara de la campana. Con el fin de mantener una razón de flujo volumétrico baja, estas campanas se localizan tan cerca de la fuente como sea posible, para minimizar el arrastre de aire.

La última categoría son las campanas receptoras, también llamadas campanas pasivas o de toldo. Una campana receptora se localiza típicamente arriba o al lado de una fuente, para recolectar las emisiones, las cuales son impulsadas por la misma fuente.

3.3.1.2 Sistema de Conductos

Una vez que la emisión es capturada ya sea por la campana o por una conexión de escape directa, es conducida al dispositivo de control a través de un sistema de conductos, el cual comprende todo el equipo entre el dispositivo de captura y el dispositivo de control. Esto

incluye: conductos rectos; accesorios, tales como codos y “Tes”; dispositivos de control de flujo, como compuertas; y soportes de los conductos.

En sistemas de control de la contaminación del aire, el ventilador usualmente se localiza inmediatamente antes o después del dispositivo de control, consecuentemente, la mayor parte del sistema de conductos está bajo presión estática negativa, variando desde unas pocas de pulgadas hasta aproximadamente 20 pulgadas de columna de agua. Estas condiciones de presión dictan el tipo de conducto utilizado, así como los parámetros de diseño tales como el espesor de pared o calibre.

El sistema de conductos se fabrica ya sea de metal o de plástico, el material se selecciona de acuerdo a las características de la corriente de gas residual, consideraciones estructurales, costos de compra e instalación, estética y otros factores. Los metales utilizados incluyen al acero al carbón, acero inoxidable y aluminio. Los plásticos más comúnmente utilizados son PVC (cloruro de polivinilo) y FRP (plástico reforzado con fibra de vidrio), aunque el polipropileno (PP) y el LPE (polietileno lineal), también se han aplicado; sin embargo, un inconveniente serio del PP y del LPE, es que ambos son combustibles.

En términos de construcción, los sistemas de conductos pueden ser rígidos o flexibles. Como el nombre lo implica, los sistemas de conductos rígidos, sean de metal o de plástico, tienen una forma fija; contrariamente, los sistemas de conductos flexibles pueden doblarse

para tomar en cuenta situaciones donde el espacio es limitado o donde su disposición es tan intrincada que los accesorios rígidos no pueden cumplir con los requerimientos de construcción.

Usualmente, de sección transversal de forma circular, los conductos flexibles pueden ser fabricados de metales o de plásticos y pueden ser aislados o no aislados. El sistema de conductos rígido se fabrica de sección transversal de formas circular, ovalada, cuadrada o rectangular. De estas, los conductos circulares son los más comúnmente utilizados en sistemas de control de la contaminación del aire. Aunque el conducto cuadrado o rectangular es ventajoso de usar cuando el espacio es limitado, el conducto redondo ofrece varias ventajas, ya que resiste el colapso, proporciona mejores condiciones de transporte y utiliza menos metal que las formas cuadradas, rectangulares u ovaladas planas de área de sección transversal equivalentes.

El conducto circular rígido de metal se clasifica de acuerdo a su método de fabricación. El conducto de costura longitudinal se hace doblando una hoja de metal en forma circular sobre un eje o mandrel, y soldando juntos los dos extremos. El conducto de costura en espiral se construye de una tira larga de hoja de metal, cuyos bordes son unidos por un cordón helicoidal intertrabable que corre a lo largo del conducto. Este cordón puede estar levantado o al ras de la superficie de la pared del conducto.

Otras consideraciones al diseñar el sistema de conductos son el diámetro, el espesor de pared, el tipo, número y localización de los accesorios, controles y soportes, y otros parámetros.

Si la temperatura o el contenido de humedad de la corriente de gas es excesiva, el sistema de conductos necesita estar aislado, ya que el aislante inhibe la pérdida o ganancia de calor, ahorrando energía y dinero, y previniendo la condensación, además de proteger al personal, que pudiera tocar el sistema de los conductos, de sufrir quemaduras.

Hay dos formas de aislar un conducto, la primera es instalar el aislante sobre la superficie exterior del sistema de conductos y cubrirla con una barrera de vapor, de película de plástico o de metal; el tipo y espesor del aislante utilizado dependerá de varios parámetros relacionados con la transferencia de calor. La segunda forma de aislar un sistema de conductos es usando un conducto y accesorios aislados de pared doble. El sistema de conductos de pared doble sirve para reducir el calor y el ruido. Un proveedor lo construye de una coraza de presión exterior de hoja de metal sólida y un recubrimiento interior de hoja de metal, con aislante de fibra de vidrio como emparedado en medio de ellas. La capa de aislante es típicamente de 1 pulgada, aunque están disponibles espesores de 2 y 3 pulgadas para aplicaciones más extremas. Las conductividades térmicas de estos espesores son 0.27, 0.13, y 0.09 Btu/hr-ft²-°F, respectivamente (Vatavuk, 1999).

Un sistema de conductos está formado por conductos rectos, accesorios, dispositivos de control de flujo y soportes. Los accesorios abarcan un intervalo de componentes que realizan una o más de las siguientes funciones: cambiar la dirección de la corriente de gas conducida, modificar la velocidad de la corriente, empatar a otros conductos, facilitar la conexión de dos o más componentes o permitir la expansión o contracción cuando surgen los esfuerzos térmicos.

Los accesorios más comúnmente utilizadas son los codos, éstos sirven para cambiar la dirección de la corriente de gas, típicamente en 30°, 45°, 60°, o 90°, aunque pueden diseñarse para otros ángulos; el radio a la línea central del codo determina la razón a la que ocurre el cambio direccional. El standard centerline radius, R_{cl} (radio a la línea central estándar), es 1.5 por el diámetro de la sección transversal del codo (D_c); sin embargo, en codos de “radios largos”, en los cuales el cambio direccional es más gradual que en los codos estándares, $R_{cl} \geq 2D_c$.

Las tes son utilizadas cuando dos o más corrientes de gas deben conectarse. En las tes rectas, las corrientes convergen con un ángulo de 90°, mientras que en las angulares, la conexión es hecha a 30°, 45°, 60°, o a algún otro ángulo. Las tes pueden tener una “tapa” o conexión o dos, y puede tener una sección transversal recta o “cónica”, ya sea en uno o los dos extremos. Las cruces también son utilizadas para conectar ramales de conductos, en éstas, dos ramales se interceptan uno con otro en ángulo recto. Los reductores, comúnmente llamados expansiones o contracciones, se requieren siempre que deban unirse conductos de diferentes diámetros. Los reductores son de diseño concéntrico o excéntrico. En los reductores concéntricos, el diámetro se estrecha gradualmente desde la sección transversal

mayor a la más pequeña, y en los reductores excéntricos, el diámetro disminuye completamente en un lado de la conexión.

Para controlar la razón de flujo volumétrico a través de sistemas de ventilación, se utilizan compuertas. Las compuertas son usualmente delineadas de acuerdo a lo siguiente:

- Al mecanismo de control del flujo, por lo que pueden ser de una o de múltiples cuchillas.
- A la clasificación de la presión en baja o ligera y alta o pesada.
- A los medios de control que pueden ser manuales o automáticos.

En las compuertas de una sola cuchilla, un plato circular es sujetado a una varilla, uno de cuyos extremos sobresale hacia afuera del conducto. En los tipos más comúnmente utilizados de compuertas de una sola cuchilla, los de tipo mariposa, esta varilla es utilizada para controlar el flujo de gas, rotando el plato en la compuerta. Si está totalmente cerrada, la cara de la compuerta se asienta perpendicular a la dirección del flujo de gas; si está totalmente abierta, la cara es paralela a las líneas de flujo de gas. En la figura 6 se muestra una compuerta de control de una sola cuchilla.

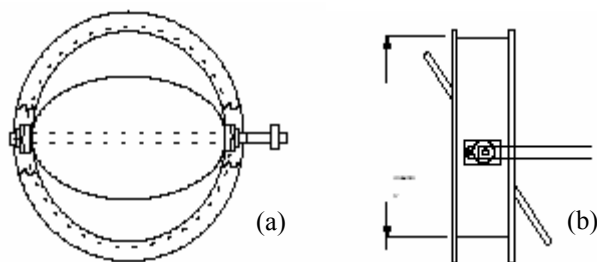


Figura 6. Compuerta de control de una sola cuchilla. (a) vista frontal. (b) vista lateral. (Vatavuk, 1999)

Con las compuertas de guillotina, el flujo es controlado deslizando la cuchilla de la compuerta hacia adentro o hacia afuera del conducto. Las guillotinas son a veces utilizadas para controlar el flujo de corrientes de aire conteniendo sólidos suspendidos, como en los transportadores neumáticos. A este respecto, las compuertas de mariposa y las de guillotina son análogas, respectivamente, a las válvulas de globo y de compuerta de abertura rápida, que son utilizadas para regular el flujo de líquidos en tuberías.

Las compuertas de cuchillas múltiples o de persiana, operan por medio del mismo principio, sin embargo, en lugar de utilizar una sola cuchilla o plato para controlar el flujo de gas, emplean tablillas que abren y cierran como persianas venecianas. Las compuertas de persiana son típicamente utilizadas en conductos muy grandes donde una compuerta de cuchilla de una sola pieza sería muy difícil de mover.

Las compuertas controladas manualmente simplemente tienen una manivela unida a la varilla de control, la cual es utilizada para ajustar el flujo de gas a mano. Si se necesita control automático, se utiliza un actuador neumático o electrónico. El actuador recibe una señal neumática, por medio de aire presurizado, o eléctrica desde un regulador, y la convierte a energía mecánica, la cual es utilizada a la vez, para abrir o cerrar la compuerta a través de la varilla. A este respecto, una compuerta actuada es análoga a una válvula de control automática, por ejemplo, una compuerta automática puede utilizarse para controlar la razón de flujo de aire de dilución a la cámara de combustión de un incinerador; esta razón de flujo, dependería a su vez de la concentración de combustibles en la corriente de gas residual de entrada. Si esta concentración se desvía de una cantidad predeterminada denominada “set-point” (punto fijo), se envía una señal desde el dispositivo de medición, a

través del regulador, hasta la compuerta automática, para aumentar o disminuir la razón de flujo de aire de dilución a modo de mantener el %LEL deseado.

Se pueden instalar juntas de expansión, especialmente en tramos largos de conductos metálicos, para permitir al sistema de conductos expandirse o contraerse en respuesta a esfuerzos térmicos. Estas conexiones son de varios diseños, uno de ellos, la junta de expansión de fuelles, consiste de una pieza de metal flexible que se suelda a cada uno de los extremos de dos conductos, conectándolos. A medida que la temperatura del conducto aumenta, los fuelles se comprimen; y a medida que la temperatura disminuye, los fuelles se expanden. Otra junta de expansión comúnmente utilizada consiste de dos bridas entre las cuales se instala una sección de tela que, como la junta de expansión de fuelles, se comprime a medida que la temperatura del conducto aumenta y viceversa. La temperatura es el factor que decide el tipo de tela utilizada, por ejemplo, se puede utilizar tela de fibra aramid y de fibra de vidrio con silicón para temperaturas de conducto hasta de 500°F, mientras que se necesita tela recubierta con fibra de vidrio para tener en cuenta temperaturas de 1000°F.

El último componente considerado es el sistema de soporte del sistema de conductos; como regla, debe proporcionarse un soporte por cada 8 a 10 pies de tramo de conducto. El sistema de conductos puede suspenderse del cielo o de otras estructuras elevadas por medio de perchas o soportadas desde abajo por vigas, pilares u otros soportes.

Un arreglo de suspensión consiste típicamente de un accesorio superior, un colgante y un accesorio inferior. El accesorio superior une el colgante al cielo, éste puede ser un inserto

de concreto, un perno o un sujetador tal como un remache o un clavo. El colgante es generalmente un tirante de acero galvanizado, una varilla redonda de acero o un alambre que es anclado al cielo por el accesorio superior. El tipo de colgante utilizado será elegido de acuerdo al diámetro del conducto, el cual es proporcional a su peso por pie lineal; por ejemplo, los colgantes de alambre son recomendados solamente para conductos de diámetro hasta de 10 pulgadas, para diámetros mayores, hasta de 36 pulgadas, deben utilizarse tirantes o varillas. Típicamente, se tira un colgante de tirante desde el accesorio superior, se ciñe alrededor del conducto y se asegura por un sujetador, que es el accesorio inferior. Un colgante de varilla también se extiende hacia abajo desde el cielo, a diferencia de los tirantes, se sujetan al conducto vía una banda o bandas que se ciñen alrededor de la circunferencia. Los conductos de diámetro mayores a 3 pies, deben soportarse con dos colgantes, uno a cada lado del conducto, y asegurarse a dos bandas circundantes, una en la parte de arriba y otra en la de abajo del conducto. Los soportes para sistemas grandes de conductos deben tomar en cuenta los esfuerzos térmicos, y permitir ambas, la expansión axial y longitudinal y la contracción.