

Sustituyendo en (6.5) las condiciones de prueba y factores de conversión convenientes, se tiene:

$$E = 1.185^{-16} \cdot Area_{removida}$$

Donde el área removida es la razón del área dañada con el área de trabajo.

Despejando la constante k del material en la ecuación 4.2 y sustituyendo los valores de E y v_p medidos experimentalmente se tienen los valores de k para el acero al carbono ASTM A106-B a diferentes temperaturas, los cuales se muestran en la tabla 6.3.

Tabla 6.3 Valores de la constante k de desgaste por erosión, por unidad de área, del acero ASTM A106-B a diferentes temperaturas.

$V_p = 9$ m/seg	$V_p = 12$ m/seg		
300 °C	400 °C	500 °C	565 °C
3.56×10^{-2}	2.4×10^{-4}	3×10^{-4}	3.2×10^{-4}

Con dichos valores de k puede obtenerse la razón de erosión para cada temperatura a diferentes velocidades de partículas incidentes.

CAPÍTULO 7

DISCUSIONES

La hipótesis primaria de este trabajo sugirió el empleo de un péndulo balístico capaz de detectar las señales o desplazamientos inferidos por el impacto de las partículas sobre él. Así se construyó e instaló un péndulo en el sistema de transporte con las condiciones de gas R y altas temperaturas, sin embargo los desplazamientos obtenidos revelaron pequeñas velocidades de partículas apenas detectables. Por consiguiente se procedió a encontrar otra forma para la obtención de v_p .

Estableciendo un método para obtener la velocidad de partículas a diferentes temperaturas en gas R, el cual se fundamenta en tres pasos a seguir:

- La obtención de v_p en aire a temperatura ambiente.
- La extrapolación de tales velocidades con gas R.
- La extrapolación de los nuevos valores ahora con el incremento de temperatura.

Es necesario recalcar algunos puntos pertinentes al método:

A pesar de que se obtienen cuatro velocidades específicas de partículas, a saber, 9, 10, 11 y 12 m/s. La velocidad de las partículas no son tan discretas como muestran dichos valores. Debido por una parte, a que las partículas de fierro esponja tienen diferente tamaño y formas entre sí (como resultado del cribado aunque se encuentren entre ciertos grados de tamiz) repercutiendo en un diferente comportamiento aerodinámico y por lo tanto en diferentes velocidades de partículas. Sin embargo no es el objetivo calcular la velocidad de una por una partícula, sino la velocidad más representativa del conjunto para cierto flujo de gas.

Se observó para la obtención del alcance que las partículas rebotaban al caer en el suelo, de tal forma que pequeños recipientes o simples distancias marcadas en el suelo hicieron difícil e insegura la distancia a medir. Por tal motivo, se seleccionaron contenedores de $\approx 28 \times 30 \times 32$ cm, los cuales fueron colocados en línea recta frente a la cruceta y en dirección del flujo de partículas. El transporte de partículas se perpetuó por intervalos de cinco minutos, tiempo suficiente (considerando que la dosificadora arroja ≈ 7 g de mineral por segundo) para atrapar partículas y comparar el contenedor de mayor afluencia.

En la gráfica 6.1 se muestran los resultados para diferentes placas, flujos y velocidad angular de la dosificadora. Las gráficas *no representan la desviación de la medida del alcance promedio* determinado, sino el rango de alcances y por lo tanto de velocidad de partículas por efectos de tamaño y forma de partículas antes mencionados.

La desviación de la medida de los alcances no implícitos en la gráfica son de ± 10 cm, valor que cae dentro de la resolución de los contenedores (ya que estos son de 30 cm de largo). Es decir que los errores por las medidas del alcance son por mucho compensadas en la distribución de la v_p por efectos de tamaño y forma.

La velocidad de las partículas obtenidas en tiro horizontal no fue medida fuera de la cruceta, y por supuesto tampoco dentro de ella. De hecho, si consideramos el trayecto de la zona 2 a 3 de la figura 5.2 como zona de aceleración (mas que de transporte) se tiene que la v_p dentro de la tubería tomaría diferentes valores conforme se desplaza la partícula, pero no es propio de este trabajo el encontrar la velocidad de la partícula en cada punto o posición dentro de la tubería, sino más bien el relacionar la velocidad de las partículas (parámetro de operación) con el desgaste (parámetro tribológico) en transporte neumático. Así la velocidad obtenida es la velocidad en el límite, en la interfase cruceta - aire medio ambiente, en el preciso lugar donde se exponen los cupones al desgaste.

De las leyes de movimiento de Sir Isaac Newton, sabemos que un cuerpo seguirá su trayectoria hasta que fuerzas externas le obliguen a cambiar dicho estado. Cuando la partícula sale de la tubería en tiro horizontal se esperaría que siguiera con esa trayectoria a expensas de que le afectaran fuerzas externas. Debido al campo gravitatorio en el que estamos inmersos, la trayectoria horizontal cambia a una parabólica. Sin embargo, qué tan alejada está la curva descrita experimentalmente en comparación con las que dictan la mecánica. Está el alcance aminorado por la resistencia del aire?

Con fundamentos en las ecuaciones de F_D y v_t se determinó la influencia del aire en el viaje de la partícula al exterior de la tubería. La fuerza de arrastre^{9,22} F_D de una partícula ejercida por el medio que la rodea, puede calcularse con 4.11

$$F_D = \frac{CA_p \rho u^2}{2} \quad (4.11)$$

donde A_p es el área de la partícula, ρ la densidad del medio que rodea a la partícula, u la velocidad relativa gas - partícula. El coeficiente de arrastre C , depende del rango del número de Reynolds. Es común utilizar el R_e como la resistencia que ofrece la tubería al fluido que se desplaza dentro de ella, es decir, se aplica en el transporte de un fluido y tal número involucra el diámetro de la tubería. Sin embargo, en condiciones de transporte de dos fases (partícula - gas) se utiliza el N_{Re} de la partícula, o la resistencia que ofrece el gas al movimiento de la partícula y no de la tubería como en el caso de transporte de una sola fase.

Las ecuaciones 7.1 y 4.10, escritas a continuación, indican el número de Reynolds de la partícula y la velocidad relativa entre el gas (aire) y partícula

$$N_{Re} = \frac{D_p \rho u}{\mu} \quad (7.1)$$

$$u = v_g - v_p \quad (4.10)$$

Donde D_p es el diámetro de la partícula, ρ la densidad del aire, y μ la viscosidad del aire.

La velocidad del gas (v_g) se calculó a partir de la razón de flujo de volumen (Q), medida experimentalmente²³.

$$v_g = \frac{Q}{A_T} \quad (7.2)$$

donde A_T es el área de la tubería, sección perpendicular al flujo.

En la tabla 7.1 se muestran los valores obtenidos de la razón de flujo de volumen, velocidad del aire alcanzada con dicho flujo, la velocidad relativa aire - partícula de hierro esponja (velocidad de partícula medida experimentalmente, ver sección 6.1) y Número de Reynolds de la partícula.

Tabla 7.1 Valores experimentales (de esta investigación) y teóricos para flujo y velocidad del gas, Número de Reynolds de las partículas, y velocidad relativa gas - partícula.

Q (m ³ /h)	v_g (m/s)	u (m/s)	N_{Re} (s d)
59	32	24	1376
65	36	27	1720
78	43	32	1892
89	49	37	2064

El coeficiente de arrastre C , toma diferentes valores para partículas esféricas sólidas dependiendo del Número de Reynolds de la partícula²¹.

con	$N_{Re} < 0.1$	$C = 24/N_{Re}$
en la región intermedia	$N_{Re} < 1000$	$C = (24 / N_{Re}) (1 + 0.14 N_{Re}^{0.70})$
en la región de Newton	$1000 < N_{Re} < 350,000$	$C = 0.445$
y para	$N_{Re} > 10^6$	$C = 0.19 - [(8)(10^4) / N_{Re}]$

Dichos coeficientes se muestran en figura 7.3^{21,22}.

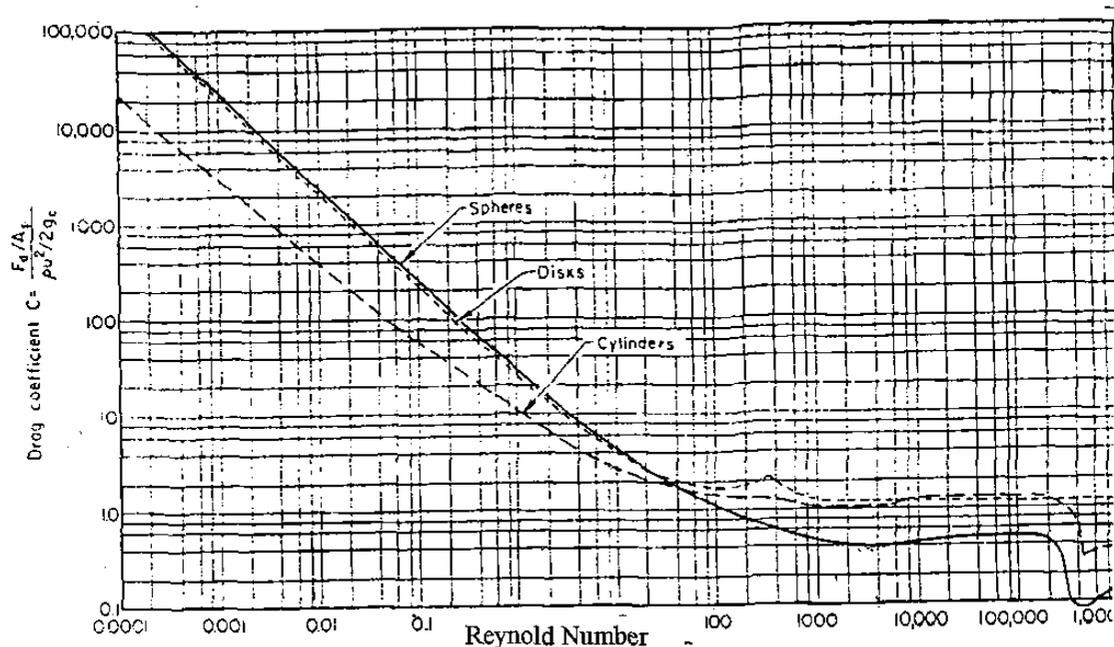


Figura 7.3 Gráfica Número de Reynolds - Coeficiente de arrastre para diferentes partículas.

Para los N_{Re} obtenidos, se tiene un coeficiente de arrastre de 0.445. De la ecuación 4.11 con el valor de C y las dimensiones de la partícula de hierro esponja (ver sección 5.3.3), supuestas esferas, se encontraron valores de F_D de 5 a 13 Dinás.

Aunando los cálculos de velocidad terminal²² (v_t) de las partículas, es decir la velocidad límite a la que las partículas en caída libre dejan de incrementar su velocidad debido a la aceleración gravitacional.

La forma general para calcular la velocidad terminal^{9,22} es

$$v_t = \sqrt{\frac{2 g m_p (\rho_p - \rho)}{\rho \rho_p A_p C}} \quad (7.3)$$

Donde m_p , ρ_p , y A_p son la masa, la densidad y el área de la partícula, respectivamente.

Simplificando la ecuación 7.3 con el valor de C y las dimensiones de las partículas de hierro esponja antes referidas, se tiene que la velocidad terminal puede expresarse como:

$$v_t = 1.73 \sqrt{g D_p \frac{\rho_p - \rho}{\rho}} \quad (7.4)$$

Obteniendo una velocidad terminal de 9.3 m/s bajo las condiciones ya establecidas. Ahora, para una partícula que desciende en caída libre desde un altura de 80 cm, su velocidad final sería de 3.2 m/s, valor menor al de la terminal, lo que indica que en mucho las partículas siguen acelerándose por efecto de la gravedad. Cálculos de caída libre indican que se necesitaría una altura de 4.4 m para que se alcanzara la velocidad terminal. Además, la partícula en su trayectoria está sujeta a diferentes fuerzas, su propio peso y la impuesta por el aire en transporte, quienes contrarrestan el arrastre. El peso de una partícula alcanza 25 Dinás, agregando la fuerza impuesta por el transporte tenemos que la suma de ambas fuerzas siempre será mayor que la de arrastre. así que el arrastre u oposición al movimiento de la partícula no afecta los cálculos antes realizados para la velocidad de las partículas de hierro esponja. En la sección 6.1 se muestran las gráficas de velocidad de partículas en aire y a temperatura ambiente.

En la figura 6.4 se muestra que con un incremento en la temperatura del gas, menor flujo se necesita para rastrear determinadas velocidades de partículas. Ésto puede deberse a que al aumentar la temperatura el gas se comporta más idealmente, con mayor velocidad promedio de sus moléculas, que provocan un mayor movimiento en las partículas y por lo tanto una menor cantidad de flujo de gas por volumen requerido. Esta gráfica no contradice la hipótesis de que al incrementar la temperatura mayor velocidad de partícula sea esperada. Sólo que la figura hace referencia a v_p fijas, es decir sólo a esas velocidades nos interesa el flujo de gas requerido, así resulta que al aumentar la temperatura menor flujo de gas es necesario.

La velocidad de las partículas se midió a temperatura ambiente y con aire por medio del alcance. Sin embargo, no se realizaron las mismas medidas con gas R y a altas temperaturas debido las características del gas (explosivo y venenoso). Resulta difícil trabajar con el gas R en contacto con la atmósfera, y nada seguro si a esto agregamos un incremento de temperatura en el gas de hasta 600 °C.

Las zonas dañadas por el desgaste en el transporte neumático y su corrimiento hacia un extremo del cupón (fig 6.5), se debió a un desplazamiento ocasionado por el espesor del portamuestras (fig 5.3) y a su reflejo angular de 30° con respecto a la línea vertical no considerados previamente.

Una observación minuciosa de ambas áreas, indujo a inferir que si el cupón hubiese sido colocado más hacia el centro de disparo del material, se hubiesen prolongado las áreas dañadas. Se obtuvo una comprobación de esta hipótesis al introducir cupones de acero inoxidable. Los cuales mostraron una dispersión homogénea, sin zonas preferentes debido a su mayor resistencia al desgaste.

Sin embargo los corrimientos detectados en el acero al carbono fueron considerados en los cálculos de la razón de erosión. En donde se previó medir la zona dañada con referencia a la zona de trabajo, no afectando la respuesta de E .

Otra razón para estandarizar la zona dañada, es debido al área efectiva de impacto de partículas. Si los cupones hubiesen sido colocados en posición perpendicular al chorro gas - partículas, ciertamente por las dimensiones del cupón y del área transversal de la tubería de transporte, todas las partículas de fierro esponja hubiesen impactado sobre el cupón. Comportamiento corroborado en los péndulos utilizados, en donde una huella circular fue detectada en el centro de cada péndulo. Aún cuando la razón de desgaste hubiese sido menor (fig 3.6). Pero con el fin de encontrar un mayor desgaste los cupones fueron colocados con una inclinación de 30°, con ello no todas las partículas incidirían

sobre el cupón, y la referencia de material transportado parece quedar inválida. Sin embargo el estandarizar el área dañada hace válida la referencia.

En las figuras 6.6 y 6.7 se muestran con puntos blancos las huellas ocasionadas por el impacto de partículas de fiero esponja en las zonas de desgaste severo. Es posible observar en las figuras la densidad de huellas en los cupones a diferentes temperaturas. Aunando la figura 6.8 se encontró que al incrementar las temperaturas mayor densidad de huellas y áreas dañadas/áreas de trabajo se encuentran. Una posible explicación a éste fenómeno, podría ser un incremento en la ductilidad del material al incrementar la temperatura. Sin embargo el corroborar ésta hipótesis se encuentra fuera del alcance de esta tesis, la cual solo pretende enlazar los parámetros de operación con la obtención, medición y mecanismos de desgaste por transporte neumático. Sin embargo las fig 6.8 y 6.9 ofrecen un punto de partida para futuros análisis microestructurales de aceros en relación con mecanismos de desgaste y con parámetros de operación ya encontrados aquí.

Ampliaciones en las huellas de desgaste (fig 6.8 y 6.9) permiten observar el mecanismo imperante en tales desgastes mecánicos, donde se detecta una remoción de material en el sentido de flujo de las partículas. Tal mecanismo se presenta en la etapa inicial de transporte (200 kg de mineral transportado), es de esperarse que al incrementar la carga de material incidente (por toneladas de mineral) el mecanismo sea vea combinado con un posible desprendimiento de material y posterior asentación en forma de capa.

La figura 6.8 muestra la razón de daño presente en los cupones a diferentes temperaturas. Observando que un incremento en la temperatura provoca un aumento en el desgaste. El valor de k para 300 °C resulta ser menor en dos órdenes de magnitud comparado con las otras temperaturas de prueba. Ésto se debió a que la velocidad de la partícula utilizada en esta prueba fue 3 m/s menor y recordando que es el cuadrado de la velocidad quien influye en los cálculos de k .

Además de los resultados de erosión obtenidos para diferentes temperaturas, valores de k son presentados en la tabla 6.3. *Los cuales son indicadores del desgaste para el material analizado, ASTM A106-B, bajo condiciones de trabajo estipuladas en la tabla 5.5. Remarcando que tales valores de k son propios para el sistema y no intercambiables con ningún otro, ni tampoco extensibles a otras condiciones de trabajo. Sin embargo, tales constantes resultan útiles al comparar materiales bajo las mismas condiciones de trabajo.*

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES

- Es posible medir la velocidad de partículas en transporte neumático en fase diluida con la ayuda indirecta de un péndulo balístico.
- El método desarrollado para la obtención de la velocidad de las partículas puede ser empleado para obtener la velocidad de las mismas aún cuando la atmósfera de transporte sea altamente reactiva con el medio ambiente o se encuentre a altas temperaturas.
- Un aumento cercano al 200 % se requirió para alcanzar las velocidades de partículas trabajando con gas R que con aire.
- El aumento en la temperatura generó un decremento en el flujo de gas R necesario para alcanzar velocidades de partículas específicas.
- El mecanismo de desgaste obtenido fue *propiamente* el de remoción de material por erosión de las partículas sólidas de fierro esponja cuando éstas fueron transportadas neumáticamente.
- El método de detección y medida de las huellas obtenidas por el impacto del material, a partir de imágenes digitalizadas, permite cuantificar el área dañada por desgaste erosivo.
- El cálculo de razón de erosión y de valores de la constante de desgaste para el acero al carbono estudiado, presentan un aumento conforme se *incrementa* la temperatura de operación.
- Se obtuvieron dos métodos experimentales, uno para calcular la velocidad de las partículas y otro para cuantificar el desgaste erosivo. Lo que permite al industrial seguir un método sistemático ordenado que finalmente le permita comparar y decidir con el fin de optimizar la vida media de la tubería en transporte neumático.