

## Pressure drop of three-phase suspension flows (water-air-sand) in horizontal pipelines

Filippo Pironti\*, Gabriel Pellegrino, Gluber Meza and Nelson Ramírez

Departamento de Termodinámica, Universidad Simón Bolívar, Apartado Postal 89000  
Caracas 1080A, Venezuela, email: flipppo@usb.ve

### Abstract

In this work we report experimental results and the mathematical model for the flow of three-phase suspensions (gas-liquid-solid) through horizontal pipes in a bench installation. Pressure drops were measured as a function of the suspension velocity and the air flow. Different solid concentrations of sand were used in order to observe the effect of the solid upon the flow regime. The experimental results confirm what we observed in a previous work: the presence of the gas in the suspension reduced the pressure drop when there is no segregation.

**Key words:** Pressure drop, three-phase, suspensions, flow, pipes.

## Caída de presión en flujo de suspensiones trifásicas (agua-aire-arena) en tuberías horizontales

### Resumen

Este trabajo reporta resultados experimentales y el modelo matemático para el flujo de suspensiones trifásicas (gas-líquido-sólido) en tuberías horizontales en una instalación escala banco. Se midieron las caídas de presión en función de la velocidad de la suspensión y del flujo de aire. Se usaron distintas concentraciones de arena para observar el efecto del sólido en el régimen de flujo. Los resultados obtenidos confirman lo encontrado en trabajo previo: la presencia del gas en la suspensión reduce la caída de presión cuando hay segregación.

**Palabras clave:** Caída de presión, trifásicas, suspensiones, flujo, tuberías.

### Introducción

Ha habido numerosas investigaciones en el área de flujo de dos fases, sin embargo en tres fases (líquido-sólido-gas) el flujo en tuberías ha sido poco estudiado. Sharma y Rohatgi [1] en su volumen sobre flujo multifásico en tuberías, cubren todo el espectro de sistemas gas-líquido, líquido-sólido y gas-sólido, sin hacer referencia a sistemas trifásicos. La mayor aplicación del flujo de estos sistemas ocurre en los rectores catalíticos de lecho fluidizado y en los barros de perforación. Sin embargo, la gran mayoría de estos equipos operan en forma vertical y su análisis ha sido confinado a este caso. Es cono-

cido que las características del flujo vertical son diferentes al flujo horizontal, razón por la cual, se hace necesario el estudio de estos sistemas. Adams *et al.* [2] reportaron resultados experimentales para el flujo de suspensiones de arena en agua en tuberías horizontales en presencia de aire y encontraron que la caída de presión se reducía al estar presente el aire para un mismo caudal de suspensión y concentración de sólido-líquido. El presente estudio corrobora lo anterior en pruebas adicionales en un equipo experimental de mayores dimensiones.

### Descripción del aparato experimental

En la Figura 1, se muestra un diagrama del aparato experimental usado durante las pruebas con el sistema trifásico, arena-agua-aire. Una suspensión líquido-sólido fue previamente preparada con agitación mecánica en el tanque de mezcla (70 litros), con concentraciones en un intervalo entre 5 y 40% v/v. Del tanque se bombeaba continuamente por medio de una bomba de desplazamiento positivo tipo tornillo, marca Nemo, a través de una tubería horizontal de 4.7 m de longitud total y de 3.5 cm de diámetro interno. La tubería horizontal se dividió en dos secciones: una sección de entrada con una longitud de 3.5 m, suficiente para asegurar el flujo desarrollado, y una sección de prueba, con una longitud de 1.2 m, en donde se midió la caída de presión entre sus extremos mediante tomas manométricas. Todo el sistema fue construido de acero al carbono, excepto la sección de prueba fabricada de plexiglas, lo cual permitió la observación visual del régimen de flujo en tubería lisa. El caudal de la suspensión fue controlado mediante un reciclo al tanque de alimentación. El flujo de aire fue regulado con un rotámetro previamente calibrado. Todas las pruebas se realizaron a temperatura ambiente. Las propiedades y características del sólido son las mismas de la arena empleada por un trabajo previo, Adams *et al.* [2]. Las diferencias entre el equipo empleado respecto al anterior, fueron: una mayor longitud en la sección de entrada, lo que garantiza el desarrollo completo del flujo y una bomba tipo

tornillo que evita la presencia de pulsaciones típicas de la bomba de diafragma antes usada.

### Consideraciones teóricas

El modelo matemático riguroso del flujo trifásico en una tubería horizontal es extremadamente complejo. En este trabajo se desarrolla un modelo simplificado o de una ecuación, siguiendo el mismo enfoque que utilizaron Toda *et al.* [3] para sistemas bifásicos (líquido-sólido). En general, cuando el caudal promedio de la suspensión es pequeño y/o la concentración de sólidos es alta, se forma un lecho estacionario o móvil de partículas en la parte inferior de la tubería. En cambio, si el caudal promedio es alto y/o la concentración de sólidos es baja, las partículas de sólidos tienden a suspenderse completamente en el líquido.

Si la caída de presión total por unidad de longitud,  $\partial P/\partial L$ , se expresa como resultado de los siguientes factores:

a) Caída de presión,  $\partial P_f/\partial L$ , debido a la fricción entre la mezcla trifásica y la tubería, dado por:

$$\frac{\partial P_f}{\partial L} = \frac{f_{3-ph} \rho_m V_m^2}{2D} \left( \frac{l_w}{\pi D} \right) \quad (1)$$

donde  $l_w$  representa el perímetro mojado,  $D$  el diámetro interno de la tubería,  $f_{3-ph}$  es un factor de fricción Moody para el sistema trifásico, y  $V_m$  es la velocidad superficial media de la mezcla, dada por:

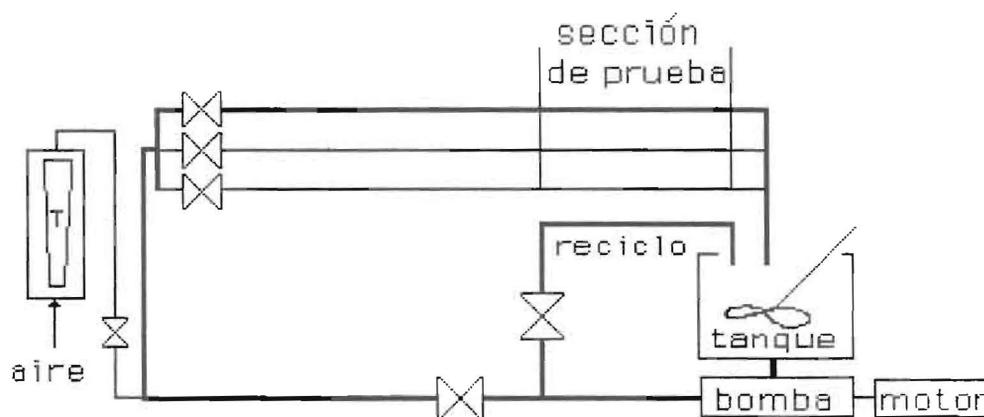


Figura 1. Diagrama del equipo.

$$V_m = \frac{Q_{sl} + Q_g}{A} = v_{sl} + v_g \quad (2)$$

La determinación del volumen retenido de líquido o de gas en sitio es difícil de lograr, por lo general requiere de la medición de la cantidad de líquido o de gas atrapado en un segmento de la tubería. Como lo anterior es difícil de acometer, es conveniente trabajar con el "no-slip gas hold-up",  $\lambda_g$ , llamado a veces como el contenido de gas introducido al sistema, y se define como la razón entre el volumen de gas contenido en un segmento de tubería dividido por el volumen que existiría si el gas y la suspensión se movieran a la misma velocidad (sin deslizamiento).  $\lambda_g$  se puede calcular directamente de los caudales medio de gas y suspensión:

$$\lambda_g = \frac{Q_g}{Q_g + Q_{sl}} \quad (3)$$

donde  $Q_g$  y  $Q_{sl}$  son los respectivos caudales de entrada de gas y suspensión. A partir de la definición de la densidad media de una suspensión trifásica, se tiene:

$$\rho_m = (1 - \lambda_g)[\rho_w + C(\rho_s - \rho_w)] + \lambda_g \rho_g \quad (4)$$

donde  $\rho_g$ ,  $\rho_w$ , y  $\rho_s$  son las respectivas densidades de gas, agua y arena, y  $C$  es la concentración volumétrica de sólidos en la suspensión. Considerando que no hay correlaciones para el factor de fricción trifásico,  $f_{3-ph}$ , se define una caída de presión equivalente en términos de agua pura circulando por la tubería a la misma velocidad de la suspensión, i.e.,

$$\frac{\partial P_f}{\partial L} = (1 - \lambda_g) \frac{\partial P_w}{\partial L} = (1 - \lambda_g) \frac{f \rho_w V_{sl}^2}{2D} \left( \frac{l_w}{\pi D} \right) \quad (5)$$

b) Caída de presión,  $\partial P_{Susp}/\partial L$ , requerida para mantener las partículas suspendidas, dado por:

$$\frac{\partial P_{Susp}}{\partial L} = k \xi (1 - \lambda_g) C (\rho_s - \rho_w) g \frac{V_\infty}{V_{sl}} \quad (6)$$

En esta ecuación, se supone que el peso por empuje de las partículas sólidas es equilibrado por el arrastre que ejerce el fluido sobre estas partículas. Se postula que la caída de presión es proporcional a la caída libre de las partículas en agua pura,  $V_\infty$ . Esta es una suposición simplifi-

cante, ya que la velocidad terminal de una partícula en un medio trifásico es evidentemente diferente al flujo bifásico. Esto último se corrige dividiendo la fuerza de sedimentación de la partícula sola con la velocidad superficial de la mezcla trifásica.

c) Caída de presión,  $\partial P_{Sf}/\partial L$ , debido a la fricción entre las partículas en el lecho móvil y las paredes de la tubería, dado por:

$$\frac{\partial P_{Sf}}{\partial L} = (1 - \xi)(1 - \lambda_g) C (\rho_s - \rho_w) g f_s \quad (7)$$

donde  $f_s$  representa el factor de fricción,  $\xi$  es la fracción de partículas suspendidas relativa al total de partículas presente en la tubería.

d) Caída de presión,  $\partial P_g/\partial L$ , debido a la fricción entre el gas y las superficies líquido-sólidas, dado por:

$$\frac{\partial P_g}{\partial L} = \frac{f \rho_g V_g^2}{2D} \left( \frac{\pi D - l_w}{\pi D} \right) \quad (8)$$

donde  $f$  es el factor de fricción para el flujo de gas en tuberías.

Sobre la base de lo anterior, la caída de presión total vendría expresada por:

$$\frac{\partial P}{\partial L} = \frac{\partial P_f}{\partial L} + \frac{\partial P_{Susp}}{\partial L} + \frac{\partial P_{Sf}}{\partial L} + \frac{\partial P_g}{\partial L} \quad (9)$$

Cuando  $\xi = 1$ , todas las partículas están suspendidas y no se forma el lecho estacionario o móvil, además,  $l_w = \pi D$ , y sustituyendo las expresiones respectivas, la ecuación (9) se puede escribir de la siguiente forma:

$$\frac{\partial P}{\partial L} - (1 - \lambda_g) \frac{\partial P_w}{\partial L} = k(1 - \lambda_g) C (\rho_s - \rho_w) g \frac{V_\infty}{V_{sl}} \quad (10)$$

Ahora dividiendo la ecuación (10) entre  $C(1 - \lambda_g) \frac{\partial P_w}{\partial L}$ , se obtiene la siguiente expresión para el gradiente adimensional de la presión:

$$\frac{\frac{\partial P}{\partial L} - (1 - \lambda_g) \frac{\partial P_w}{\partial L}}{(1 - \lambda_g) C \frac{\partial P_w}{\partial L}} = k \frac{2(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1) g D V_\infty}{f V_{sl}^3} \quad (11)$$

Por lo tanto si se representa en forma gráfica el  $\ln\left(\frac{\frac{\partial P}{\partial L} - (1-\lambda_g)\frac{\partial P_w}{\partial L}}{(1-\lambda_g)C\frac{\partial P_w}{\partial L}}\right)$  vs.  $\ln(v_{sl})$  se obtendría una línea recta, independiente de la concentración de sólidos, de la velocidad del gas y del tamaño de partícula. La ecuación (11) representa el modelo matemático propuesto.

### Resultados experimentales y discusión

En la Figura 2, se presenta en forma gráfica la caída de presión total vs. la velocidad superficial del gas para la tubería de 3.5 cm de diámetro interno, para diferentes velocidades superficiales de la suspensión, manteniendo constante la concentración promedio del sólido en 31.7% v/v.

Como puede observarse, la caída de presión para los distintos flujos de aire es siempre menor que la correspondiente caída de presión cuando no está presente el gas. Para estas corridas se observó, en la mayoría de los casos, visualmente, un régimen de flujo segregado, es decir, la presencia de un lecho móvil.

En la Figura 3, se muestra la caída de presión en función de la velocidad superficial de la suspensión a diferentes flujos de gas para las mismas condiciones anteriores. En esta gráfica se observa de nuevo que para una velocidad de suspensión constante la caída de presión se reduce al inyectar el gas, adicionalmente se observa una velocidad crítica en la cual comienza a aumentar la caída de presión con el flujo de suspensión, es decir, el momento en que desaparece el lecho móvil y quedan suspendidas todas las partículas.

En la Figura 4 se muestra la variación de la caída de presión total en función de la velocidad superficial del gas para diferentes velocidades de suspensión, a una concentración promedio de sólidos de 7.2% v/v y para el mismo diámetro de tubería.

De ella se puede observar que ahora la caída de presión aumenta con el flujo de gas. Al mismo tiempo se observó visualmente la suspensión completa de las partículas, como resultado de una menor concentración de sólidos.

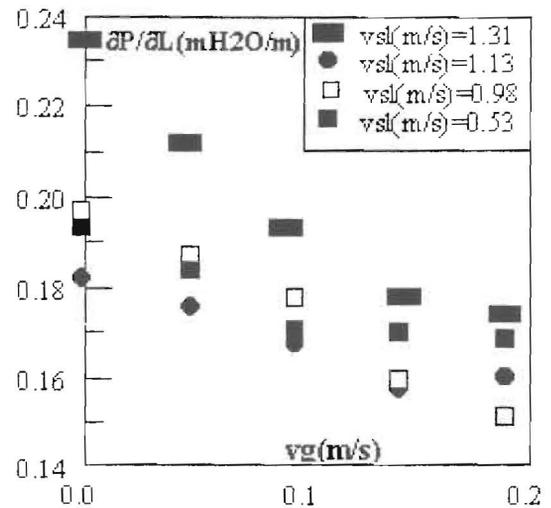


Figura 2. Variación de la caída de presión con la velocidad del gas para diferentes velocidades de suspensión. C promedio del sólido: 31.7% v/v.

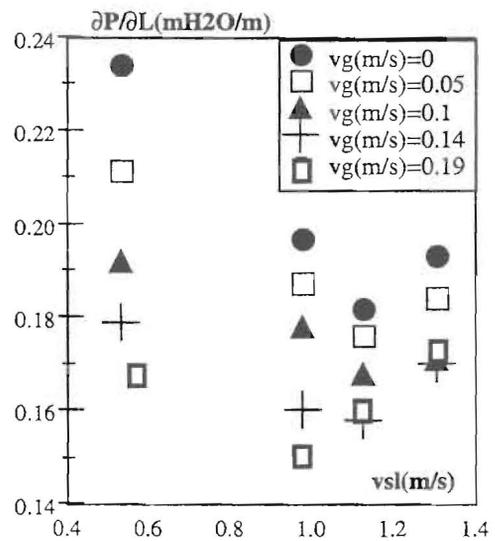


Figura 3. Variación de la caída de presión con la velocidad de la suspensión para diferentes velocidades de gas. C promedio de sólidos: 31.7% v/v.

En la Figura 5 se presenta ahora la variación de la caída de presión con la velocidad de suspensión para diversos flujos de gas a las

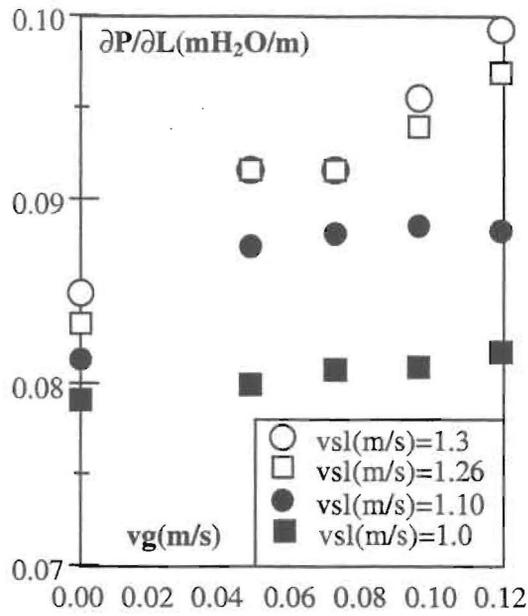


Figura 4. Caída de presión vs. velocidad de gas para diferentes velocidades de suspensión. C promedio de sólidos: 7.2% v/v.

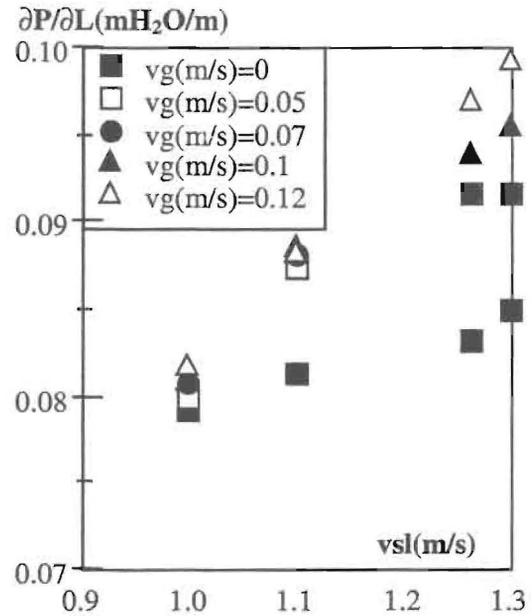


Figura 5. Caída de presión vs. velocidad de la suspensión para distintas velocidades de gas. C promedio de sólidos: 7.2% v/v.

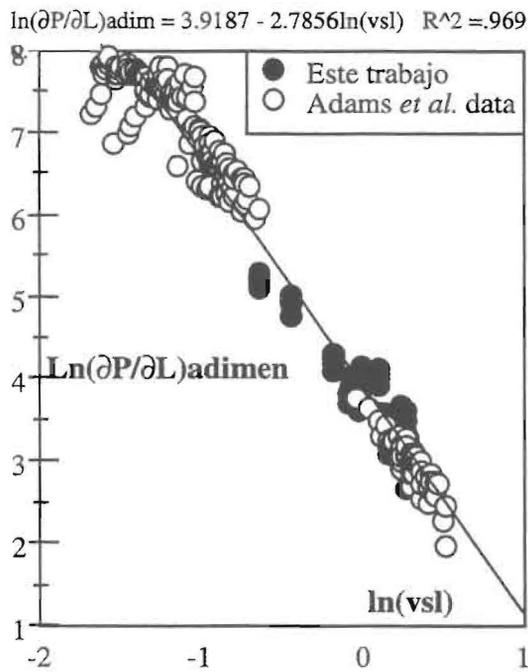


Figura 6. Variación de la caída de presión adimensional con la velocidad de la suspensión.

mismas condiciones anteriores. A diferencia de los resultados presentados en la Figura 3, ahora, no se observa una velocidad crítica y en todo momento la caída de presión aumenta con la velocidad de la suspensión.

Finalmente la Figura 6 muestra la data de este trabajo más la reportada por Adams *et al.* (1995), en donde se presenta gráficamente el logaritmo de la caída de presión adimensional vs. el logaritmo de la velocidad superficial de la suspensión. De dicha figura también se puede deducir que se mantiene la tendencia general observada anteriormente y la línea que correlaciona los puntos experimentales tiene una pendiente negativa cercana a 3, lo que era de esperar del modelo.

### Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló un modelo simplificado para predecir la caída de presión en una tubería horizontal para un sistema trifásico formado por aire, arena y agua. Experimentalmente se encontró que la presencia del gas en la suspensión reduce la caída de

presión cuando hay segregación. La data experimental se pudo correlacionar de acuerdo a una ley de la potencia.

### Notación

C	concentración volumétrica de sólidos ( $m^3/m^3$ )
D	diámetro (m)
f	factor de fricción (-)
g	aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )
k	constante en la ecuación (6)
L	longitud (m)
$\lambda$	fracción volumétrica de gas (-)
P	presión (pascal)
Q	caudal ( $m^3/s$ )
$\rho$	densidad ( $kg/m^3$ )
V	velocidad (m/s)
$V_{\infty}$	velocidad de caída libre de las partículas en agua pura (m/s)
$\xi$	fracción de partículas suspendidas (-)

### Subíndices:

f	fricción
g	gas
l	líquido
s	sólido
Susp	suspendidas
w	húmedo
3-ph	tres fases

### Referencias Bibliográficas

1. Sharma, M. P. y Rohatgi, U. S., "Multiphase Flow in Wells and Pipelines", ASME Editors, NJ, USA. 1992,
2. Adams, D., Ramirez, N. y Pironti, F., "Transport of a three-phase slurry in horizontal pipes", Proceedings of the 6th International Scientific-Technical Conference on New Methods and Technologies in Petroleum Geology, Drilling and Reservoir Engineering, Cracow, Poland, 1995, pp. 319-326.
3. Toda, M., Konno, H., Salto, S. y Maedo, S. "Hydraulic Conveying of Solids Through Horizontal and Vertical Pipes", International Chemical Engineering, Vol. 9, 1969, pp. 553-560.

Recibido el 14 de Enero de 1997

En forma revisada el 1º de Julio de 1997