

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

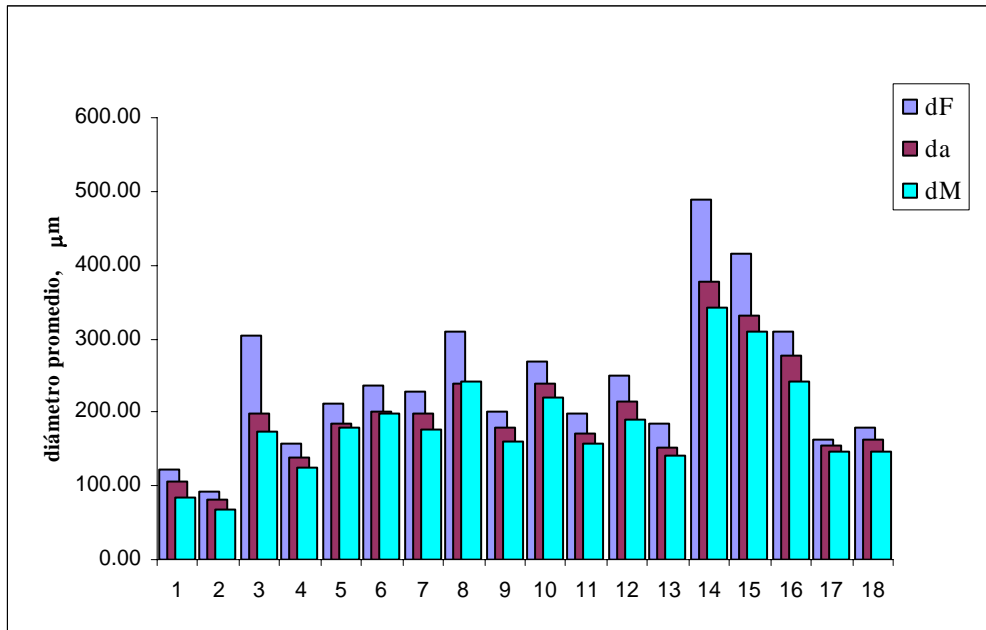
Se tomaron las imágenes de acuerdo a la matriz de experimentos, se analizaron estadísticamente como se menciona en la sección 4.2.5 y se obtuvieron los resultados mostrados en el apéndice C. En la tabla 2 se muestra un concentrado de los diámetros promedio y las desviaciones estándar para cada condición de flujo y altura.

**Tabla II.** Concentrado de resultados del análisis estadístico para los tres tipos de diámetro equivalente.

No.	D <sub>tubo</sub>	Altura (in)	Flujo (ft3/hr)	dF		dM		da	
				D <sub>promedio</sub> ( $\mu$ m)	$\sigma$	D <sub>promedio</sub> ( $\mu$ m)	$\sigma$	D <sub>promedio</sub> ( $\mu$ m)	$\sigma$
1	1½ "	3	30	123.06	115.66	84.19	49.49	105.24	84.07
2			40	91.63	118.38	69.03	50.12	80.58	80.10
3			50	303.63	584.12	173.04	219.78	199.14	271.66
4		6	30	157.88	142.72	124.21	52.90	138.52	87.75
5			40	211.58	215.39	179.01	149.66	184.89	152.09
6			50	236.47	247.28	197.50	194.61	200.62	176.68
7		10	30	226.94	196.26	176.94	108.88	199.11	129.20
8			40	309.20	554.03	241.51	435.43	239.67	347.56
9			50	202.22	267.88	160.89	163.93	178.74	193.85
10	¾ "	3	30	269.04	169.45	218.99	109.26	237.63	112.29
11			40	198.59	282.72	156.68	113.16	172.30	164.04
12			50	251.03	268.13	190.02	143.36	215.39	180.10
13		6	30	184.96	337.28	141.42	152.38	151.56	176.10
14			40	489.25	781.50	340.84	555.56	376.42	595.13
15			50	414.94	684.64	310.76	615.67	330.49	571.55
16		10	30	308.91	227.51	241.95	138.71	276.11	173.34
17			40	163.77	152.30	146.95	106.55	155.19	126.01
18			50	180.02	190.83	145.50	99.87	162.55	138.11

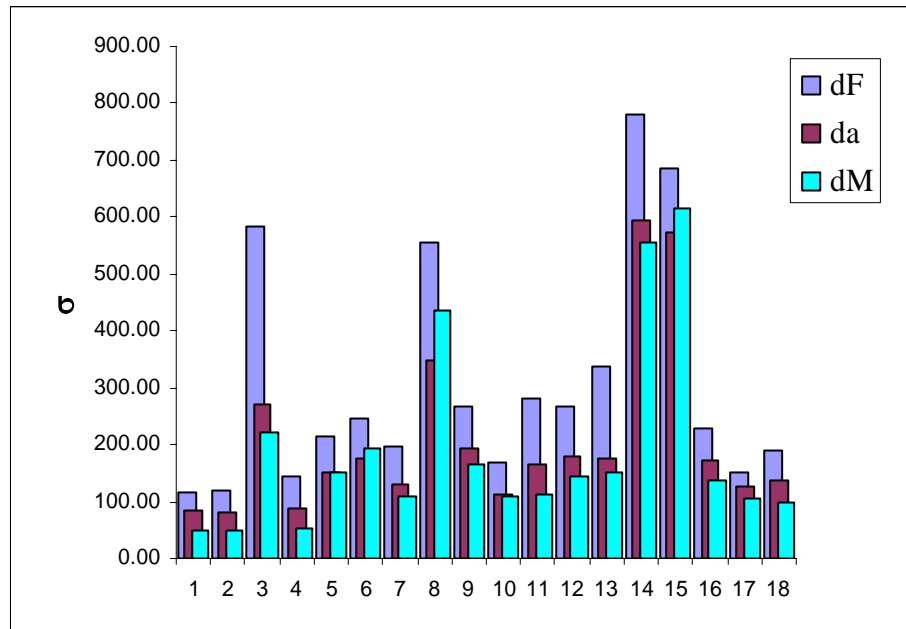
En la gráfica de la figura 9 se hace una comparación entre los diferentes diámetros promedio. En casi todos los casos se observa que el diámetro de Feret es el más grande, seguido del diámetro de la esfera proyectada, y el diámetro de Martin es el más pequeño. Con esto se confirma la tendencia que menciona Allen en su libro "Particle Size

Measurement”, en cuanto a la relación que guardan estos tres diámetros en resultados experimentales ( $d_M < d_a < d_F$ ).



**Figura 9.** Gráfica de comparación de los diferentes tipos de diámetro promedio a las diferentes condiciones de flujo y altura.

En la figura 10 se grafican las desviaciones estándar de cada grupo de datos, lo que nos permite realizar una comparación de la dispersión de los mismos. Para la mayoría de los casos el diámetro de Martin presenta los valores más pequeños de  $\sigma$ , lo que indica que estos datos están menos dispersos, esta tendencia también puede observarse en las gráficas del apéndice C, en donde se muestran las distribuciones normales para cada grupo de datos, en la mayoría de los casos la curva está más normalizada para los diámetros de Martin que para los otros dos. Debido a esto se considera que el diámetro de Martin es el más significativo, aunque los cálculos del arrastre de las partículas se realizaron con los tres diámetros.



**Figura 10.** Gráfica de comparación de  $\sigma$  de los diferentes grupos de datos.

Para realizar los cálculos del arrastre fue necesario determinar la densidad del polvo, esto se hizo de acuerdo al método descrito en la sección 4.2.6, con lo que se obtuvieron los siguientes datos:

Diámetro interno del capilar	1.6 mm.
Largo del tubo	37 mm.
Peso del capilar vacío	0.0694 gr.
Peso del capilar lleno	0.0857 gr.

Aplicando la ecuación 19 se obtuvo la densidad de la muestra, dando como resultado  $1.369 \times 10^{-4} \text{ gr/mm}^3$  ( $136.94 \text{ Kg/m}^3$ ).

Para analizar el arrastre de las partículas se empleó el método descrito en la sección 4.2.7, utilizando los diámetros promedio de la tabla 2, convertidos a metros, la densidad de la muestra, y las propiedades del aire (calculadas en HYSIS) y velocidades axiales de las partículas que se presentan en la tabla 3.

**Tabla III.** Propiedades del aire a condiciones de laboratorio y velocidades axiales.

$D_{\text{tubo}}$	Altura (in)	Flujo (ft <sup>3</sup> /hr)	$T_{\text{aire}}$ (°C)	$\rho_{\text{aire}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$ (P)	$V_{\text{axial}}$ (m/s)
1½ "	3	30	20.5	0.9459	1.86E-04	0.207
		40	20	0.9475	1.86E-04	0.276
		50	21	0.9443	1.86E-04	0.345
	6	30	22	0.9411	1.87E-04	0.207
		40	22.5	0.9395	1.87E-04	0.276
		50	23	0.9379	1.87E-04	0.345
	10	30	24	0.9347	1.88E-04	0.207
		40	23	0.9379	1.87E-04	0.276
		50	23	0.9379	1.87E-04	0.345
¾ "	3	30	19	0.9508	1.85E-04	0.828
		40	19.5	0.9491	1.86E-04	1.104
		50	19.5	0.9491	1.86E-04	1.380
	6	30	20	0.9475	1.86E-04	0.828
		40	20.5	0.9459	1.86E-04	1.104
		50	20.5	0.9459	1.86E-04	1.380
	10	30	20.5	0.9459	1.86E-04	0.828
		40	20	0.9475	1.86E-04	1.104
		50	20	0.9475	1.86E-04	1.380

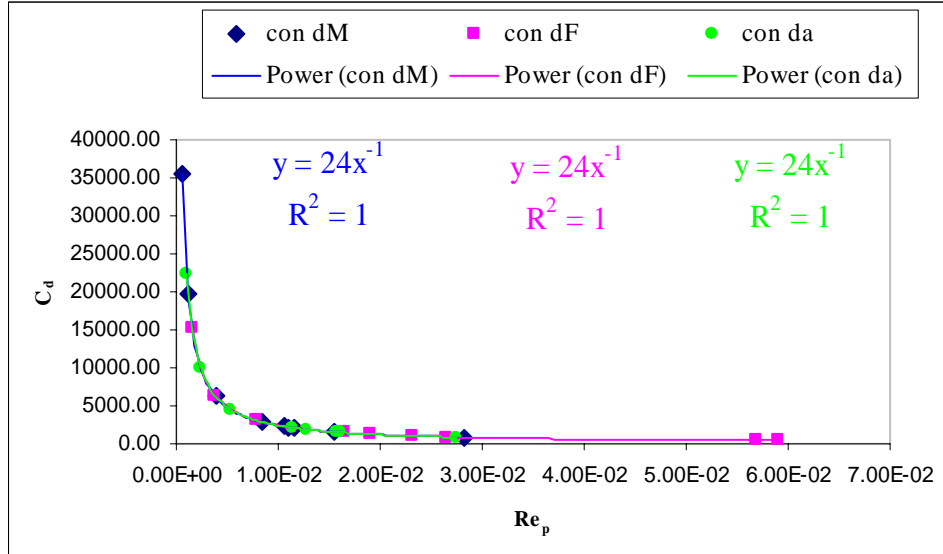
Después de 10 iteraciones para  $d_M$  en ambos tubos y  $d_F$  en el tubo de ¾", y de 11 iteraciones para  $d_F$  en el tubo de 1½" y  $d_a$  en ambos tubos, se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 4.

**Tabla IV.** Parámetros de arrastre obtenidos después de las iteraciones correspondientes.

D <sub>tubo</sub>	Altura (in)	Flujo (ft <sup>3</sup> /hr)	dM			dF			da		
			Re <sub>p</sub>	Cd	Vt (m/s)	Re <sub>p</sub>	Cd	Vt (m/s)	Re <sub>p</sub>	Cd	Vt (m/s)
1½ "	3	30	1.22E-03	19657.94	2.85E-03	3.80E-03	6309.67	6.08E-03	2.38E-03	10085.65	4.45E-03
		40	6.76E-04	35480.70	1.92E-03	1.58E-03	15213.75	3.37E-03	1.07E-03	22362.28	2.61E-03
		50	1.05E-02	2275.53	1.20E-02	5.69E-02	422.14	3.69E-02	1.60E-02	1495.68	1.59E-02
	6	30	3.87E-03	6204.54	6.17E-03	7.93E-03	3027.22	9.96E-03	5.36E-03	4481.56	7.67E-03
		40	1.15E-02	2082.69	1.28E-02	1.90E-02	1263.41	1.79E-02	1.27E-02	1892.99	1.36E-02
		50	1.54E-02	1557.60	1.56E-02	2.64E-02	908.98	2.23E-02	1.61E-02	1488.34	1.60E-02
	10	30	1.10E-02	2185.20	1.25E-02	2.31E-02	1037.35	2.05E-02	1.56E-02	1535.66	1.58E-02
		40	2.82E-02	852.33	2.33E-02	5.90E-02	406.74	3.81E-02	2.75E-02	873.12	2.29E-02
		50	8.33E-03	2879.96	1.03E-02	1.65E-02	1453.22	1.63E-02	1.14E-02	2104.12	1.27E-02
¾ "	3	30	2.18E-02	1103.09	1.93E-02	4.03E-02	595.17	2.92E-02	2.77E-02	864.91	2.28E-02
		40	7.94E-03	3022.07	9.89E-03	1.62E-02	1485.09	1.59E-02	1.05E-02	2277.87	1.19E-02
		50	1.42E-02	1694.77	1.45E-02	3.26E-02	735.48	2.54E-02	2.06E-02	1166.20	1.87E-02
	6	30	5.81E-03	4128.22	8.05E-03	1.30E-02	1846.18	1.38E-02	7.14E-03	3361.51	9.23E-03
		40	8.09E-02	296.74	4.66E-02	2.28E-01	110.64	9.15E-02	1.06E-01	233.59	5.52E-02
		50	6.13E-02	391.27	3.88E-02	1.41E-01	176.39	6.67E-02	7.37E-02	325.85	4.38E-02
	10	30	2.90E-02	828.82	2.35E-02	6.02E-02	398.51	3.83E-02	4.30E-02	558.67	3.06E-02
		40	6.52E-03	3679.10	8.69E-03	9.03E-03	2658.41	1.08E-02	7.67E-03	3130.64	9.68E-03
		50	6.33E-03	3788.66	8.52E-03	1.20E-02	2001.57	1.30E-02	8.81E-03	2724.22	1.06E-02

En las figuras 11 y 13 se observa que la relación que tiene el coeficiente de retardo en función del número de Reynolds es la de Stokes ( $24/Re_p$ ), para todos los casos en el tubo de 1½" y para el diámetro de Martin en el tubo de ¾"; aunque los otros dos diámetros se aproximaron bastante a esta relación, cabe resaltar que para estos casos el ajuste de datos no fue perfecto como en los otros cuatro.

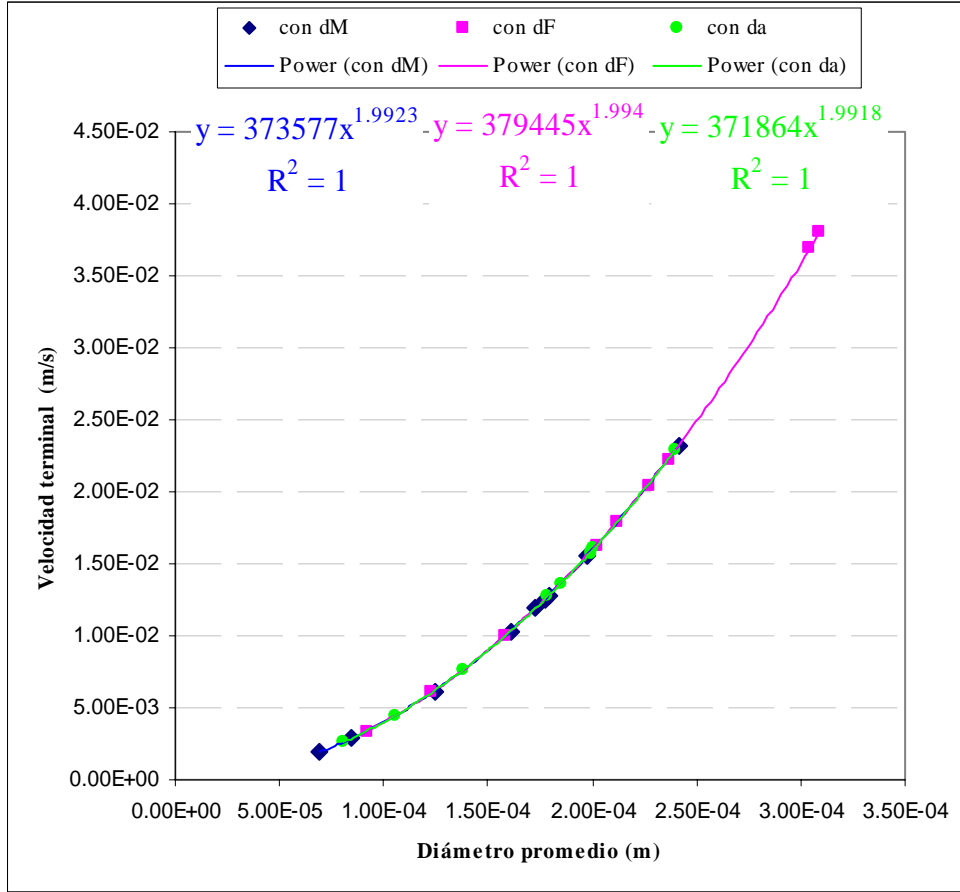
En la primera iteración se tuvieron presentes dos regimenes, es decir, los valores del  $Re_p$  caían en dos intervalos diferentes por lo que se utilizaron dos ecuaciones para la determinación del  $C_d$ , (Ec.14 y 15), a lo largo de las iteraciones se fueron uniformando y tendiendo hacia la ley de Stokes (Ec. 14).



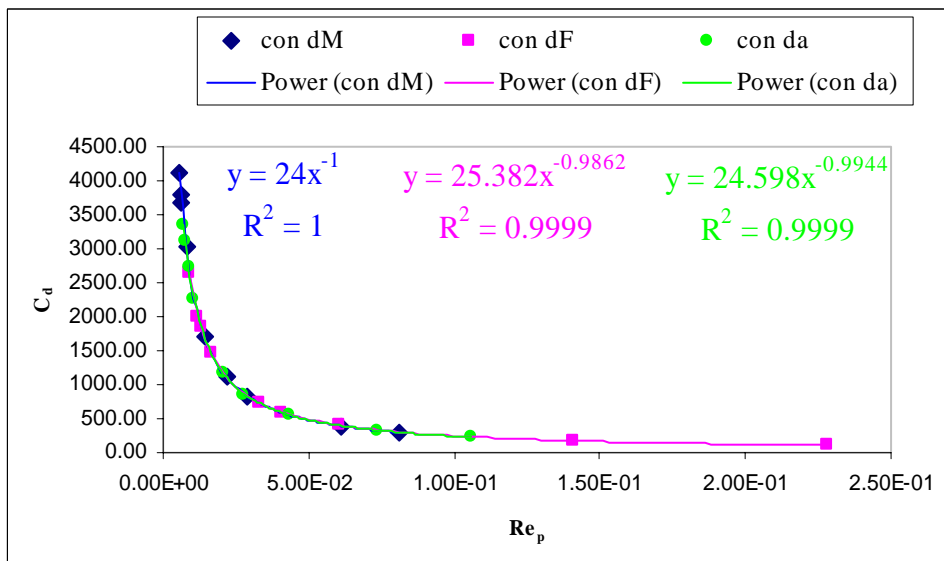
**Figura 11.** Gráfica de  $C_d$  vs.  $Re_p$  para el tubo de 1/2" y líneas de tendencia (potencial) con ecuaciones correspondientes.

En las figuras 12 y 14 se observa que la tendencia que siguen los datos de velocidad final de sedimentación en función del tamaño de partícula es potencial. Si se compara con la figura 5 se observa que los diámetros de partícula medidos de la muestra de papel caen en la región recta, sin desviaciones de la Ley de Stokes, debido a esto y a que los diámetros de las partículas que se estudiaron no son tan pequeños, no fue necesario aplicar el factor de corrección de Cunningham.

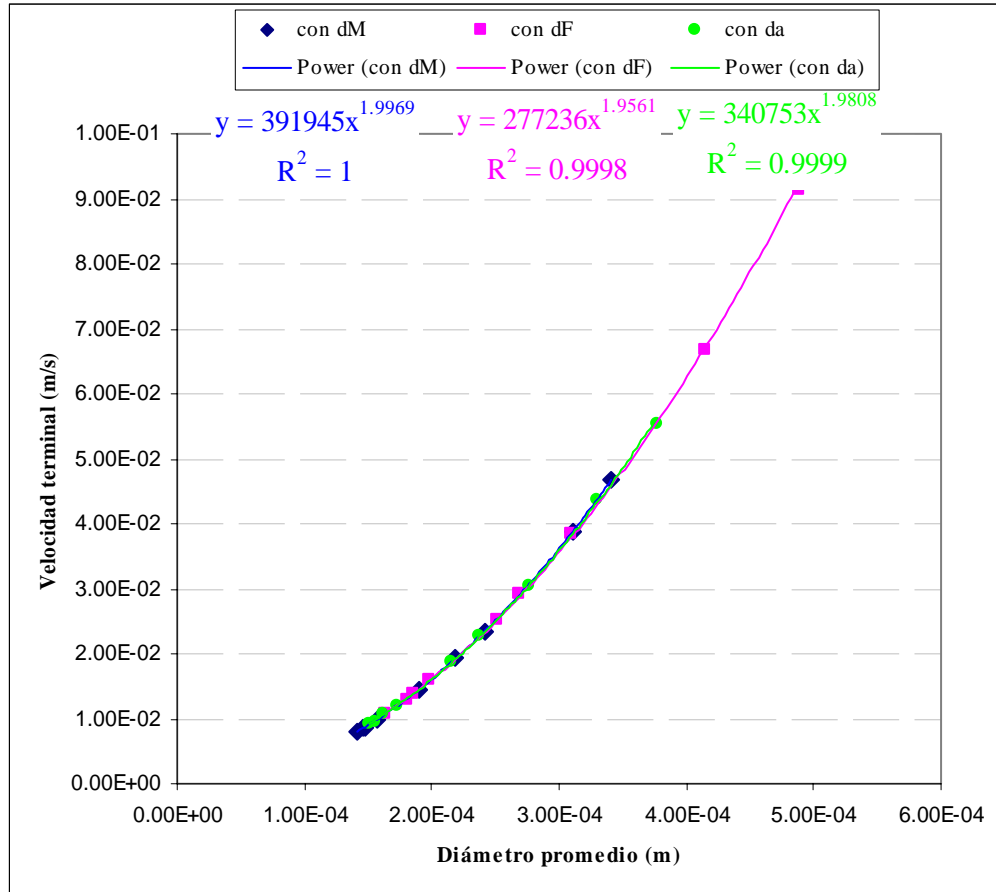
A diferencia de los datos del tubo de 1/2" que tienen un ajuste perfecto ( $R^2=1$ ), los del tubo de 3/4" tienen una buena aproximación, con excepción de los datos obtenidos con el diámetro de Martin que sí tienen un ajuste de  $R^2$  igual a uno, lo que una vez más señala que este tipo de diámetro equivalente para partículas irregulares, es el más significativo de los tres empleados.



**Figura 12.** Gráfica de Diámetro promedio de partícula Vs. velocidad terminal, para el tubo de 1½" y líneas de tendencia (potencial) con ecuaciones correspondientes.



**Figura 13.** Gráfica de  $C_d$  vs.  $Re_p$  para el tubo de ¾" y líneas de tendencia (potencial) con ecuaciones correspondientes.

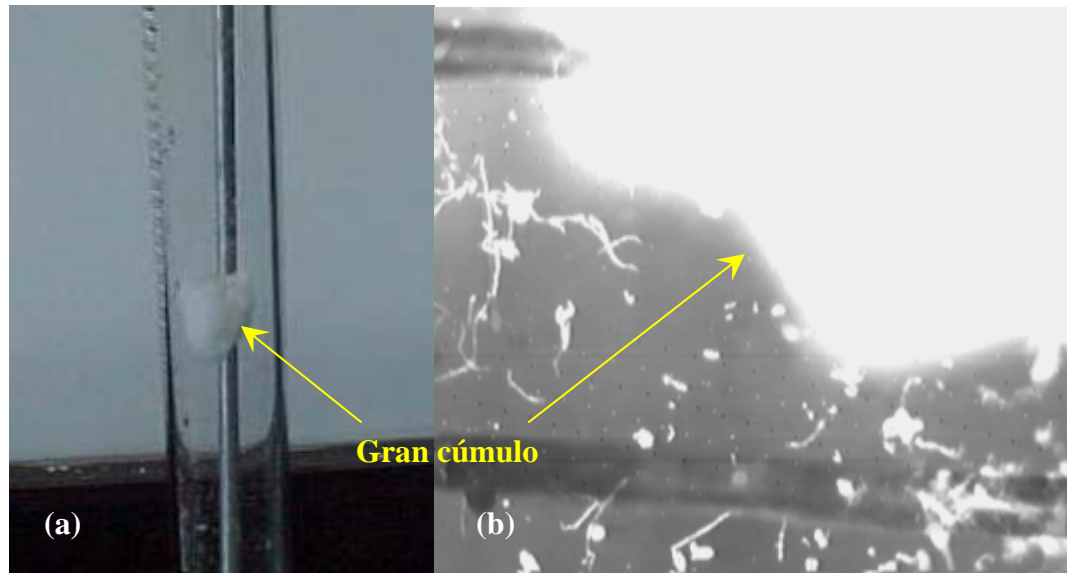


**Figura 14.** Gráfica de Diámetro promedio de partícula Vs. velocidad terminal, para el tubo de 3/4" y líneas de tendencia (potencial) con ecuaciones correspondientes.

Al tomar las imágenes de las partículas en el tubo de 3/4" se observó una situación muy peculiar: al comenzar el suministro de aire, una gran parte de la muestra subía como un cúmulo enorme, como se ilustra en la figura 15, y se depositaba en el tapón de gasa que cubría el extremo superior de la columna, quedando en suspensión solo una pequeña cantidad de la muestra colocada. Al pasar a la altura de la cámara, el cúmulo se apreciaba como una gran mancha blanca que cubría toda el área de la imagen por unos instantes, mientras pasaba. Con tres muestras diferentes se presentó la misma situación, lo que lleva a



pensar que este problema de compactación de la muestra se debe al diámetro tan estrecho del tubo, lo que implica una velocidad axial muy elevada.



**Figura 15.** Gran cúmulo de polvo que se presenta en la columna de  $\frac{3}{4}$ ". En (a) se observa la forma en que este cúmulo sube a lo largo de la columna. En (b) se presenta la imagen tomada por la cámara al pasar el cúmulo.