

# COMPORTAMIENTO DE UNA PLACA DE ORIFICIO EN FLUJO BIFASICO AIRE-AGUA

V.C.S. FERREIRA

Univ. Federal de Rio Grande do Sul, Depto. Mecánica, Lab. de Turbomáquinas y Medición de Flujo, Sarmento Leite 425, Porto Alegre, RS - Brasil

---

## ORIFICE PLATE BEHAVIOUR FOR TWO PHASE AIR-WATER FLOW

### ABSTRACT

In this work, a study on the performance of an orifice plate in two phase flow is presented and analyzed. The final purpose of the work is to obtain the overall discharge coefficient and correlate it to that of the single flow situation. The two-phase flow was a water-air mixture and the experiments were carried out in a specially designed equipment. The variables of interest in this study were the pressure drop and the velocity profile and some discussion and conclusions based on the experimental data are presented. Also some ideas on future work on this area are given.

*Keywords: orifice plate, two-phase flow, flow measurement, fluid flow*

### RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio sobre el funcionamiento de un plato orificio en flujo bifásico. El objetivo final del trabajo es obtener el coeficiente global de descarga y correlacionarlo con el correspondiente a flujo en una sola fase. El flujo bifásico fue aire-agua y los experimentos fueron realizados en un equipo especialmente diseñado. Las variables de interés en este estudio fueron la caída de presión y el perfil de velocidad y se presentan algunas discusiones y conclusiones basadas en los datos experimentales. También se dan algunas ideas sobre futuro trabajo en esta área.

## INTRODUCCIÓN

Gran número de medidores de flujo instalados en todo el mundo son alguna especie de medidores de diferencia de presión (DP). Según Pursley (1994) las figuras son aproximadamente cuarenta por ciento en favor de los medidores de DP. Entre los diferentes modelos DP existentes el más común es el de una placa de orificio. Muchas razones justifican esta preferencia. Precio versus buena exactitud sin calibración es probablemente una razón importante. Placa de orificio tiene también una cantidad maciza de datos en lo que se refiere a desempeño, instalación y aplicación. Existen, ciertamente, más datos para una placa de orificio que para cualquier otro medidor. Estos hechos toman una placa de orificio un medidor muy atractivo. Buen desempeño, sin embargo, está restringido al flujo de fase simple. Cuando se hace funcionar en condiciones de flujo bifásico la incerteza de las mediciones aumenta enormemente. Un conocimiento completo del comportamiento del flujo bifásico y su interacción con una placa de orificio es todavía desconocido.

El interés por el flujo bifásico es un asunto antiguo, el cual probablemente comenzó con la tecnología de vapor durante la revolución industrial. Pero fue solamente por el final de la primera mitad de este siglo que el estudio se tomó más consistente. Kosterin, (1949) sugirió mapas de regímenes para estudiar el flujo bifásico. El flujo es tan complejo que aun hoy en día nuevos mapas están siendo producidos para explicar mejor y clasificar los diferentes regímenes. Recientemente, Spedding y Spence (1993) presentaron un trabajo extenso basado en equipamiento sofisticado comparando los mapas clásicos existentes. La conclusión principal fue que modelos teóricos y empíricos disponibles para predecir los diferentes regímenes y transiciones son todavía deficientes.

Modelos físicos y matemáticos para explicar y simular flujo bifásico han sido propuestos por mucho tiempo. Varios modelos, tales como aquellos presentados por Elghobashi y Abou-Arab (1993) o Goulas y Chistoforou (1990), son bien elaborados. El modelo homogéneo usado para simular un régimen bien disperso ha tenido resultados compatibles. Pero para otras situaciones de flujo (burbujas, estratificado, bloque, ondoso, regímenes anelar o intermitente) los modelos están lejos de ser completos. Los autores piensan que es necesario más conocimiento físico del fenómeno para mejores realizaciones.

Existen muchas razones para estudiar flujo polifásico. Entre los diferentes problemas existentes en el proceso industrial, aquellos relacionados con medida de flujo son, más exigentes debido a la cantidad de dinero comprometida.

El objetivo de este trabajo es estudiar una placa de orificio funcionando en una situación de flujo bifásico. El propósito final es obtener el coeficiente de descarga para flujo bifásico y correlacionarlo con el coeficiente para fase simple

establecido por medio de una ecuación bien aceptada, tal como la ecuación de Stoltz (1978) o la nueva ecuación propuesta por Reader-Harris y Sattary (1990).

El flujo bifásico estudiado fue una mezcla aire-agua en régimen estratificado aguas arriba (upstream) de la placa de orificio y en régimen burbujante disperso aguas abajo (down-stream), según la clasificación de Taitel y Dukler (1976) para flujo horizontal. La fracción de masa ( $x_m$ , fracción de sequedad) de la mezcla aire-agua probada varía de  $5.0 \times 10^{-5}$  a  $1.0 \times 10^{-4}$ .

## PRESENTACIÓN DEL TRABAJO

Medición de flujo bifásico con una placa de orificio fue estudiado por mucha gente. Murdock (1962), James (1965), Rooney (1972) son algunos de los trabajos clásicos más referidos. La mayoría de estos trabajos están basados en modelos de flujo separado (modelos de tres ecuaciones) y/o en el coeficiente de Lockhart-Martinelli (1949). El presente trabajo tiene dos análisis diferentes: el primero, es enfocado con el análisis dinámico de la señal que viene de la célula de diferencia de presión y el segundo, está basado en los perfiles de flujo axial medidos aguas abajo (downstream) de la placa de orificio. Una tentativa de comparar resultados experimentales con teóricos usando el modelo homogéneo es también presentado.

El aire introducido en la corriente de flujo de agua, aunque sea de tipo flujo abajo, afecta el comportamiento dinámico de la señal de la presión. La banda de frecuencia y la amplitud cambian entre las dos situaciones: flujo simple y bifásico. Los efectos observados pueden dar algunas características importantes del comportamiento del flujo interno y parámetros para medir el caudal del flujo bifásico. Existen tres análisis posibles:

a) Comparación entre bandas diferentes de frecuencia para ambas situaciones (simple y bifásico).

b) Comparación entre valores medios para las señales de diferencia de presión.

c) Comparación entre coeficientes estadísticos diferentes para las señales de diferencia de presión.

El trabajo presenta algunos resultados experimentales obtenidos y un análisis preliminar basado en el último caso. Los otros todavía permanecen como un caso de futuro estudio.

El perfil de velocidad del flujo también se altera debido a la presencia de aire. La "vena contracta", conocida como la sección de flujo mínima aguas abajo (downstream) de la placa de orificio, aumenta su sección transversal y se mueve de la posición original al nivel de muy poca adición de aire.

## EQUIPO Y PROCEDIMIENTO

Los datos experimentales fueron obtenidos a partir del sistema de ensayo mostrado en la Fig.1. Este sistema comprende tres secciones diferentes: (1) la sección de entrada, (2) la sección de longitud

de desarrollo y (3) la sección de ensayo. La sección de entrada es un dispositivo de acondicionamiento del flujo, 150mm de diámetro, con un dispositivo tipo "honeycomb", un orificio y una contracción abrupta para 50mm con una sección de reentrada. La sección de desarrollo es usada para promover el desenvolvimiento completo del perfil de velocidad del flujo antes de alcanzar la sección de ensayo. La sección de desarrollo comienza tres diámetros dentro de la sección de entrada, como es mostrado en la Fig.1. La sección de ensayo abarca un tipo más directo de flujo MHI (Akashi et al., 1979), un ingreso de aire en el agua y la placa de orificio. El ingreso del aire es hecho de un tubo de copper tipo "L", de 10mm de diámetro, con varios agujeros pequeños colocados alrededor de la parte inferior de la "L". Con esta solución el aire es mezclado radialmente dentro del agua con un débil remolino, contrariamente al ingreso tangencial adaptado por otros autores (Millington y King, 1990).

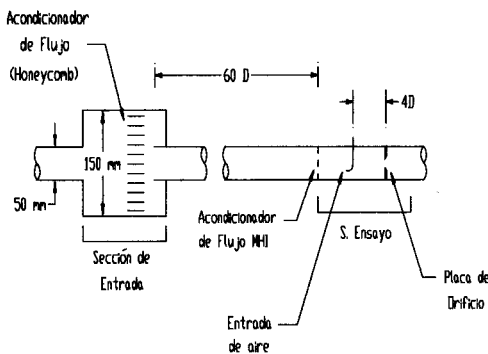


Fig.1 - Sistema de ensayo

El sistema de ensayo es en realidad parte de una banca de calibración disponible en el Laboratorio de Medición de Flujo (UFRGS - DEMEC) usado para calibrar medidores de flujo líquido desde 0.1 kg/s hasta 5.0 kg/s con una incerteza de  $\pm 0.7\%$  FS. La bancada de ensayo es intermitente con una válvula divisoria de flujo neumática descrita por Ferreira (1991). La placa de orificio probada es del tipo cónico con razón  $d/D$  ( $\beta$ ) de 0.53 y puntos de medición de la presión en  $D$  y  $D/2$ . La célula de diferencia de presión usada fue una Transmetel, modelo 4EZ2B3 y el analizador FFT fue de Brüel Kjaer, modelo BK 2034. El perfil de velocidad fue medido con un velocímetro Laser Doppler LDV de Dantec, modelo FVA con dos componentes y dos células de Bragg. La fuente de laser es de ion de argón y fue un Spectra Physics modelo 2016.

Los resultados presentados y analizados en este trabajo están basados en los ensayos experimentales mostrados en la Tabla 1. Cuatro medidas proporcionales de flujo de agua diferentes fueron mezcladas con una constante medida de flujo de aire.

Tabla 1 - Ensayos experimentales.

Ensayo	agua kg/s	aire kg/s $10^{-4}$	$x_m$ $10^{-5}$	$x_v$ $10^{-2}$	$\Delta P$ N/m <sup>2</sup>
115w	1.15	-	-	-	3000
115wa	1.15	1.24	5.71	4.39	3000
155w	1.55	-	-	-	2500
155wa	1.55	1.24	6.52	4.98	2500
190w	1.90	-	-	-	2000
190wa	1.90	1.24	7.99	6.00	2000
217w	2.17	-	-	-	1500
217wa	2.17	1.24	10.78	7.97	1500

En la Tabla 1,  $x_v$  es colocado para la fracción de volumen de la mezcla y  $\Delta P$  para la diferencia de presión media nominal.

El caudal del flujo de agua fue medido usando la banca de calibración de medidores de flujo líquido, el aire fue controlado a través de un medidor de flujo de aire (tipo área variable) y la señal de diferencia de presión entre los puntos de medición de la presión  $D$  y  $D/2$  fue adquirida por el analizador FFT.

## RESULTADOS

Esta sección presenta los resultados experimentales. Las dos medidas de variables de interés son las fluctuaciones de diferencia de presión ( $\Delta P'$ ) entre los puntos de medición de la presión  $D$  y  $D/2$  y el perfil de velocidad del flujo aguas abajo (down-stream) en la sección  $D/2$ .

Las Figuras 2 y 3 son los tiempos registrados para las fluctuaciones de diferencia de presión para el ensayo 190W y 190Wa, respectivamente. Esta variable es obtenida del analizador FFT y es definida como:

$$\Delta P' = \Delta P - \Delta \bar{P}$$

donde  $\Delta P$  es la diferencia de presión instantánea y  $\Delta \bar{P}$  la diferencia de presión media temporal.

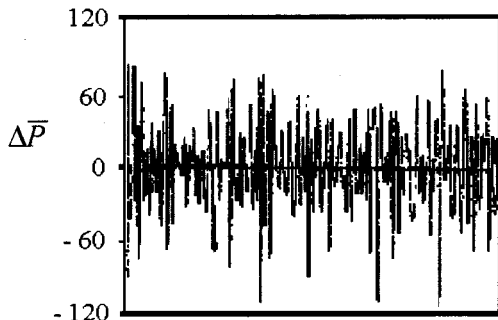


Fig. 2 : Fluctuación de la diferencia de presión (N/m<sup>2</sup>) - ensayo 190W.

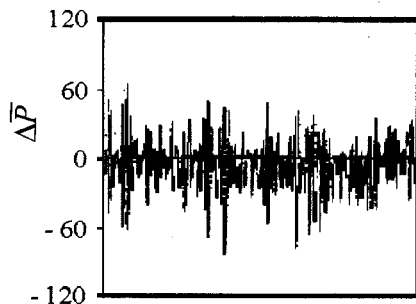


Fig. 3 : Fluctuación de la diferencia de presión (N/m<sup>2</sup>) - ensayo 190Wa.

La Fig. 4, muestra los perfiles de velocidad axial media medidos en la sección D/2 para el flujo simple y bifásico.

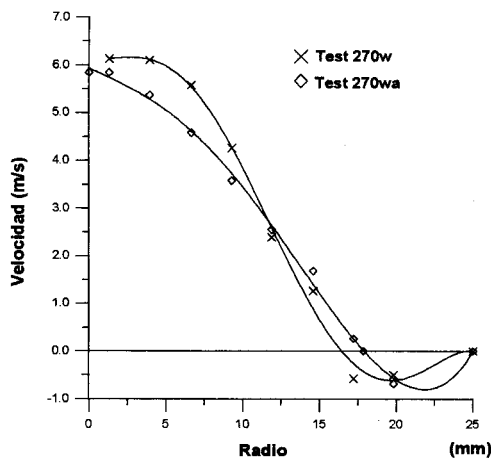


Fig. 4 : Perfiles de velocidad axial

#### ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El presente análisis está centrado en la fluctuación de diferencia de presión y en los perfiles de velocidad media axial.

**Fluctuación de la diferencia de presión:** En la primera parte de este análisis la señal de la fluctuación de la diferencia de presión fue tratada por el analizador FFT. Muchas correlaciones diferentes entre flujo simple y bifásico fueron estudiadas. La realización más consistente ya obtenida fue con respecto a la densidad del espectro de potencia. Las Figs. 5 y 6 muestran el espectro de potencia para ambas señales de tiempo previas.

El análisis espectral para todas las fracciones de sequedad diferentes probadas, revelan una consistencia notable. Aunque las Figs. 5 y 6

muestran un caso particular, ellas son representativas y similar a todas las otras.

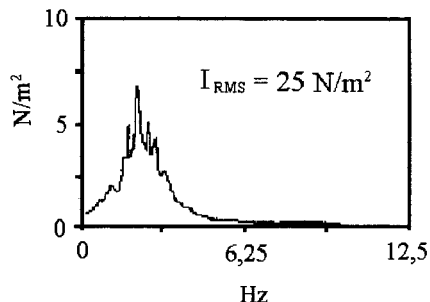


Fig. 5 : Densidad del espectro de potencia - (ensayo 190W)

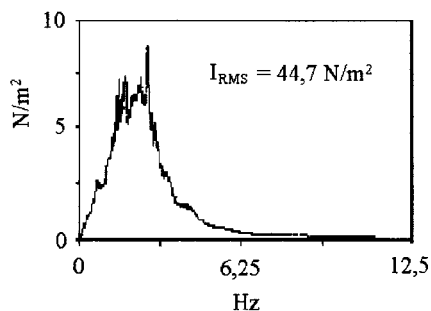


Fig. 6 : Densidad del espectro de potencia - (ensayo 190Wa)

En los diagramas previos es observado que introduciendo la segunda fase (aire) en una corriente de flujo de agua:

- La banda de frecuencias aumenta levemente teniendo repetidos picos de frecuencias bien definidos, los cuales probablemente representan algunos efectos de instalación.

- La banda de frecuencias también se desliza una pequeña cantidad hacia las frecuencias pequeñas.

- La intensidad de la función del espectro de potencia aumenta después de introducir la segunda fase.

Estos tres puntos presentados son casos posibles de análisis. El último, sin embargo, parece más prometedor en el momento. Para calcular el incremento causado por la adición de la segunda fase, la integral de la densidad del espectro de potencia,  $I_{RMS}$  en cada caso, fue ejecutada. Los valores de  $I_{RMS}$  para cada caso probado versus el caudal del flujo de agua son mostrados en la Fig. 7.

Segun la Fig. 7, es visible la dependencia lineal de  $I_{RMS}$  y el caudal del flujo líquido (agua). Este efecto puede proveer una información considerable para medir el caudal del flujo líquido en flujo bifásico. Usando un dispositivo para realizar la integración instantánea de la señal de la diferencia de presión será posible correlacionar el

caudal del flujo líquido con el flujo total del flujo bifásico.

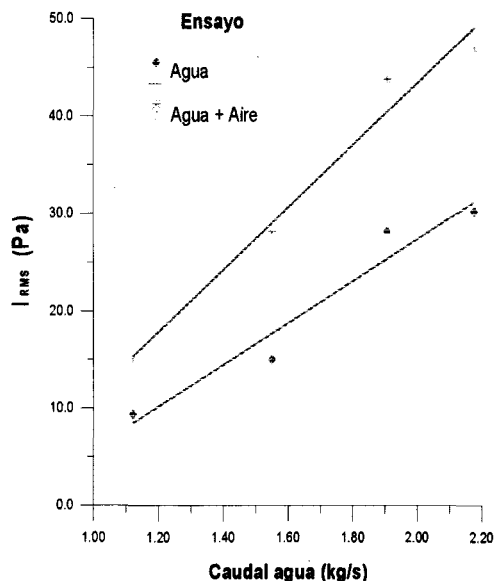


Fig. 7 :  $I_{RMS}$  x Caudal del flujo (agua)

**Perfil de velocidad:** La segunda parte de este análisis está basado en los perfiles de velocidad axial de promedio temporal para ambas situaciones. Las mediciones fueron tomadas en la sección D/2 de modo de esperar capturar perfiles encerrados en la "vena contracta". Bates, (1981), midió el flujo de fase simple con varios números de Reynolds diferentes, desde  $6.7 \times 10^4$  hasta  $1.8 \times 10^5$  y encontró en D/2, perfiles colocados poco después de la "vena contracta".

De la Fig. 4, se puede ver que las velocidades máximas en ambos ensayos, son casi los mismos, pero la forma de los perfiles difiere uno a otro a lo largo de la distancia radial. Las tres zonas diferentes aguas abajo (downstream) de la placa de orificio, conocidas como núcleo central, camada de cizallamiento (o región de mezcla) y de atrás de la zona de flujo (también zona negativa) son diferentes en ambas situaciones. En el flujo bifásico la zona de atrás es reducida y la camada de cizallamiento aumenta. El gradiente de velocidad disminuye y fuertes mecanismos de difusión fueron observados en la zona de mezclamiento. Esta zona de alta difusión fue visible mirando desde arriba de la sección de ensayo. La intensidad de turbulencia en la zona de mezcla alcanzó hasta 100%, la cual fue más alta que la intensidad de turbulencia para la fase simple (casi 70%) en la misma zona.

La posición radial del punto de velocidad zero, aquí definida como "radius de la vena contracta",  $r_{vc}$ , puede ser obtenida directamente de los resultados experimentales. La Tabla 2, presenta

estos resultados medidos y una comparación entre  $r_{vc}$ , medido y calculado según la teoría homogénea.

Tabla 2 - Comparación entre  $r_{vc}$  calculado y medido.

Ensayo	Medido $r_{vc}$ (mm)	Calculado $r_{vc}$ (mm)	Diferencia %
115w	14.060	14.160	- 0.71
115wa	14.815	14.182	4.26
155w	14.250	14.723	-3.32
155wa	16.350	14.740	9.84
190w	15.010	15.765	-5.03
190wa	17.050	15.780	7.74
217w	15.550	16.040	-3.15
217wa	17.900	16.055	10.30

De la Tabla 2, la diferencia entre los dos valores puede ser vista. Los ensayos en fase simple muestran pequeñas diferencias negativas, es decir, los valores calculados fueron levemente más grandes que los medidos. Esto podía ser esperado porque las ecuaciones usadas fueron teóricas y el coeficiente de velocidad,  $C_v$ , fue negligenciado. Contrariamente, la comparación para ensayos de flujo bifásico entre los valores medidos y calculados mostró grandes y positivas diferencias. Una explicación posible es debido a la sección transversal circular asumida para estos cálculos. Aguas arriba de la placa de orificio, el flujo es estratificado con la fase de gas asumiendo lo alto del tubo. Grandes burbujas son apretadas para cruzar el orificio de la placa. Aguas abajo, sin embargo, el flujo es más homogéneo con pequeñas burbujas (acercas de un cuarto del diámetro previo) mayormente dispersas alrededor del núcleo central del flujo formado principalmente por la fase líquida. Es posible que la fase líquida se concentre en el núcleo debido a su alta energía. Desde allí ésta puede fácilmente desplazar la fase gas para formar una geometría anular alrededor del líquido. Es esperada una geometría anular no simétrica con respecto al eje alrededor del núcleo líquido debido a la pequeña densidad de esta fase. Así, la sección transversal circular para el flujo aguas abajo (downstream) no fue ciertamente una buena forma asumida.

## CONCLUSIÓN

Esta sección presenta las conclusiones alcanzadas hasta aquí. Para los efectos dinámicos el presente estudio muestra los primeros resultados numéricos. Como fue mostrado, existe buena posibilidad para correlacionar la integral  $I_{RMS}$  con el caudal del flujo líquido. Un dispositivo de integración simultánea debe ser desarrollado para probar esta posibilidad. El autor cree que serán necesario más datos experimentales para correlacionar otras situaciones diferentes.

Información adicional puede también ser inferida a partir de estos resultados. De los tres

análisis posibles presentados inicialmente, los casos (a) y (b), mostraron gran complejidad, pero deben ser considerados como casos de futuro estudio. El análisis preliminar para la banda de frecuencias parece estar relacionado con el caudal del flujo en diferentes fracciones de masa. Es necesario mayor cantidad de datos, sin embargo, para asegurar tal conclusión. El espectro de potencia, también, mostró algunas frecuencias seleccionadas que pueden ser referidas para efectos de instalación y algunas para el comportamiento del flujo. Es posible, tal vez, separar tales frecuencias para entender mejor el comportamiento del flujo. Estos son casos de futuro estudio.

A partir del análisis del perfil de velocidad algunas conclusiones importantes fueron obtenidas, la mayoría de ellas relacionadas con el flujo padrón aguas abajo de la placa de orificio. Estas conclusiones proporcionaron mayor conocimiento acerca del flujo bifásico. Más mediciones de flujo y otras investigaciones serán necesarias para alcanzar el propósito principal de este trabajo. Las futuras investigaciones pueden ser enfocadas en los siguientes puntos:

- Accesar la intensidad real y posición real del flujo invertido a través de un análisis incluyendo la componente de velocidad circunferencial.

- Determinar el tamaño real y la posición de la "vena contracta" para flujo bifásico para diferentes mezclas aire-agua.

- Determinar los valores reales de las distribuciones de fracciones de vacíos aguas abajo (downstream) de la placa de orificio con el PDA (Analizador Dinámico de Partículas).

#### AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la COPESUL así como al Sr. Cominges, J.C, al Sr. Yates, C.A. y al Sr. Favaretto del Laboratorio de Turbomáquinas y Medición de Flujo y a las Sras. Venzon y Asenjo, por la gran contribución.

#### REFERENCIAS

- Akashi, K., Watanabe, H. and Koga, K. "Development of new flow rectifier for shortening upstream straight pipe length of flowmeter". Symp. on Flow Measurement and Control in Industry, pp 279 - ,Tokyo, (1979).
- Bates, C.J. "Laser Doppler Anemometry Measurements of the Flow through an Orifice Plate"- Flow: Its Measurement and Control in Science and Industry - Second International Symposium, St Luis, March/1981.
- Elghobashi, S.E. and Abou-Arab, T.W. "A two equation model for two-phase Flows", Phys Fluids, 26 (4), pp 931-938, (1983).
- Ferreira, V.C.S., Souto, S.L.L. and Schüller, M.B. "Medidores de Fluxo: Obtenção da Curva de Calibração via Terminal Inteligente", XI COBEM, Proceedings, pp 49 - 52, S. Paulo, (1991).
- Goulas, A. and Chistoforou, V. "Two phase (solid-liquid) flow Modelling", Lab. of Fluid Mech. and Turbomachinery, - Aristotle Univ. of Thessaloniki, Dept. Mech. Eng., (1990).
- James, R. "Metering of steam-water two-phase flow by sharp-edged orifices". Proc. Instn. Mech. Eng., 180 pt. 1 (23): 549-66, (1965).
- Kosterin, S.I. "An investigation of the influence of the diameter and Inclination of a tube on the hydraulic resistance and flow structure of gas liquid mixtures". Izv. Akad. Nauk SSSR, Otdel Tekh, Nauk, 12, pp 1824-1830, (1949).
- Martinelli, R.C. and Lockhart, R.W. "Proposed correlation of data for isothermal two phase, two component flow in tubes", Chem. Eng. Prog., 45(1), pp 39-48, (1949).
- Millington, B.C. and King, N.W. "Further Development of a jet Mixer/Turbine meter package for the Measurement of gas-liquid flows". NEL Internal Report - Glasgow, (1990).
- Murdock, J.W. "Two-Phase Flow Measurement with orifices". in Trans. ASME J. Basic Eng. 84 (D): 419-433, (1962).
- Pursley, W.C. "Multiphase Flow Measurement"-Three days course on Flow Measurement,- 8<sup>o</sup> SIBRAT, Gramado, RS, BRAZIL, 25 - 28, (1994).
- Reader-Harris, M.J. and Sattary, J.A. "The orifice plate discharge coefficient equation", Flow Meas. Instrum., vol 1, Butterworth & Co. Publ. Ltd, pp 67-76, (1990).
- Rooney, D.H. "Steam-water flow through orifices". NEL meeting on Two-phase flow through orifices and nozzles", NEL Report 549, National Engineering Laboratory, Glasgow, pp 1-17, (1972).
- Spedding, P.L. and Spence, D.R. "Flow Regimes in two phase gas-liquid Flow", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 19, N02, pp 245-280, (1993).
- Stolz, J. "A universal equation for the calculation of discharge coefficient of orifice plate". In: Flomeko 1978 - Flow Measurement of Fluids, H.D. Dijkstra and E.A. Spencer (Eds). North-Holland Publishing Co, Amsterdam, 519-534 (1978).
- Taitel, Y. and Dukler, A.E. "A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal flow" A.I. Chem. J., 22(1): 47-55 (1976).