



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

FALLA DE ORIGEN

ANÁLISIS DE AIREACIÓN EN DOS MODELOS EXPERIMENTALES DE VERTEDORES

TESIS

Que para obtener el título de:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
(Mecánica)

presenta

NOÉ ESTÉVEZ LEAL



DIRECTOR DE TESIS: Dr. RAFAEL B. CARMONA PAREDES

MÉXICO, D.F.

OCTUBRE DE 1995

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

67
Zejeu

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE AIREACIÓN EN DOS MODELOS
EXPERIMENTALES DE VERTEDORES**

TESIS

Que para obtener el título de:

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
(Mecánica)**

presenta

NOÉ ESTÉVEZ LEAL



DIRECTOR DE TESIS: Dr. RAFAEL B. CARMONA PAREDES

MÉXICO, D.F.

OCTUBRE DE 1995

Esta obra se la dedico aquellos seres que más quiero, los que me han apoyado siempre, los que me han dado todo incluso hasta la vida, a mis PADRES.

Agradezco al equipo de investigadores del área de mecánica, fluidos y térmica del Instituto de Ingeniería, y muy especialmente al Ing. Eduardo Rodal Canales y al Dr. Rafael B. Carmona Paredes por el apoyo que me han proporcionado.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN EN VERTEDORES.....	3
2.1 ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN RÍOS.....	3
2.2 VERTEDORES.....	4
2.3 CAVITACIÓN EN LA ESTRUCTURA DE LOS VERTEDORES.....	6
2.4 AIREACIÓN EN VERTEDORES.....	8
3. DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE ASCENSO BURBUJAS DE AIRE.....	11
3.1 FUERZA DE FLOTACIÓN.....	11
3.2 FUERZA DE RESISTENCIA.....	12
3.3 FUERZA DE FLOTACIÓN DEBIDA AL EFECTO POR CAMBIO DE RADIO DE CURVATURA.....	16
3.4 CALCULO DE LA VELOCIDAD DE ASCENSO.....	19
4. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIÓN DE AIRE.....	24
4.1 REGISTRO EN UN CANAL CON CURVATURA VERTICAL.....	24
4.2 REGISTRO EN UN CANAL RECTO.....	54
4.3 COMPARACIÓN DE MEDIDAS.....	65
5. APLICACIÓN DE MODELOS TEÓRICOS A LA REPRESENTACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE AIRE.....	66
5.1 DESCRIPCIÓN DE MODELOS TEÓRICOS.....	66
5.2 APLICACIÓN A CANALES EXPERIMENTALES.....	67

**6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA ESPACIAMIENTO
DE AIREADORES.....81**

BIBLIOGRAFÍA.....83

ANEXO 1.....85

NOMENCLATURA

A	Área del cuerpo
a	Aceleración
a_c	Aceleración centrífuga
b	Ancho del canal
C	Concentración de aire
C_D	Coefficiente de resistencia (forma)
C_e	Concentración media en flujo uniforme
C_m	Concentración media de aire
C_w	Concentración en la plantilla
C_i	Concentración media en condiciones iniciales
C^*	Relación volumen de aire/ volumen de agua
c	Carga piezométrica por efecto centrífugo
d	Altura del tirante
d_B	Diámetro equivalente de burbuja
F_a	Fuerza de resistencia
F_c	Fuerza centrífuga
F_g	Fuerza debido al peso
F_p	Fuerza adicional por efecto centrífugo
F_r	Numero de Froude ($V/(gY_{eq})^{1/2}$)
F_f	Fuerza de flotación
g	Constante de la fuerza de gravedad
h	Carga piezométrica total
h_s	Carga piezométrica
L	Longitud característica del cuerpo
k	Coefficiente de cavitación
m	Masa
P	Presión absoluta
P_c	Presión ejercida por fuerza centrífuga
P_v	Presión de vapor del líquido
q_{aire}	Gasto volumétrico de aire por unidad de ancho
q_{agua}	Gasto volumétrico de agua por unidad de ancho
Re	Numero de Reynolds
r	Radio de curvatura
S	Longitud a lo largo del canal
U_r	Velocidad terminal de la burbuja
u	Velocidad media
V	Velocidad de la rápida
V_e	Velocidad local de entrada de aire
v	Volumen
v_B	Volumen de la burbuja
x	Longitud a lo largo del canal para el cálculo

Y.9 Tirante abundado para la concentración de 90%
Yeq Tirante equivalente sin aire
 α Pendiente del canal
 β Relación q_{aire}/q_{agua}
 γ Peso específico
 ρ Densidad
 ν Viscosidad cinemática

1 INTRODUCCIÓN

La importancia del uso de aireadores en los vertedores radica en la prevención de erosión por cavitación en la plantilla. La erosión por cavitación puede evitarse, o por lo menos reducirse, si la concentración de aire cerca de la plantilla es mayor que 5-10%, pero en algunos casos no se conoce la concentración en el fondo, si no la concentración media C_m , ya que todos los modelos se basan en ésta, por lo que se debe hacer una correlación entre C_m con C_w (concentración en la plantilla). Para dicha correlación Rao y Gangadharaiah [21], derivaron la siguiente expresión, obteniendo C_w en términos de C_m .

$$C_w = C_m^{3/2} + 0.000575 * \left(\frac{1 - C_m}{C_m} \right)^3 - 0.1 * (1 - C_m)^3$$

La derivación de la expresión anterior se basa en datos de un vertedor con pendiente constante, en el cual se tienen un flujo uniforme a lo largo del mismo, de tal manera que para evitar la erosión por cavitación se necesita que C_m sea mayor a 20%, para que este valor de concentración de aire se mantenga es necesario suministrar aire a través de aireadores de fondo dependiendo de la geometría particular de cada vertedor. Esta correlación no es válida para vertedores en el cual el flujo no es uniforme, pero se puede realizar para tener una idea del orden de C_w .

El tema central de este trabajo de tesis se refiere al estudio de la permanencia de aire en el flujo de agua, por lo que se manejara el modelo teórico en función de concentraciones medias C_m de aire, en lugar de concentraciones en la plantilla C_w . La correlación para hallar C_w en función de C_m se darán en estudios posteriores a éste.

Los trabajos experimentales se realizaron en el modelo del vertedor de la presa HUITES (Sinaloa), (escala 1:21), y en el modelo seccional del vertedor de la presa AGUAMILPA (Nayarit), (escala 1:30). Se realizó investigación bibliográfica sobre el uso de aireadores y el comportamiento de un sistema en dos fases (gas y líquido), además se realizaron una serie de mediciones en ambos modelos, para determinar el comportamiento de las burbujas de aire en el agua. Con base en la bibliografía se desarrolló un modelo matemático sobre el comportamiento de las concentraciones de aire en el flujo del agua, el cual se calibró con las mediciones en el modelo de Huites y se comparó con mediciones de modelos de otros tipos de vertedores.

Al término de este trabajo se dan recomendaciones para el uso y espaciamiento de aireadores en los vertedores con el fin de poder disminuir el daño que sufren los vertedores por cavitación.

2 ANTECEDENTES DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN EN VERTEDORES.

2.1 ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN RÍOS

Dentro de la ingeniería de presas es de vital importancia el estudio del flujo en los ríos. Para ello se establecen estaciones de medición a lo largo de su cauce, las cuales registran el escurrimiento de agua a lo largo del tiempo. Con la información se realizan estudios estadísticos y se vierte la información en hidrogramas, los cuales son representaciones gráficas del flujo de un río con respecto al tiempo. Con estas mediciones se determina la capacidad potencial de volumen de agua a almacenar por la presa en estudio. Sin embargo, la distribución del escurrimiento no es un proceso completamente previsible y está expuesto a la ocurrencia de avenidas extraordinarias.

Se llama avenida al incremento súbito del escurrimiento. Debido a que las características que definen una avenida son el gasto máximo o pico, el tiempo de duración y el volumen. Durante el desarrollo del proyecto de la estructura hidráulica se debe contar con varios hidrogramas para el sitio del proyecto, a fin de que se pueda escoger el que represente las condiciones más desfavorables.

2.2 VERTEDORES

Las presas se construyen para almacenar la mayor cantidad de agua durante el periodo de lluvias, con la finalidad de poder disponer de agua a lo largo del año o el mayor tiempo posible. Por razones sobretodo económicas, el diseño se hace con base en el cálculo de la capacidad más probable para almacenamiento, no para el volumen esperado en periodos extraordinarios. En estos últimos casos, la capacidad de almacenamiento puede sobrepasarse y por tanto se requiere evacuar el agua excedente por una superficie vertedora, ya sea por encima de un muro, una placa, o una descaga de fondo inmediatamente después de llegar al nivel máximo de almacenamiento. A la estructura utilizada para tal efecto se le denomina vertedor y puede presentar diferentes formas según las finalidades a que se destine. El vertedor debe tener capacidad para descargar la avenida máxima probable sin dañarse a si mismo y sin dañar la presa o cualquiera de sus estructuras y al mismo tiempo mantener el nivel del vaso abajo de un nivel máximo determinado previamente.

Para lograr el diseño adecuado del vertedor de una presa es necesario conocer la avenida máxima probable que puede presentarse. Esta se obtiene a partir de diferentes métodos y es conveniente aplicar varios de ellos y comparar los resultados, escogiendo el valor que se considere más razonable. Los procedimientos más utilizados son los siguientes:

- a) A partir de la precipitación máxima probable, cuando se tiene disponible la información necesaria (mediciones en un intervalo suficientemente largo).
- b) Métodos estadísticos.
- c) Por comparación conservadora entre cuencas con características semejantes y entre la magnitud de avenidas que se hayan adoptado para presas en cuencas comparables.

2.2.1 IMPORTANCIA DE LOS VERTEDORES

Una de las decisiones más importantes en el diseño de una presa es aquella que se refiere a seleccionar correctamente la avenida de diseño para el cálculo de la capacidad del vertedor. Es necesario considerar diferentes aspectos concernientes principalmente a la economía y seguridad del proyecto, lo cual requiere un completo estudio del problema. Todas las presas deben diseñarse para soportar sin falla una avenida relativamente grande, sobretodo cuando una falla puede causar pérdidas de vidas o daños de consideración a propiedades.

Las obras de excelencias son parte intrínseca de las presas y representan verdaderas válvulas de seguridad de las mismas y éstas deben entrar en funcionamiento inmediatamente después de que el vaso se llena. Sin embargo ha habido fallas de presas debido a insuficiente capacidad de descarga o a

defectos en el diseño de la propia obra, como se puede observar en la siguiente lista publicada en 1973 por la Comisión Internacional de Grandes Presas [3], donde se pueden ver las causas de falla de 1830 a 1965 de 8935 presas, considerando como presa grande aquella cuya cortina tiene una altura mayor que 15 [m].

<u>Causa</u>	<u>%</u>
Falla de la cimentación	34
Falla en la estabilidad de la cortina principal	37
Obra de excedencias inadecuada	17
Falla de diques en la presa	1
Falla en los conductos de desfogue	3
Sismos	3
Otras	5

En particular, se debe tener especial cuidado al evaluar la seguridad de una obra de excedencias en una presa de tierra o tierra y enrocamiento. Esto debido a que si por una operación defectuosa o por la presencia de una avenida mayor de la supuesta, el nivel del agua sobrepasa la elevación de la corona de la cortina, puede haber graves consecuencias para la vida de las personas y los bienes materiales localizados aguas abajo de la misma, ya que el agua arrastraría los materiales de la cortina y provocaría la destrucción de la presa; no así en las presas con cortina de concreto, en donde las consecuencias para tales condiciones pueden ser menores.

La obra de excedencias debe ser además hidráulica y estructuralmente adecuada y con las descargas localizadas de manera que no erosionen el pie de la cortina u otras estructuras existentes aguas abajo.

Se puede afirmar que en general, el incremento del costo de una obra de excedencias no es directamente proporcional al incremento en la capacidad de descarga, por lo que el costo de una obra de capacidad muy amplia sólo será moderadamente mayor a la de otra con capacidad reducida.

Esta es la razón por la que en la actualidad el criterio general es el de proyectar obras de excedencias con capacidades de descarga amplias, sobre todo cuando los datos hidrológicos abarquen poco tiempo y la presa se encuentre localizada en una cuenca expuesta a fenómenos meteorológicos que puedan provocar escurrimientos de gran magnitud y aguas arriba de zonas densamente pobladas en donde la seguridad de la misma debe ser total.

2.3 CAVITACIÓN EN LAS ESTRUCTURAS VERTEDORAS

El efecto conocido como cavitación ocurre cuando un líquido fluye con presiones cercanas a la atmosférica y es fuertemente acelerado, puede alcanzar con facilidad presiones menores que su presión de vapor. En esas condiciones, se presenta la formación de burbujas que pueden ser transportadas a zonas de alta presión donde tienden a colapsar. Este colapso ocurre en un tiempo muy corto, generando ondas de choque de alta intensidad y frecuencia. Si las burbujas se encuentran cerca o en contacto con una pared sólida cuando cambian de estado (gas-líquido), los esfuerzos alternantes que se producen ocasionan la erosión del material de la superficie sólida en contacto.

La formación de burbujas de vapor es casi instantánea y aunque la presión media en el fluido pudiera estar por arriba de la presión local de vapor, fluctuaciones turbulentas o perturbaciones debidas a rugosidad o a irregularidades comunes en los colados podrían ocasionar cavitación.

En forma experimental se han observado presiones durante el colapso del orden de 200,000 [psi] durante el proceso de cavitación, basadas en la observación de ondas de deformación de especímenes fotoelásticos expuestos al fenómeno.

Con velocidades de flujo moderadas es posible proteger la superficie de concreto mediante un buen acabado superficial (superficie muy lisa) y una alta resistencia.

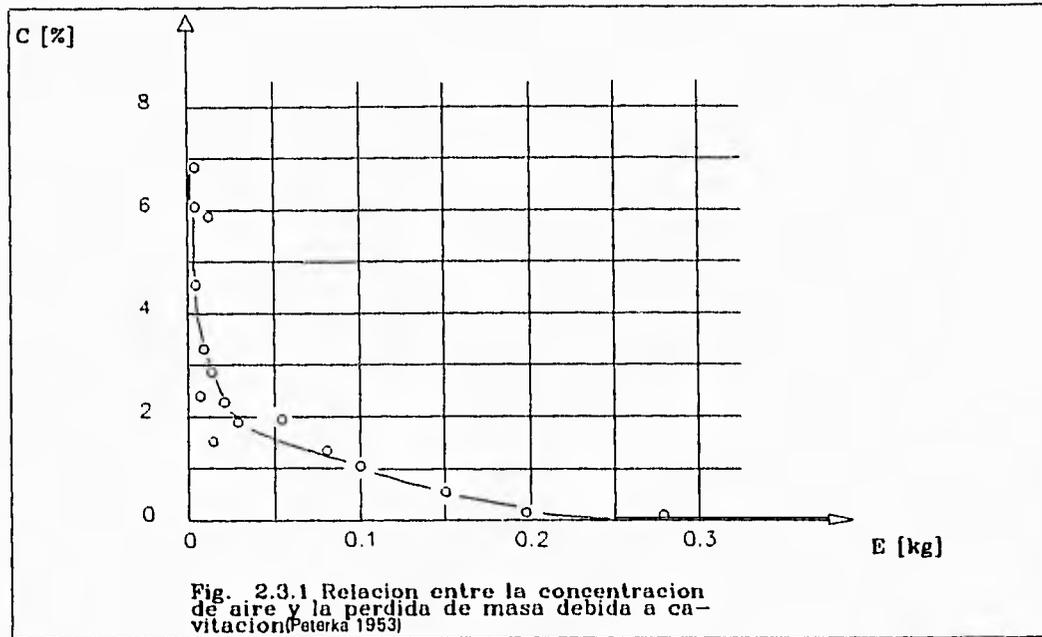
Para caracterizar la susceptibilidad de cavitación de un fluido, se utiliza el parámetro de cavitación, definido de la siguiente manera:

$$k = \frac{P - P_v}{\rho * \frac{u^2}{2}}$$

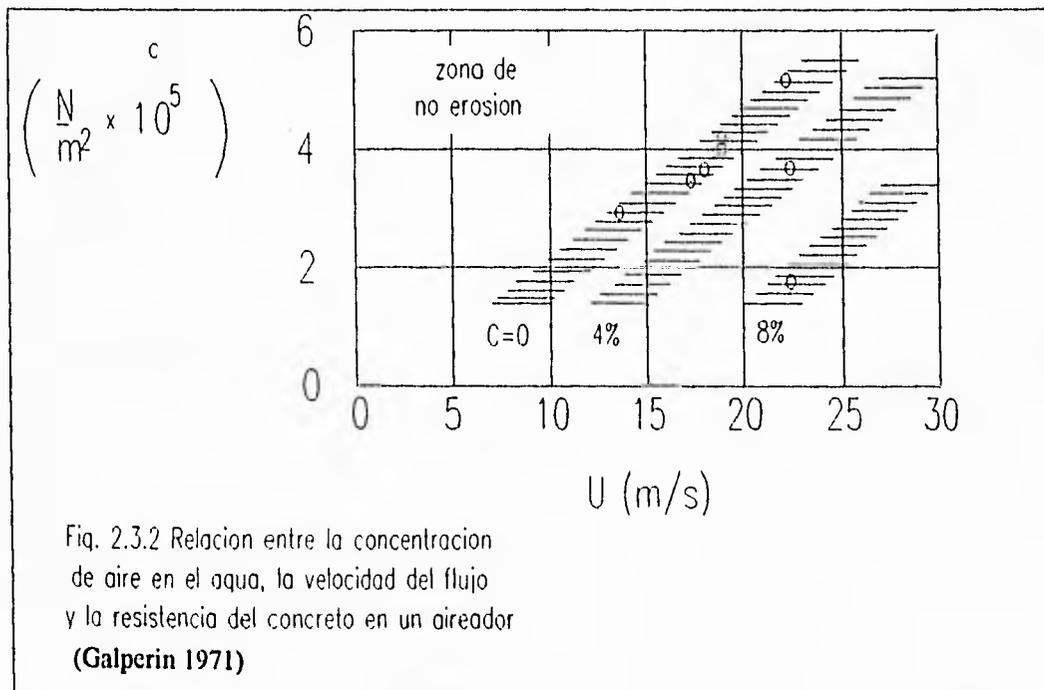
donde P es la presión absoluta en el punto de interés, P_v es la presión de vapor del líquido, ρ su densidad y u es la velocidad media del mismo.

La disminución del parámetro k incrementa la tendencia al daño por cavitación. De manera aproximada se puede decir que se presentará cavitación para valores menores a 0.25. Esto implica que se podrían tener problemas de cavitación cuando la diferencia de presiones sea menor que 1.072 [Kg/cm²] y las velocidades sean mayor que 29 [m/s] para vertederos de concreto sin curvatura vertical y de un tirante del orden de 10m o menores [4].

El empleo de pequeñas cantidades de aire introducidas en el agua reduce notablemente el daño causado por cavitación. Peterka realizó experimentos sobre concreto en 1953 en un aparato de cavitación por un período de dos horas y velocidades arriba de 35 [m/s], donde encontró que con una concentración de aire c de un 6% en el agua, las pérdidas de masa por erosión desaparecen (fig. 2.3.1).



En 1971 Galperin, encontró que el aire requerido para protección también depende de la resistencia del concreto y la velocidad del flujo. A mayor resistencia se requiere menor concentración de aire y a mayor velocidad del flujo corresponde una mayor concentración de aire (fig. 2.3.2).



La forma mediante la cual pequeñas cantidades de aire protegen el concreto aún no es claro, pero pequeñas concentraciones disminuyen la velocidad de propagación de ondas de presión y en consecuencia cualquier onda de choque.

La efectiva distribución de aire también es importante para la prevención de cavitación. El promedio de la concentración de aire en la parte inferior o en los lados de la sección del flujo es un criterio necesario, pero no es suficiente, dentro del diseño, ya que la misma concentración de aire puede corresponder a diferentes distribuciones del mismo.

El problema fundamental del ataque por cavitación de un vertedor radica en que el daño sea tal que no pueda cumplir satisfactoriamente su función, lo cual, como ya se ha mencionado, pone en riesgo la integridad del total de la presa.

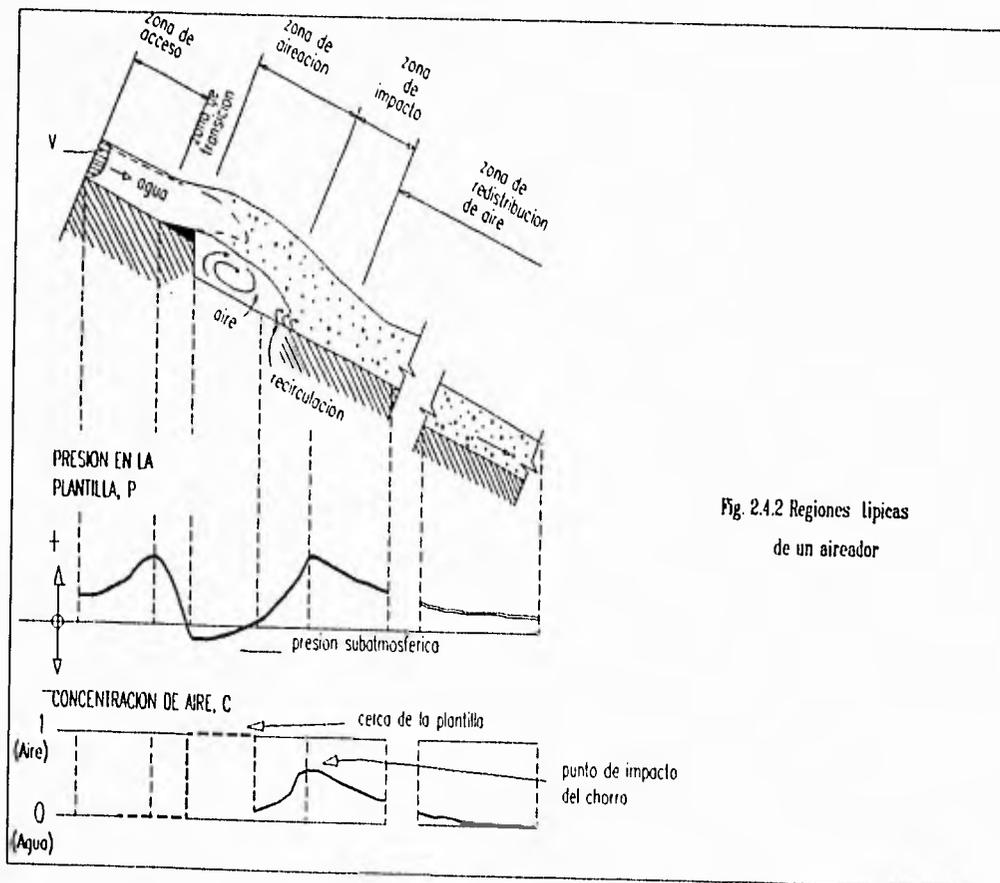
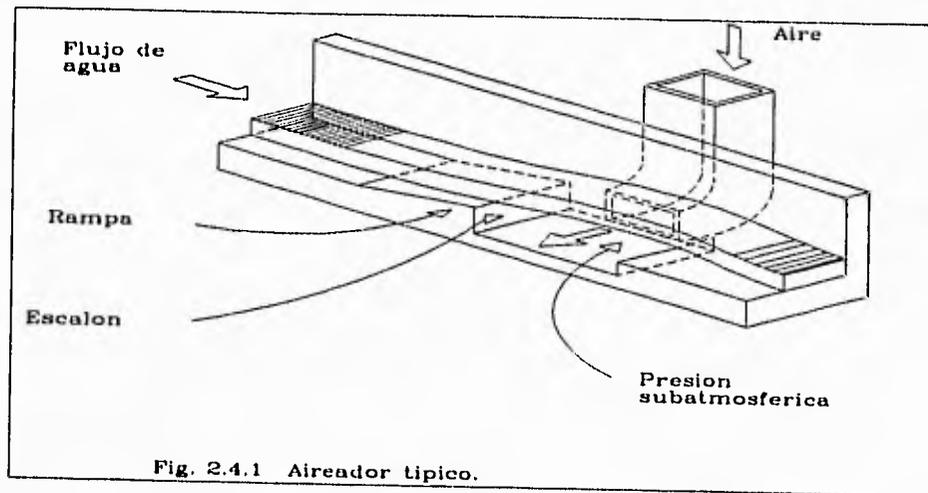
2.4 AIREACIÓN EN VERTEDORES

Como se mencionó anteriormente, un factor que limita el diseño de las obras hidráulicas de alta caída es la erosión por cavitación de las superficies expuestas a flujos de alta velocidad y puede presentarse atrás de cualquier obstáculo, cambio de dirección del flujo o por la rugosidad de la conducción. Investigaciones al respecto han mostrado que el riesgo de erosión por cavitación aumenta aproximadamente con la sexta potencia de la velocidad del agua [4], y una vez que pequeñas cavidades aparecen en la superficie del concreto, estas pueden alcanzar profundidades de varios metros en relativamente corto tiempo, poniendo en peligro toda la obra.

Cuando la erosión se presenta localmente, es posible evitarla mediante el uso de resinas especiales, placas de acero o de concreto, o con el cambio de la geometría. Sin embargo cuando la zona expuesta a cavitación es muy amplia debido a que es ocasionada por la rugosidad e irregularidades comunes en los terminados, la protección resulta más cara y más difícil.

Se puede controlar la cavitación hasta cierto punto controlando el acabado superficial del concreto, sin embargo, cuando las tolerancias del acabado superficial requeridas son muy rigurosas, esto es prácticamente imposible o muy costoso. Cuando la velocidad del agua es superior a 29 [m/s] [4], se puede utilizar dispositivos aireadores que permiten introducir aire en el agua, con lo que se disminuye el mecanismo erosivo de la cavitación mediante el amortiguamiento del colapso de burbujas. Una representación esquemática de un aireador típico se muestra en la figura 2.4.1.

Los aireadores son discontinuidades en el piso y las paredes del canal del vertedor que permiten el ingreso de aire por la parte inferior del flujo de agua, aprovechando la presión subatmosférica que se presenta (Fig. 2.4.2) y el efecto de arrastre del agua a gran velocidad.



Los aireadores cuentan con una rampa la cual permite el incremento local de la velocidad del agua a través de ella. El espesor de la cortina de agua cambia sobre la longitud de la rampa y la capa límite se vuelve más delgada dando un mayor esfuerzo cortante sobre la plantilla del vertedor. Al abandonar la rampa, la presión en el aireador es inferior a la atmosférica. Aunado a esto, el efecto de arrastre del agua a gran velocidad, provoca que el aire externo se mezcle con la rápida y se reponga a través del ducto del aireador. Una vez que el aire se mezcla con el agua, viaja en forma de burbujas, que son arrastradas por el flujo, posteriormente alcanzan la superficie libre por efecto de flotación,

donde escapan a la atmósfera, cuando la concentración baja a niveles menores de los requeridos, se coloca un nuevo aireador para restituir una nueva dosificación de aire.

El objetivo de los aireadores es lograr en la cercanía de la plantilla del vertedor y en las zonas con riesgo de presentar cavitación, una concentración de aire en el agua del 6% o superior, ya que como se mencionó anteriormente, esto reduce prácticamente a cero los riesgos de falla debidos a éste fenómeno.

3 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE ASCENSO DE BURBUJAS DE AIRE

La permanencia de aire en la rápida es función de varios parámetros, uno de estos es la velocidad de ascenso de las burbujas de aire, la cual se debe tener bien caracterizada para conocer la expulsión de estas burbujas. En este capítulo se obtendrá la velocidad de ascenso en base a las principales fuerzas que influyen en las burbujas de aire, así como una descripción de estas fuerzas.

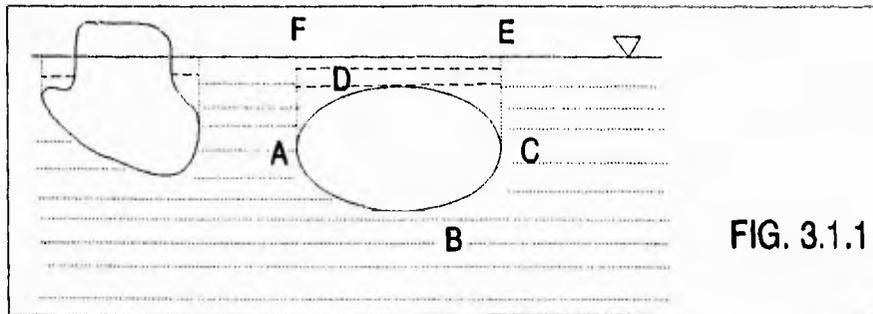
3.1 FUERZA DE FLOTACIÓN.

La fuerza resultante que un fluido en reposo ejerce sobre un cuerpo sumergido en él, total o parcialmente, se conoce como fuerza de flotación. Esta fuerza siempre actúa verticalmente hacia arriba del fluido; no existiendo componente horizontal sobre el cuerpo sumergido, ya que su proyección sobre cualquier plano horizontal vale cero.

La fuerza de flotación en un cuerpo sumergido es igual a la diferencia entre la fuerza de presión que actúa verticalmente sobre su lado inferior y la fuerza vertical sobre su lado superior. En la figura 3.1.1 la fuerza vertical hacia arriba que actúa sobre la superficie inferior del cuerpo está dada por el peso del líquido, que se encuentra por encima de ABC, es decir, el peso del líquido que ocuparía ABCEFA. Asimismo, la fuerza vertical hacia abajo sobre la cara superior es igual al peso del líquido, que se encuentra por encima de ADC, que sería el peso del líquido que ocuparía ADCEF, la suma de estas dos fuerzas dan como resultado la fuerza de flotación, que es igual al peso del líquido ABCD desplazado por el sólido, (Principio de Arquímedes).

$$F_f = v * \gamma$$

Donde F_f es la fuerza de flotación, v es el volumen del fluido desplazado y γ es el peso específico. Este principio es aplicable para cuerpos total y parcialmente sumergidos, teniendo en cuenta el volumen efectivo de líquido desplazado.

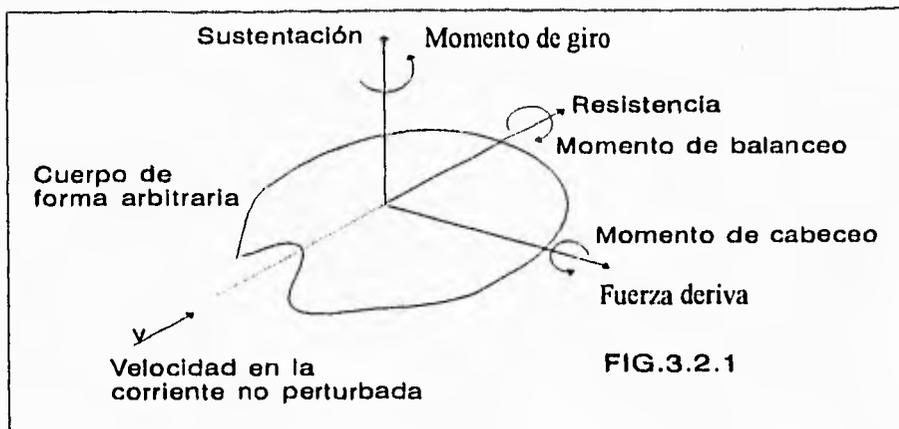


Para el caso en que el cuerpo fuera una burbuja de aire sumergida en el fluido la fuerza de flotación será la diferencia de fuerzas que actúan sobre su cara inferior y superior, es decir será igual al peso del fluido que desaloje la burbuja.:

$$F_f = \gamma_{\text{agua}} * v_B$$

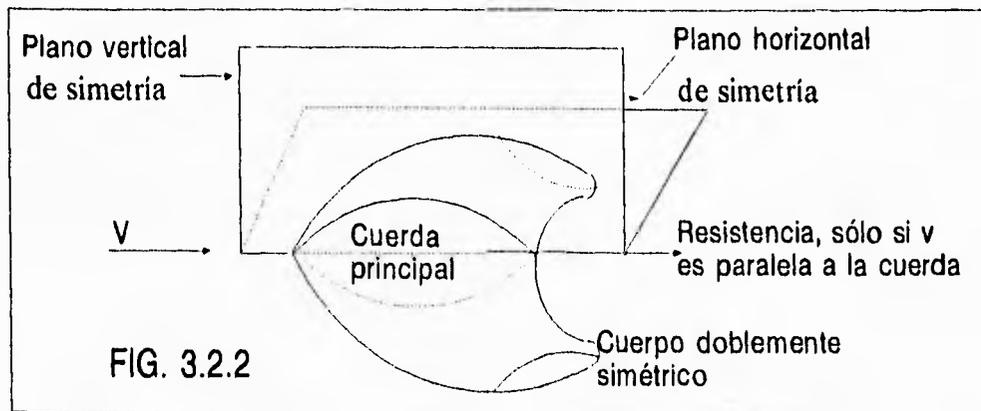
3.2 FUERZA DE RESISTENCIA.

Cuando un cuerpo de forma arbitraria se sumerge en una corriente fluida, el fluido ejercerá sobre él fuerzas y momentos. Si el cuerpo tiene una forma y orientación no simétrica las fuerzas y momentos que ejerce el fluido tienen componentes según los 3 ejes coordenados, como se indica en la figura 3.2.1.



La fuerza que está actuando sobre el eje paralelo a la corriente no perturbada aguas abajo, se denomina fuerza de resistencia (Arrastre), y al momento alrededor es llamado momento de balanceo. La resistencia corresponde a una pérdida de cantidad de movimiento y debe vencerse de alguna manera para que el cuerpo avance.

Hay una simplificación cuando el cuerpo tiene dos planos de simetría, como el de la figura 3.2.2. (sólido de revolución alrededor del eje de avance). Si la corriente no perturbada es paralela a la intersección de estos dos planos, (denominados cuerda principal del cuerpo), hay resistencia, pero no hay sustentación, ni momentos.



La resistencia para este tipo de cuerpos es la que más se ha medido. En flujos a baja velocidad alrededor de cuerpos geoméricamente semejantes con orientación y rugosidad relativa idéntica, el coeficiente de resistencia (forma) será sólo función del número de Reynolds.

$$C_D = f(Re)$$

Basado en la velocidad no perturbada V y en la longitud característica del cuerpo L , que normalmente es la cuerda o la longitud del cuerpo paralela a la corriente, el número de Reynolds se escribe como:

$$Re = V * \frac{L}{\nu}$$

Por consiguiente la fuerza de resistencia con base en estos parámetros queda definida por:

$$F_a = C_D * \gamma * A * \frac{V^2}{2 * g}$$

En donde C_D es el coeficiente de resistencia (forma), γ es el peso específico, $V^2 / 2g$ es la carga de velocidad y A es área del cuerpo que normalmente puede ser de tres tipos:

1. Área frontal, área que se ve mirando en la dirección de la corriente; apropiada para cuerpos gruesos cerrados tales como esferas, cilindros, coches, misiles.
2. Área de la forma en planta, área del cuerpo que se ve mirando desde arriba; apropiada para cuerpos de poco espesor tales como alas e hidroalas.
3. Área mojada, que se acostumbra a utilizar en barcos y lanchas.

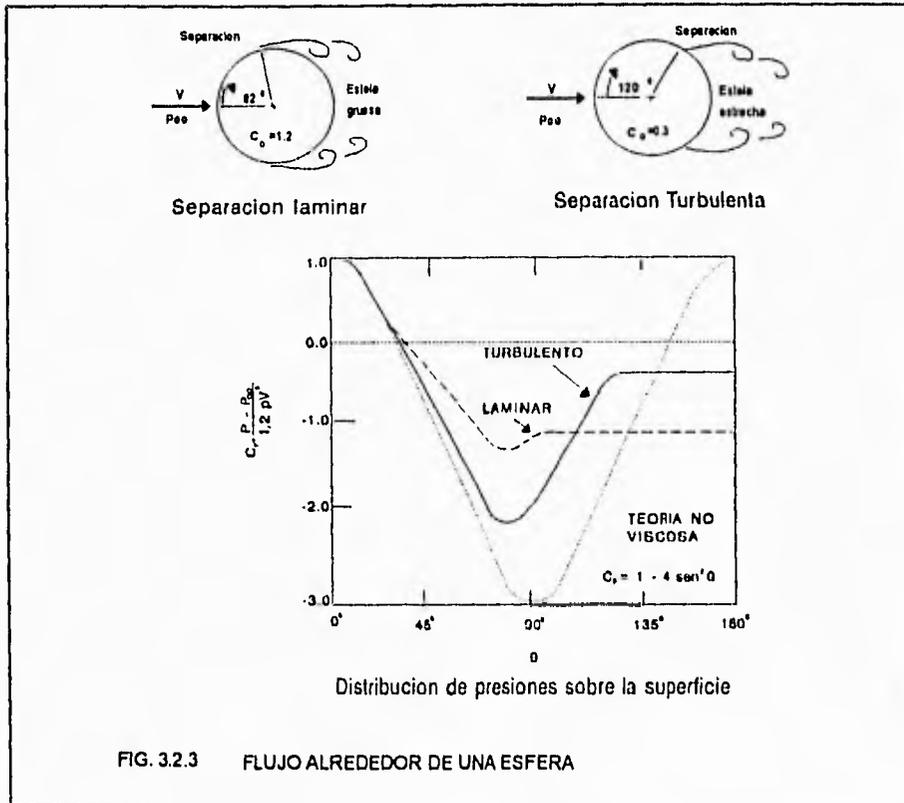
Cuando se quiera hacer uso de datos de resistencia u otras fuerzas, es importante saber cuál es la longitud y área utilizadas para adimensionalizar los coeficientes utilizados. La teoría para determinar la resistencia es, excepto para la placa plana, poco sólida e inadecuada a causa del desprendimiento. La teoría de la capa límite puede predecir el punto de desprendimiento, pero no permite estimar la distribución de presiones en la zona desprendida. La diferencia entre las presiones altas (en la región frontal de remanso) y las bajas presiones (en la región posterior del cuerpo), donde la corriente está desprendida, da lugar a una contribución a la resistencia denominada "resistencia de presión", ésta se añade a la resistencia de fricción para obtener la resistencia total:

$$C_D = C_{Dpres} + C_{Dfric}$$

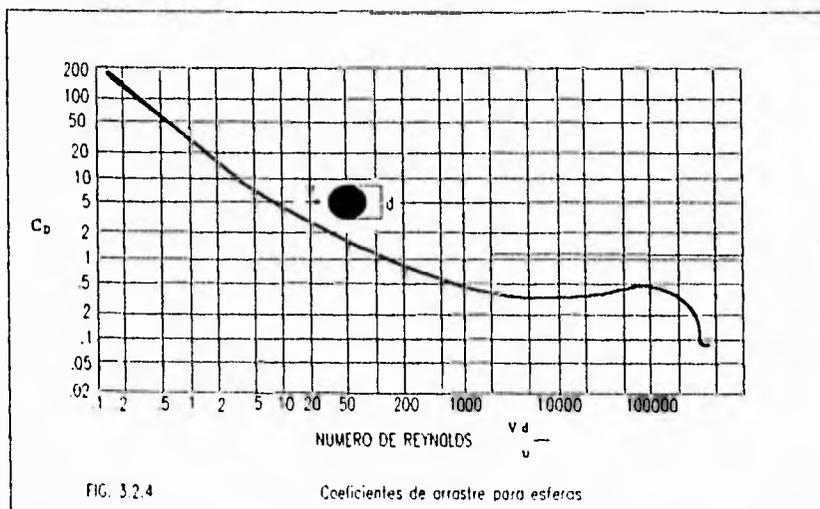
Esta contribución depende de la forma del cuerpo, especialmente de su espesor. Analizando el coeficiente de arrastre para el caso de una esfera sólida se observa en la fig. 3.2.3. el efecto de la separación de la corriente y el fallo de la capa límite, la distribución de presiones sobre una esfera en el caso teórico no viscoso es:

$$C_{Dpres} = C_p = \frac{P - P_{\infty}}{\frac{1}{2} * \rho * V^2} = 1 - 4 * \text{sen}^2 \theta$$

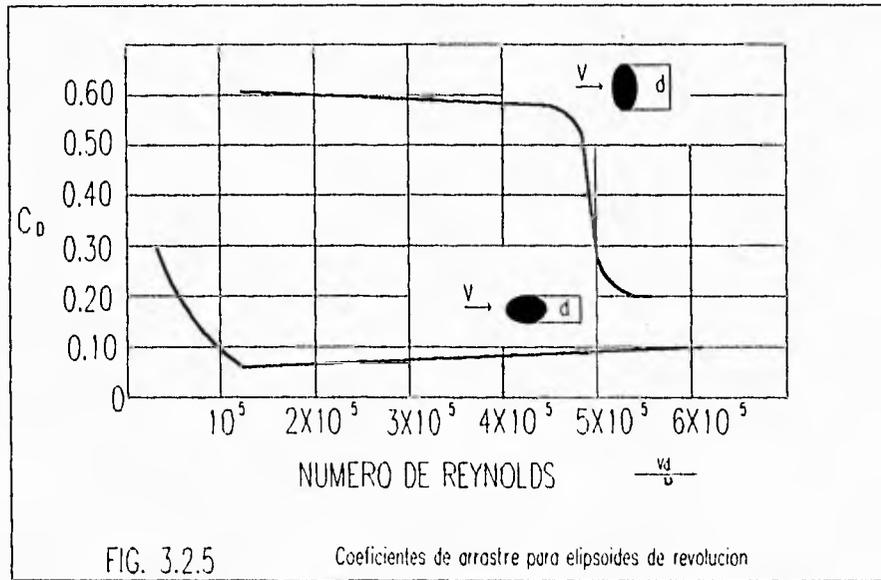
donde P y V son la presión y velocidad de la corriente no perturbada.



El flujo laminar es muy vulnerable a los gradientes adversos en la parte posterior del cuerpo y la separación aparece en $\theta = 82^\circ$, que no podría haberse predicho con la teoría no viscosa. La amplia estela y la baja presión en la región desprendida da lugar a una gran resistencia $C_D = 1.2$. Por la mayor resistencia de la capa límite turbulenta a la separación, ésta se retrasa hasta $\theta = 120^\circ$, con una estela más pequeña y mayor presión en la parte posterior, por lo que el coeficiente de resistencia es un 75% más bajo, $C_D = 0.3$. Los números de Reynolds son exactamente iguales y se introdujo la transición a turbulencia de la capa límite con una banda rugosa en la parte frontal de la esfera. En la fig. 3.2.4, se dan algunos valores de C_D en función del número de Reynolds para una esfera [11].



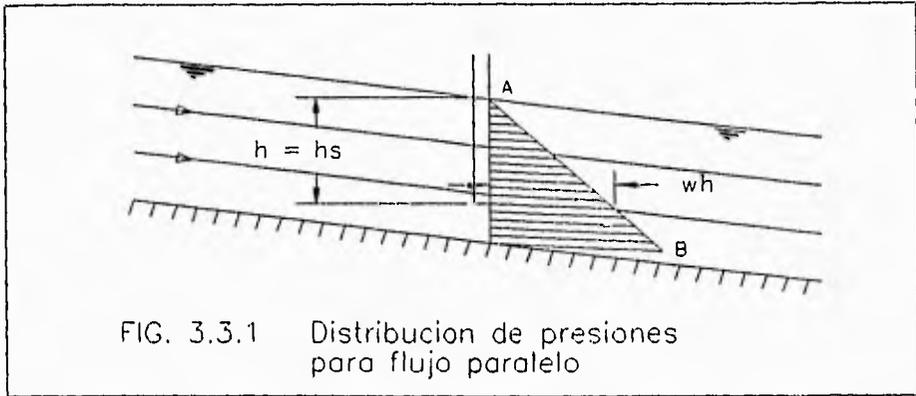
Para el caso de cuerpos tridimensionales, las aristas vivas siempre originan la separación de la corriente y una alta resistencia que es independiente del número de Reynolds. Los cuerpos redondeados como el elipsoide tienen una resistencia que depende del punto de separación, en la fig. 3.2.5., se dan valores de C_D comparados con Re para dos tipos de elipsoides de revolución [11].



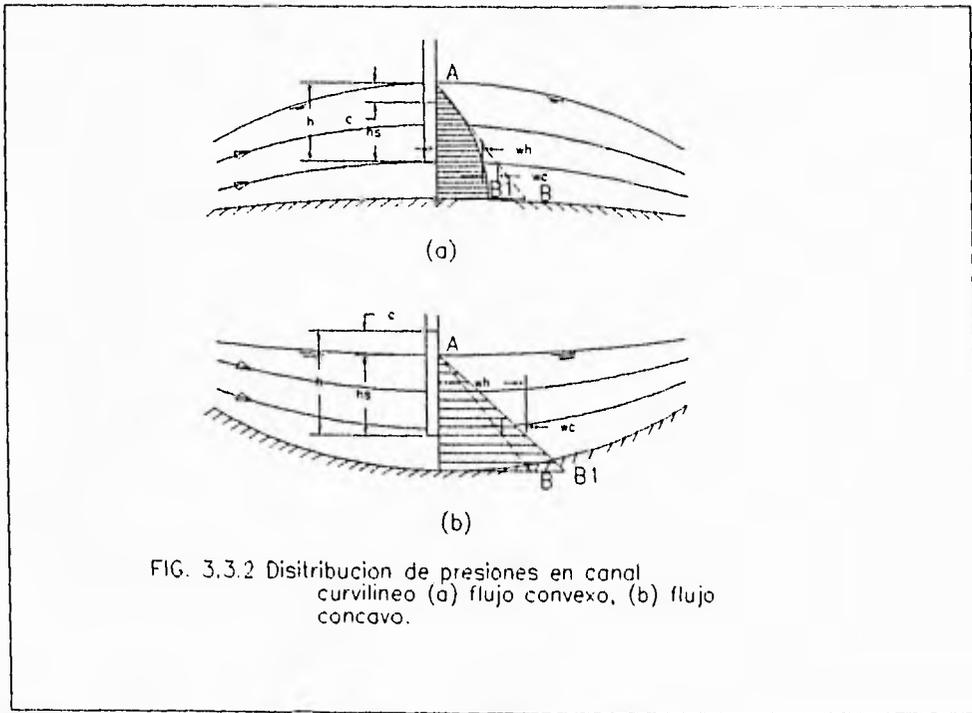
La curva superior es aplicable a cuerpos con eje mayor 4/3 del eje menor y el eje de revolución menor es paralelo a la dirección del flujo. La curva inferior es aplicable a cuerpos con cociente entre eje menor y mayor de 1:8, teniendo el eje de revolución menor perpendicular a la dirección del flujo.

3.3 FUERZA DE FLOTACIÓN DEBIDA AL EFECTO POR CAMBIO DE RADIO DE CURVATURA.

La presión en un punto dentro de la sección transversal del flujo en un canal con pendiente pequeña puede ser medido por la altura de columna de agua de un tubo piezométrico instalado como se indica en la fig. 3.3.1, ignorando la distribución de turbulencia. Esta presión en el punto es directamente proporcional a la profundidad del punto abajo de la superficie libre del fluido. Estas presiones se pueden representar como un gradiente de presiones en función de la profundidad, las cuales tienen una forma de distribución lineal lo cual se conoce como 'ley hidrostática de distribución de presiones'[12].



La aplicación de la ley hidrostática de distribución de presiones dentro de la sección transversal del canal es válida sólo si el flujo no tiene componentes de aceleración dentro del mismo plano. Este tipo de flujos es teóricamente conocido como flujo paralelo, semejante a líneas de corriente que tienen curvaturas substanciales no divergentes. Si la curvatura de las líneas de corriente es substancial, el flujo es teóricamente conocido como flujo curvilíneo. El efecto de la curvatura es producto apreciable de la componente de aceleración de la fuerza centrífuga normal a la dirección del flujo, La distribución de presiones en la sección puede ser convexo o cóncavo como el de la fig. 3.3.2 . En ambos casos la distribución de presión no lineal representada por AB1 instalado sobre la distribución AB ocurre si el flujo es paralelo.



Si el flujo es cóncavo la fuerza centrífuga refuerza la acción de la gravedad, y si es convexa la disminuye. La desviación de la presión hidrostática h_s dentro de la curvatura del flujo después de la

verdadera presión de la altura piezométrica se incrementa, suponiendo que este aumento se da en forma lineal la altura se aumenta como:

$$h = h_s + c$$

Si el canal tiene un perfil de curvatura longitudinal constante, aparecerá una fuerza centrífuga, que puede calcularse por medio de la segunda ley de Newton y se aproximará como el producto de la masa del agua contenida en una sección longitudinal de área A y altura d, por la aceleración centrífuga calculada en función de la velocidad media V, esto es:

$$\text{La masa del agua esta dada por: } m = v * \rho = A * d * \rho = A * \frac{\gamma}{g} * d$$

$$\text{La aceleración centrífuga está dada por: } a_c = \frac{V^2}{r}$$

Con lo cual la presión ejercida por fuerza centrífuga es:

$$P_c = \frac{F_c}{A} = \frac{m * a_c}{A} = \frac{\gamma}{g} * d * \frac{V^2}{r}$$

Donde γ es el peso específico del agua, g es la aceleración de la gravedad, V es la velocidad del flujo, y r es el radio de curvatura. Con esto se puede tener el valor de c como:

$$c = \frac{P_c}{\gamma} = \frac{d}{g} * \frac{V^2}{r}$$

Si en la corriente del fluido se encuentra sumergido un cuerpo, éste también se somete al aumento de la presión, reflejando así incremento en la fuerza de flotación debido al efecto centrífugo. La fuerza adicional se calcula como el incremento del gradiente de presión ejercida por la fuerza centrífuga multiplicado por el volumen del cuerpo, esto es:

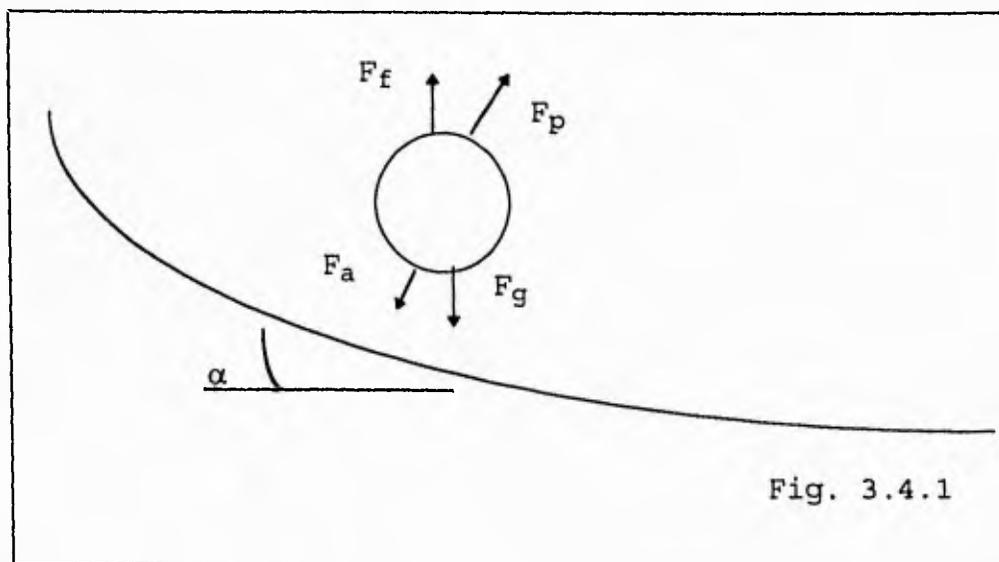
$$F_p = |\text{grad } P_c| * v_{\text{cuerpo}} = \frac{\frac{\gamma}{g} * d * \frac{V^2}{r}}{d} * v_{\text{cuerpo}} = \rho * v_{\text{cuerpo}} * \frac{V^2}{r}$$

Esta fuerza se suma a la fuerza de flotación por efecto hidrostático para obtener la fuerza total en un canal con curvatura

3.4 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE ASCENSO.

El movimiento de burbujas a través del fluido es determinado por un balance entre las fuerzas a las cuales se encuentran sometidas (por flotación y por efectos viscosos), variando la importancia de algunos efectos en función de la intensidad de la turbulencia [10]. A la manifestación de un movimiento muy desordenado superpuesto a un movimiento promedio del flujo se le conoce como efecto turbulento. En principio las burbujas tienden a ser perfectamente esféricas, sin embargo como están sometidas a fuerzas externas, éstas se pueden conformar en diferentes geometrías como: esféricas, elipsoidales, tapa esférica. La velocidad de ascenso de las burbujas es directamente proporcional al diámetro de la burbuja e inversamente proporcional a la resistencia al ascenso que incluye además el efecto de la turbulencia en el flujo. A la velocidad de equilibrio de ascenso se le conoce como velocidad terminal [10].

Para interpretar los resultados de los modelos experimentales de los vertedores de las presas Huites y Aguamilpa se realizaron los balances de fuerzas correspondientes suponiendo que todas las burbujas son pequeñas y tienen una forma de esfera. En el vertedor con curvatura (HUITES), la velocidad terminal queda definida por las fuerzas ilustradas en la diagrama de cuerpo libre ilustrado en la figura 3.4.1.



En donde las fuerza sobre la burbuja son:

Fuerza de flotación
$$F_f = v_B * \gamma_{\text{agua}} = v_B * g * \rho_{\text{agua}}$$

Fuerza adicional debido a la curvatura
$$F_p = v_B * \rho_{\text{agua}} * \frac{V^2}{r}$$

Fuerza de arrastre $F_a = C_D * \rho_{\text{agua}} * A_B * \frac{Ur^2}{2}$

Fuerza debido al peso $F_g = v_B * g * \rho_a$

Haciendo el balance de fuerzas en un plano perpendicular a la plantilla del vertedor:

$$\sum F_y = m * a$$

Para el caso en que el movimiento de la burbuja es a velocidad constante y las fuerzas activas sobre la burbuja deben estar en equilibrio, el balance se reduce a:

$$\sum F = 0$$

Realizando el balance y reescribiendo las fuerzas en la expresión anterior:

$$F_r * \cos\alpha + F_p - F_a - F_g * \cos\alpha = 0$$

Sustituyendo el valor de las fuerzas:

$$v_B * g * (\rho_{\text{agua}} - \rho_a) * \cos\alpha + v_B * \rho_{\text{agua}} * \frac{V^2}{r} = C_D * \rho_{\text{agua}} * A_B * \frac{Ur^2}{2}$$

Despejando U de la ecuación.

$$Ur^2 = \frac{2 * v_B * g * (\rho_{\text{agua}} - \rho_a) * \cos\alpha}{C_D * \rho_{\text{agua}} * A_B} + \frac{2 * v_B * \rho_{\text{agua}} * V^2}{C_D * \rho_{\text{agua}} * A_B * r}$$

Suponiendo que las burbujas son esféricas el área proyectada sobre un plano perpendicular al movimiento y volumen quedan definidos como:

$$A_B = \frac{\pi}{4} * d_B^2 \quad \text{y} \quad v_B = \frac{\pi}{6} * d_B^3 \quad \text{entonces} \quad \frac{v_B}{A_B} = \frac{2}{3} * d_B$$

sustituyendo el valor de v_B/A_B en U queda:

$$Ur = \sqrt{\frac{4 * d_B * g}{3 * C_D} * \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{\text{agua}}}\right) * \cos\alpha + \frac{4 * d_B * V^2}{3 * C_D * r}}$$

Los valores de las constantes que se utilizan para el cálculo están en la siguiente tabla:

g	9.81 m/s
ρ_a	.9751 Kg/m ³
ρ_{agua}	1000 Kg/m ³
r	8.39 m

Los valores de α se encuentran en la tabla de ubicación de puntos, la velocidad V se obtiene apartir del gasto de cada prueba, respecto al área transversal del flujo en dicho punto, el valor del tirante para dicho cálculo se encontrará en las tablas de mediciones. Con el fin de identificar el tipo de burbujas que se presentó en los ensayos de modelo se procedió a determinar el diámetro de burbuja que se ajustará mejor al comportamiento medido para tres valores de C_D supuestos, en este caso se mantuvo como constante el valor de α e igual a 24.2^0 y la velocidad V igual a 8.221 m/s:

C_D	d_B (mm)	U_r (m/s)
.5	10	.673
	5	.476
	1	.213
.2	10	1.064
	5	.753
	1	.336
.1	10	1.505
	5	1.064
	1	.476

De acuerdo con Haberman y Morton [19], debido a que en la frontera burbuja-agua la velocidad del flujo no es nula en esferas deformables, el coeficiente de arrastre debe ser menor que 0.5 que es el valor correspondiente a burbujas rígidas, esféricas o elipsoides de revolución (figura 3.2.4 y figura 3.2.5). Tomando como referencia los cálculos realizados por Falvey [10], el coeficiente debe ser mayor que 0.1 que corresponde a burbujas de forma elipsoide de revolución (figura 3.2.5), en donde el eje menor es perpendicular a la dirección del flujo. El valor del coeficiente, por tanto, debe estar entre los dos valores antes mencionados, con lo que se obtienen valores congruentes con las velocidades descritas por Chanson [7]. El valor del coeficiente que produjo resultados más cercanos a los datos de Chanson fue 0.2, por lo que ese valor se utilizó en el cálculo final.

Aunque en realidad las burbujas se pueden conformar en diferentes geometrías, se seguirá utilizando como simplificación un diámetro equivalente de burbuja d_B , de igual volumen al de la burbuja real, con un diámetro de esfera, $d_B = (6 v_B / \pi)^{1/3}$. Para escoger d_B (diámetro equivalente de burbujas), se realizaron los cálculos de velocidades de ascenso para diferentes d_B y se compararon con datos experimentales realizados por Chanson [7], en donde por prueba y error se llegó a caracterizar el d_B apropiado. El diámetro equivalente apropiado es de 1mm, con él las velocidades terminales son adecuadas, además se observó con cámara de video que las burbujas son pequeñas debido a que hay fragmentación de las mismas por efecto turbulento.

Del análisis anterior, los cálculos para obtener la velocidad terminal se realizaron con un $C_D = 0.2$ y un diámetro equivalente de burbuja $d_B = 1\text{mm}$. Los resultados de las velocidades de ascenso de las burbujas del modelo experimental del vertedor de Huites se encuentran en las tablas de la unidad 5 junto con el cálculo de concentración de aire.

Para el caso de un vertedor con pendiente constante (AGUAMILPA) el balance de fuerzas se obtiene apartir del diagrama de cuerpo libre de la figura 3.4.2

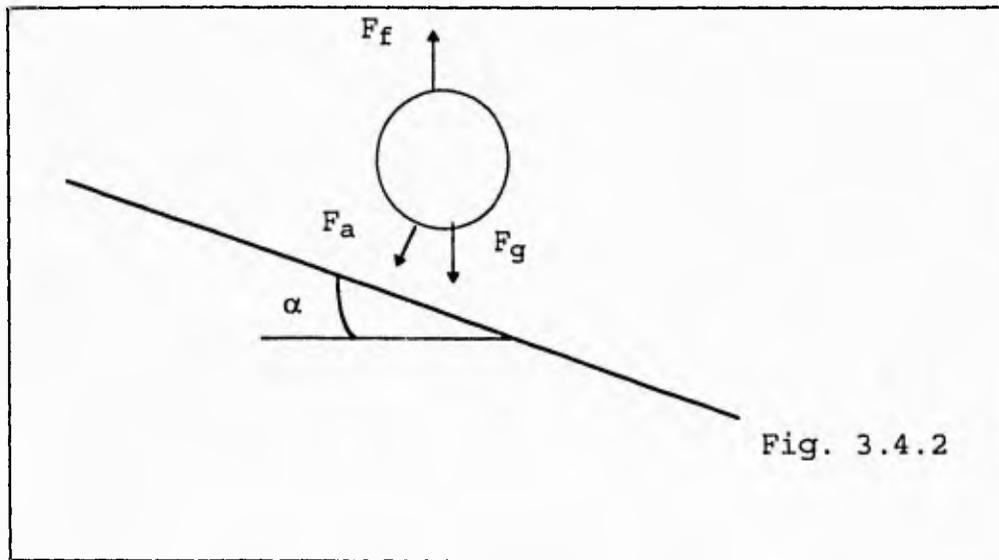


Fig. 3.4.2

En este caso no interviene la fuerza debido al cambio de curvatura, pero las demás fuerzas se mantienen. Realizando la sumatoria de fuerzas en un plano perpendicular a la plantilla del vertedor

$$\sum F_y = 0$$

$$F_f * \cos \alpha = F_a + F_g * \cos \alpha$$

Sustituyendo el valor de las fuerzas:

$$v_B * g * \rho_{\text{agua}} * \cos \alpha = C_D * \rho_{\text{agua}} * A_B * \frac{U_r^2}{2} + v_B * g * \rho_a * \cos \alpha$$

Despejando el valor de U

$$U_r^2 = \frac{v_B * g}{A_B * C_D} * \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{\text{agua}}} \right) * \cos \alpha$$

Sustituyendo el valor de v_B/A_B la velocidad de ascenso queda definida por:

$$U_r = \sqrt{\frac{4 * d_B * g}{3 * C_D} * \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{\text{agua}}}\right) * \cos \alpha}$$

Los valores de las constantes son los mismos que se aplicaron para el cálculo del modelo experimental del vertedor de la presa Huites, las diferencias radican en que la pendiente α se mantiene constante e igual a 20° . No existe curvatura por lo tanto $r = \infty$. El coeficiente de arrastre se tomó igual a 0.2, mientras que el diámetro equivalente de burbuja d_B que mejor se ajustó fue igual 17mm para el gasto de 304.3 l/s, ya que se observó que las burbujas tienden a escapar más rápidamente, lo que ocasiona una velocidad terminal mayor que en el otro modelo. Para el gasto de 101 l/s se consideró $d_B = 1\text{mm}$ ya que las burbujas tienden a no salir tan rápidamente por el tirante que se alcanza. Los resultados de la velocidad de ascenso de las burbujas de aire se encuentran en las tablas de la unidad 5 junto con los cálculos de la concentración media de aire.

4.DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIÓN DE AIRE.

4.1 REGISTRO EN UN CANAL CON CURVATURA VERTICAL.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO Y DEL MUESTREADOR DE CONCENTRACIONES DE AIRE

El modelo físico se construyó en el Instituto de Ingeniería de la UNAM a una escala de 1:21. Se hizo para ver el funcionamiento detallado de los vertedores reproduciendo sólo uno de los dos vertedores gemelos que contendrá la presa Huites. Este modelo tiene de dos aireadores sobre el canal, una cubeta de pendiente variable con un radio de curvatura constante e igual 8.386m. La vista general del modelo se muestra en la figura 4.1.1.

Para una mejor identificación de las partes que forman al modelo, la figura 4.1.2 muestra la instalación completa, con sus dimensiones.

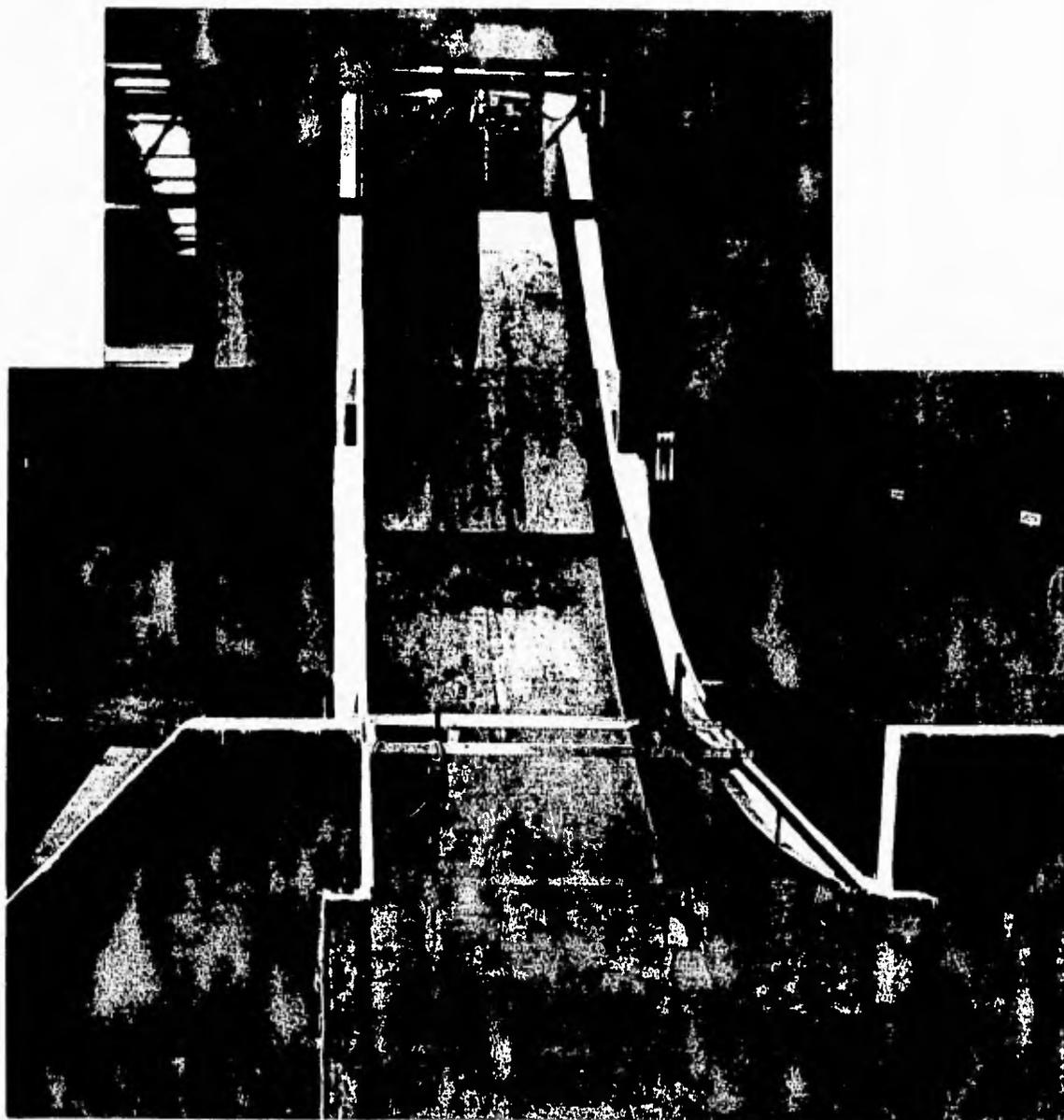
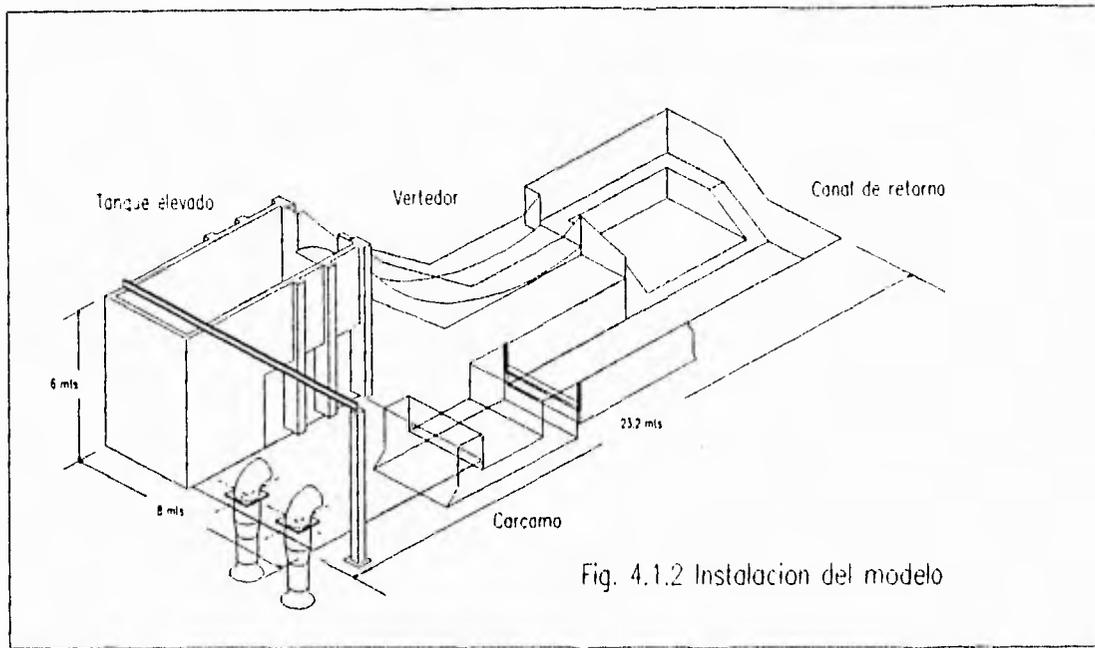


FIG. 4.1.1

Para el registro de perfiles de concentración se diseñó un muestreador que permitió la obtención del valor puntual de la concentración (C), empleando una técnica de muestreo por succión de la mezcla de la rápida. Inicialmente se intentó realizar el muestreo directo de C mediante un tubo en 'L', obteniendo valores prácticamente nulos de concentración en zonas donde este resultado no era factible. Un análisis de la falla del muestreador indicó que la perturbación introducida por el tubo era tal que las burbujas de aire eran desviadas de su trayectoria impidiendo su posible captura en el momento de succión.

Al revisar algunas otras técnicas reportadas en la literatura, se puso especial atención en el método muestreador de Viparelli. En esta técnica se introduce a la rápida una tubería que permite una extracción continua del flujo a muestrear. Mediante un par de válvulas se atrapa un volumen determinado y se analiza como muestra representativa de la mezcla.



A semejanza con el método de Viparelli, el muestreador del Instituto de Ingeniería introduce un tubo de pared delgada a la rápida, pero en este caso el tubo es pequeño y corto (0.5mm de espesor de pared, 6mm de diámetro y 50mm de largo, fig. 4.1.3). Se orienta paralelo al flujo y su función es permitir el paso continuo de la mezcla aire-agua en su interior sin desviar el aire contenido en el flujo. De la mezcla que atraviesa el tubo, se extrae una muestra en la que se cuantifica el valor de C considerándolo como representativo de un espesor determinado (diámetro del tubo). Para mejorar la resolución espacial de la capa, se ovaló al tubo reduciendo la altura a 4mm.

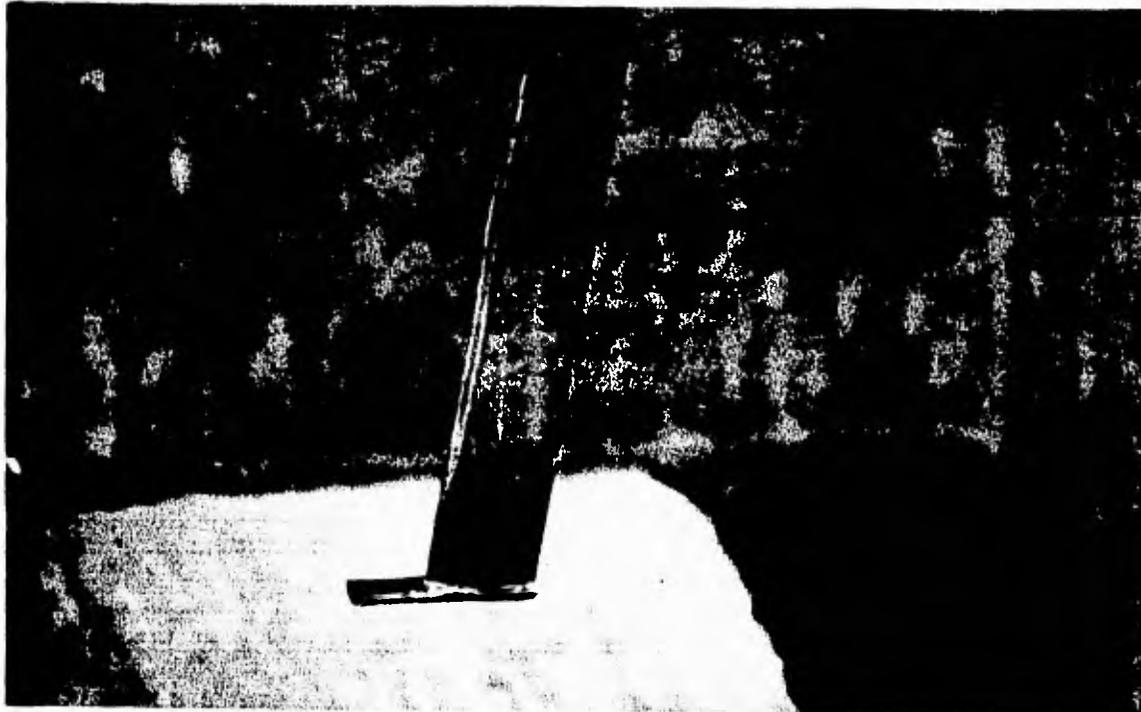


FIG. 4.1.3

Sujetando el muestreador con un limnómetro, soportado desde los bordes del modelo, se hicieron recorridos desde la plantilla hasta la superficie libre de la rápida, fig. 4.1.4

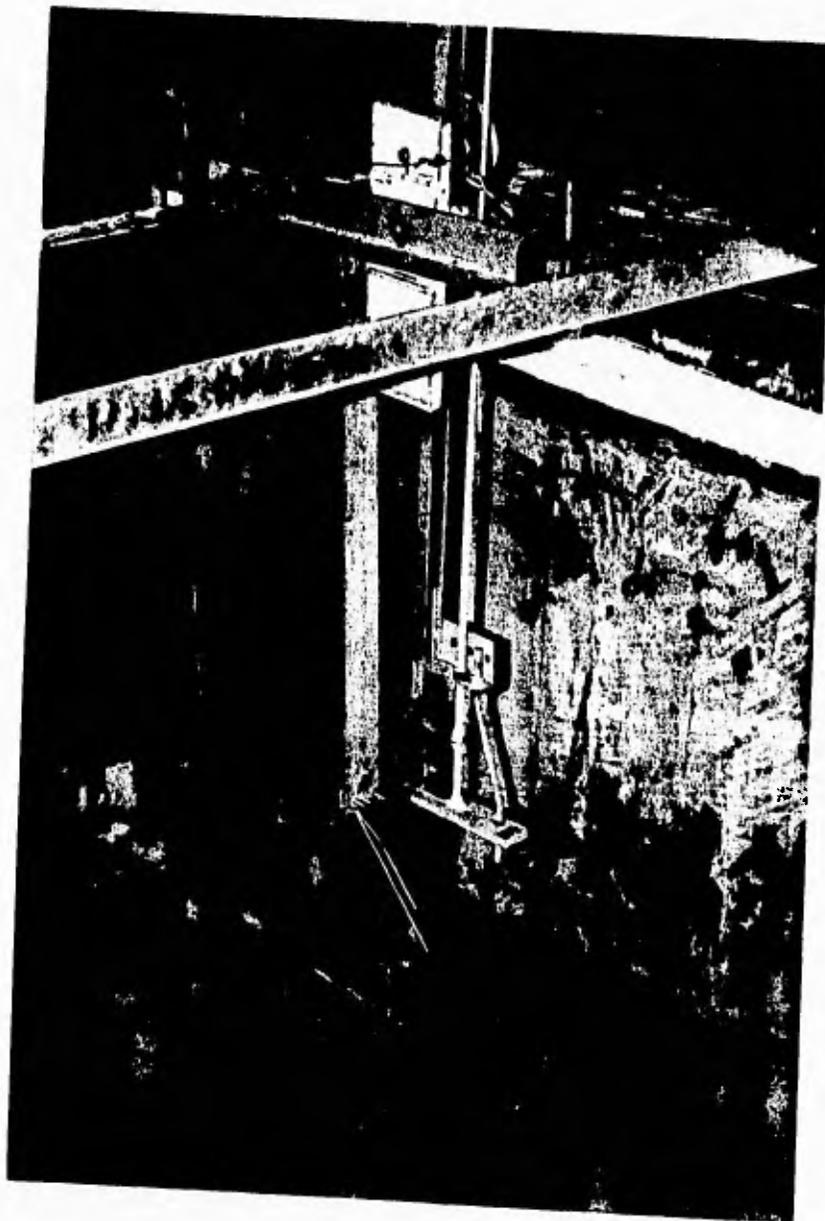


FIG. 4.1.4

La extracción de la muestra se hace mediante otro tubo conectado perpendicularmente en la parte media al tubo paralelo al flujo. La extracción de la muestra aire-agua se realizó con ayuda de un émbolo con carrera de 41.5cm y volumen total de 881cm^3 . El accionamiento del émbolo se realizó con un pistón neumático para garantizar velocidad de succión constante, fig 4.1.5.



FIG. 4.1.5

PARÁMETROS DE MEDICIÓN.

La concentración de aire es el parámetro más importante y se obtiene como:

$$C = \frac{\text{Volumen de aire en la muestra}}{\text{Volumen total de la muestra}} \quad 4.1.1$$

Otro parámetro a medir es el tirante en la sección de observación. Para determinar su valor se empleó el criterio descrito en la referencia [1], en el cual se considera que la mezcla aire - agua alcanza su máximo tirante cuando C tiene un valor de 90%, ($Y_{.90}$).

De los perfiles de C en función de la distancia al fondo del vertedor es posible obtener el valor de la concentración media C_m como:

$$C_m = \frac{\int_0^{Y_{.9}} C(Y) * V(Y) * dy}{\int_0^{Y_{.9}} u * dy}$$

donde V es la velocidad puntual y u es la velocidad media. Para este trabajo de tesis se consideró que el perfil de velocidades en una sección es constante e igual a la velocidad media, por lo que la ecuación anterior se simplifica en la integral de C a lo largo del tirante dividido entre el valor del tirante $Y_{.90}$.

$$C_m = \frac{1}{Y_{.9}} \int_0^{Y_{.9}} C(Y) dy \quad 4.1.2$$

Otra forma de representar C_m es en función de los gastos sabiendo que:

$$Q_{aire} = \int_0^{Y_{.9}} C(Y) * V(Y) * dy$$

y

$$Q_{total} = Q_{aire} + Q_{agua} = \int_0^{Y_{.9}} u * dy$$

Donde, C_m se puede expresar en función de gastos por unidad de ancho como:

$$C_m = \frac{q_{aire}}{q_{aire} + q_{agua}} \quad 4.1.3$$

Conocido el valor de C_m es posible calcular el valor del tirante equivalente al flujo sin aire como:

$$Y_{equi} = Y_{.90} * (1 - C_m) \quad 4.1.4$$

El cálculo de la velocidad del agua queda definida como:

$$V_{\text{agua}} = \frac{q_{\text{agua}}}{Y_{\text{equi}}} \quad 4.1.5$$

Donde:

$$q_{\text{agua}} = \frac{Q_{\text{agua}}}{b} \quad 4.1.6$$

Con Q_{agua} el gasto de agua y b el ancho del vertedor.

Otra forma de definir la concentración de aire es:

$$C^* = \frac{\text{Volumen de aire en la muestra}}{\text{Volumen de agua en la muestra}} \quad 4.1.7$$

Por lo que:

$$C^* = \frac{1}{\left(\frac{1}{C} - 1\right)} \quad 4.1.8$$

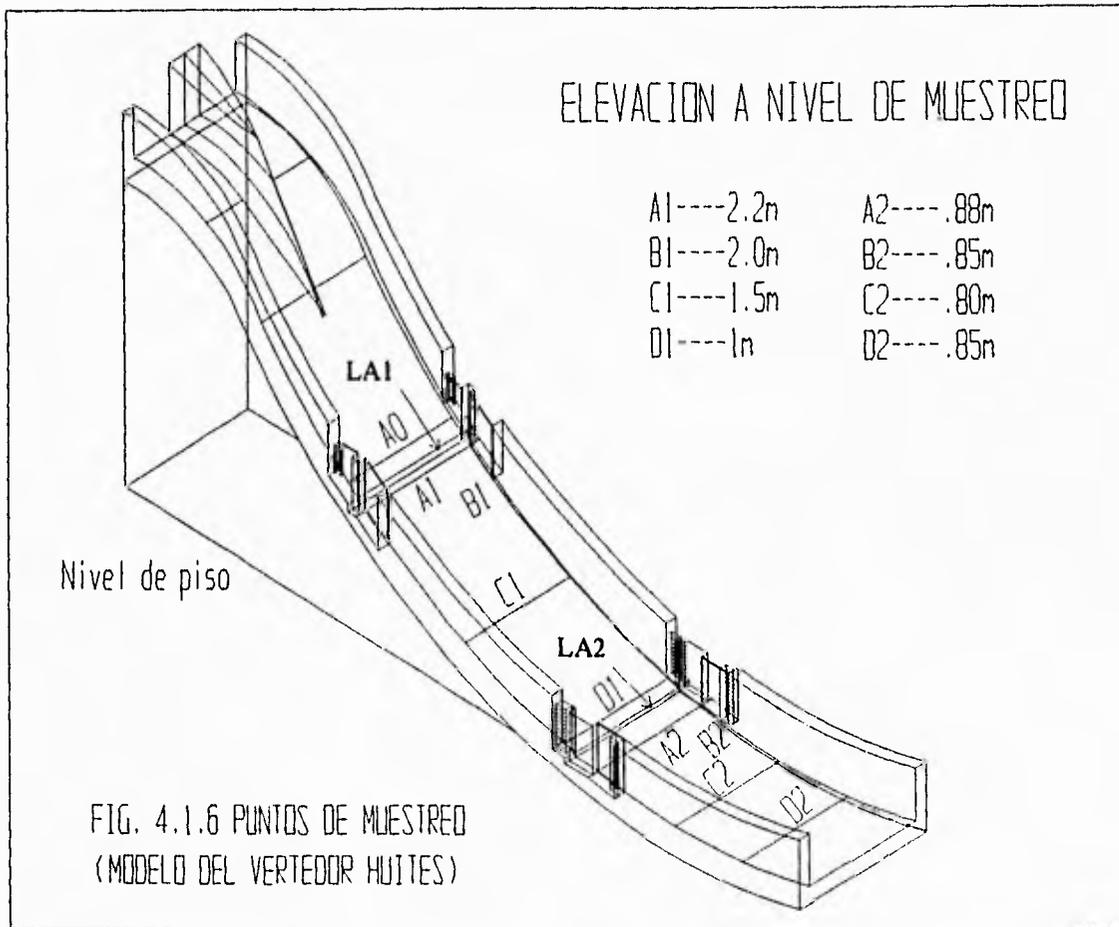
A la relación del gasto de aire total succionado por el aireador, al gasto total de agua, se define como:

$$\beta = \frac{Q_{\text{aire}}}{Q_{\text{agua}}} \quad 4.1.9$$

Que es un parámetro comunmente empleado en la evaluación del funcionamiento de los aireadores. Debe observarse que C^* es diferente a β , exepcto cuando el perfil de velocidades es constante.

MEDICIONES DE CONCENTRACIÓN DE AIRE EN EL MODELO.

Se realizaron las mediciones de concentración de aire en las secciones indicadas como A0, A1, B1, C1, D1 para el primer aireador y A2, B2, C2, D2 para el segundo aireador, tanto para margen izquierda y margen derecha. Cada margen está ubicado a 0.287m de la pared correspondiente, teniendo como ancho del vertedor 1.72 m, como se indica en la figura 4.1.6.



En la siguiente tabla se indica la ubicación de los puntos. Donde α es la pendiente de cada sección respecto a la horizontal, S es la longitud a lo largo de la plantilla, Ce es la concentración media para flujo uniforme.

PUNTO	X1-X	Y	S	α	Ce
A0	1.33	1.62	4.32	39.16	0.105
LA1	0.14	1.5	4.48	38.07	
A1	0.58	1.16	5.18	33.29	0.09
B1	0.25	1	5.48	31.24	0.08
C1	1.22	0.33	6.51	24.2	0.06
D1	1.61	-0.9	8.2	12.63	0.04

LA2	0.15	-0.11	8.36	11.53	
A2	0.69	-0.19	9.06	6.75	0.028
B2	0.29	-0.21	9.36	4.7	0.028
C2	0.96	-0.29	10.04	0.05	0.028
D2	1.09	-0.22	11.14	-7.47	0.028

El procedimiento de muestreo utilizado consistió en tomar, de forma secuencial, cuatro muestras por punto analizado. La primera muestra se desecha (purga) y sirve para reemplazar la mezcla previamente contenida en la manguera del muestreador por la mezcla aire- agua que interesa muestrear. Para cada una de las tres muestras restantes, con el émbolo en posición vertical, se mide la altura del volumen de aire atrapado y el valor de C se obtiene:

Con la formula 4.1.1:

$$C = \frac{V_{aire}}{V_{mezcla}} = \frac{V_{aire}}{V_{aire} + V_{agua}}$$

La relación de volúmenes es igual a la relación de longitudes, por lo que:

$$C = \frac{A * H_{aire}}{A * H_{total}} = \frac{H_{aire}}{H_{total}}$$

El valor representativo de C resulta del promedio de los tres valores leídos. Este procedimiento se realizó para cada punto de muestreo, en el cual se tomaron lecturas a todo lo alto del tirante, desde la plantilla hasta la superficie libre, teniendo así una serie de lecturas que integra el perfil de concentración de aire en esa sección. Estas pruebas se realizaron para tres diferentes gastos en el modelo que fueron próximos a 500, 1000 y 1420 l/s, que corresponden respectivamente a 1010, 2021 y 2828 m³/s del prototipo.

Para comparar los perfiles de C obtenidos en diversas secciones el tirante de los puntos de medición se normalizó respecto al tirante donde C es igual a 90% ($Y_{adim} = Y/Y_9$). Los resultados de las mediciones se indican en las siguientes tablas adimensionadas para cada gasto y margen de medición. Las figuras 4.1.7 a 4.1.18 presentan estos resultados en forma gráfica.

MARGEN DERECHO						
GASTO: 500 l/s						
SECCIÓN A0 Y.9= 5.03cm						
Y/Y.9	0.040	0.139	0.238	0.437	0.635	0.834
C%	0.261	0	0	0	0	1.865
Y/Y.9	0.933	1.000	1.032			
C%	69.115	90	100			
SECCIÓN A1 Y.9=5.2cm						
Y/Y.9	0.038	0.133	0.228	0.417	0.607	0.702
C%	8.763	13.512	16.547	22.806	20.051	15.749
Y/Y.9	0.797	0.892	0.987	1	1.082	
C%	14.052	31.091	88.380	90	100	
SECCIÓN B1 Y.9=5.0cm						
Y/Y.9	0.040	0.139	0.238	0.436	0.634	0.733
C%	4.469	6.521	7.445	9.097	12.355	17.920
Y/Y.9	0.832	0.931	1	1.030		
C%	40.545	77.208	90	95.540		
SECCIÓN C1 Y.9=4.1cm						
Y/Y.9	0.048	0.169	0.289	0.531	0.772	0.893
C%	1.939	2.673	3.038	4.041	11.458	56.451
Y/Y.9	1	1.013				
C%	90	94.107				
SECCIÓN D1 Y.9=3.6cm						
Y/Y.9	0.055	0.192	0.330	0.605	0.742	0.880
C%	1.146	1.146	1.322	2.200	6.985	48.591
Y/Y.9	1	1.017				
C%	90	95.920				

MARGEN DERECHO						
GASTO=500 l/s						
SECCIÓN A2 Y.9=5.2cm						
Y/Y.9	0.038	0.132	0.227	0.415	0.604	0.699
C %	10.411	14.457	15.128	27.419	44.492	48.755
Y/Y.9	0.793	0.887	0.982	1	1.076	
C %	54.412	67.150	87.905	90	98.796	
SECCIÓN B2 Y.9=5.6cm						
Y/Y.9	0.036	0.124	0.213	0.391	0.569	0.747
C %	7.499	9.879	10.049	10.810	12.833	32.559
Y/Y.9	0.835	0.924	1	1.013		
C %	58.140	77.447	90	92.177		
SECCIÓN C2 Y.9=4.0cm						
Y/Y.9	0.049	0.172	0.295	0.541	0.787	0.910
C %	4.225	5.424	6.192	12.200	40.892	75.702
Y/Y.9	1	1.034				
C %	90	95.358				
SECCIÓN D2 Y.9=5.8cm						
Y/Y.9	0.034	0.120	0.207	0.379	0.551	0.723
C %	3.554	3.899	4.071	4.157	4.588	9.031
Y/Y.9	0.809	0.895	0.981	1	1.067	
C %	19.753	54.771	87.191	90	100	

MARGEN IZQUIERDO						
GASTO: 500 l/s						
SECCIÓN A0 Y.9= 5.69cm						
Y/Y.9	0.070	0.246	0.421	0.597	0.773	0.860
C %	0	0	1.284	1.603	10.776	33.477
Y/Y.9	0.948	1	1.036			
C %	75.575	90	100			
SECCIÓN A1 Y.9=5.1cm						
Y/Y.9	0.039	0.135	0.231	0.424	0.617	0.713
C %	8.475	13.638	16.788	24.533	22.263	21.733
Y/Y.9	0.810	0.906	1	1.003	1.099	/
C %	24.360	54.048	90	90.990	100	
SECCIÓN B1 Y.9=4.9cm						
Y/Y.9	0.040	0.141	0.242	0.443	0.645	0.746
C %	4.107	7.298	8.182	10.122	15.684	26.085
Y/Y.9	0.846	0.947	1	1.048		
C %	50.221	80.694	90	98.401		
SECCIÓN C1 Y.9=4.5cm						
Y/Y.9	0.044	0.152	0.261	0.370	0.479	0.588
C %	1.487	2.440	1.916	2.914	3.387	4.187
Y/Y.9	0.697	0.805	0.914	1	1.023	
C %	5.405	25.521	72.980	90	94.594	
SECCIÓN D1 Y.9=3.8cm						
Y/Y.9	0.052	0.181	0.311	0.440	0.570	0.699
C %	0.290	0.777	1.120	1.285	1.526	6.345
Y/Y.9	1	1.036				
C %	90	100				

MARGEN IZQUIERDO

GASTO: 500 l/s

SECCIÓN A2 Y.9= 4.8cm

Y/Y.9	0.041	0.143	0.245	0.347	0.449	0.552
C %	9.237	14.137	13.655	16.546	24.498	31.245
Y/Y.9	0.654	0.756	0.858	0.960	1	1.062
C %	38.795	44.418	58.153	83.614	90	100

SECCIÓN B2 Y.9=4.7cm

Y/Y.9	0.042	0.148	0.255	0.467	0.679	0.785
C %	5.470	8.331	9.217	10.012	19.175	33.149
Y/Y.9	0.891	0.997	1	1.103		
C %	64.912	89.703	90	99.599		

SECCIÓN C2 Y.9=4.1cm

Y/Y.9	0.049	0.171	0.292	0.414	0.536	0.658
C %	2.088	4.177	5.221	7.229	6.988	11.084
Y/Y.9	0.780	0.902	1	1.024		
C %	26.104	48.273	90	100		

SECCIÓN D2 Y.9=4.1cm

Y/Y.9	0.048	0.169	0.291	0.412	0.533	0.654
C %	1.044	2.570	3.052	4.096	4.659	4.659
Y/Y.9	0.775	0.896	1	1.017		
C %	8.755	28.675	90	100		

MARGEN DERECHO

GASTO= 1000 Vs

SECCIÓN A0 Y.9= 9.1cm						
Y/Y.9	0.022	0.241	0.459	0.678	0.787	0.897
C %	0	0	0.729	0.781	0.625	5.214
Y/Y.9	1	1.006				
C %	90	95.090				
SECCIÓN A1 Y.9=9.1cm						
Y/Y.9	0.022	0.131	0.240	0.350	0.459	0.568
C %	14.052	22.464	20.224	13.692	7.180	2.527
Y/Y.9	0.677	0.787	0.896	1	1.005	
C %	1.171	3.008	24.083	90	93.267	
SECCIÓN B1 Y.9=9cm						
Y/Y.9	0.022	0.133	0.244	0.355	0.466	0.577
C %	7.169	11.276	10.915	11.996	11.366	8.548
Y/Y.9	0.688	0.799	0.910	1	1.021	
C %	4.469	4.281	47.497	90	100	
SECCIÓN C1 Y.9=7.9cm						
Y/Y.9	0.025	0.151	0.277	0.403	0.529	0.655
C %	2.489	4.041	4.405	4.677	4.767	4.767
Y/Y.9	0.781	0.907	1	1.033		
C %	11.106	61.282	90	100		
SECCIÓN D1 Y.9=6.9cm						
Y/Y.9	0.029	0.173	0.317	0.461	0.606	0.750
C %	1.146	1.542	1.586	1.586	2.113	4.559
Y/Y.9	0.894	1	1.038			
C %	62.105	90	100			

MARGEN DERECHO						
GASTO: 1000 l/s						
SECCIÓN A2 Y.9= 9.3cm						
Y/Y.9	0.021	0.128	0.235	0.342	0.449	0.556
C %	15.379	22.593	27.338	36.216	37.016	29.450
Y/Y.9	0.663	0.770	0.877	0.984	1	1.091
C %	19.457	16.298	39.251	88.300	90	100
SECCIÓN B2 Y.9=9.0cm						
Y/Y.9	0.022	0.133	0.243	0.464	0.575	0.685
C %	9.031	13.505	14.344	19.008	22.308	23.458
Y/Y.9	0.795	0.906	1	1.016		
C %	27.134	63.926	90	94.562		
SECCIÓN C2 Y.9=8.0cm						
Y/Y.9	0.025	0.149	0.399	0.648	0.772	0.897
C %	6.703	8.742	7.384	9.419	16.960	54.480
Y/Y.9	1	1.022				
C %	90	97.435				
SECCIÓN D2 Y.9=7.4cm						
Y/Y.9	0.027	0.161	0.430	0.699	0.834	0.968
C %	3.209	3.899	3.813	6.303	20.744	83.567
Y/Y.9	1	1.036				
C %	90	97.195				

MARGEN IZQUIERDO						
GASTO: 1000 l/s						
SECCIÓN A0 Y.9= 10.3cm						
Y/Y.9	0.039	0.135	0.232	0.425	0.522	0.618
C %	0.322	0	0.430	1.603	1.921	2.132
Y/Y.9	0.715	0.812	0.908	1	1.005	
C %	5.975	15.578	49.627	90	92.165	
SECCIÓN A1 Y.9=9.3cm						
Y/Y.9	0.021	0.128	0.234	0.341	0.447	0.554
C %	14.292	21.025	19.238	15.684	8.767	4.208
Y/Y.9	0.660	0.767	0.873	0.980	1	1.086
C %	2.481	5.113	31.809	87.642	90	100
SECCIÓN B1 Y.9=9.0cm						
Y/Y.9	0.022	0.132	0.242	0.352	0.462	0.572
C %	7.101	12.791	12.129	12.413	12.129	8.961
Y/Y.9	0.682	0.792	0.902	1	1.012	
C %	5.414	6.409	37.420	90	96.266	
SECCIÓN C1 Y.9=8.6cm						
Y/Y.9	0.023	0.138	0.254	0.369	0.485	0.600
C %	2.012	3.764	4.281	3.764	3.245	5.031
Y/Y.9	0.715	0.831	0.888	0.946	1	1.004
C %	5.731	16.523	36.210	70.494	90	91.383
SECCIÓN D1 Y.9=6.6cm						
Y/Y.9	0.030	0.181	0.332	0.483	0.634	0.785
C %	0.794	0.926	1.102	1.190	1.454	4.950
Y/Y.9	0.861	0.936426	1	1.012		
C %	17.223	50.63162	90	97.396		

MARGEN IZQUIERDO

GASTO: 1000 l/s

SECCIÓN A2

Y.9= 8.9cm

Y/Y.9	0.022	0.135	0.247	0.359	0.471	0.584
C %	23.538	24.890	20.161	20.946	19.789	13.660
Y/Y.9	0.696	0.808	0.920	0.976	1	1.033
C %	13.534	22.223	74.019	84.517	90	97.595

SECCIÓN B2

Y.9=11cm

Y/Y.9	0.018	0.108	0.199	0.289	0.380	0.470
C %	9.040	15.930	15.241	14.032	14.464	14.637
Y/Y.9	0.560	0.651	0.741	0.831	0.922	1
C %	13.337	9.747	9.482	18.835	63.917	90
Y/Y.9	1.012					
C %	94.027					

SECCIÓN C2

Y.9=8.9cm

Y/Y.9	0.022	0.134	0.245	0.357	0.469	0.580
C %	4.654	7.597	7.086	7.299	7.597	8.657
Y/Y.9	0.692	0.803	0.915	1	1.026	
C %	12.829	31.197	81.943	90	92.492	

SECCIÓN D2

Y.9=7.8cm

Y/Y.9	0.026	0.154	0.282	0.410	0.538	0.666
C %	2.604	4.674	5.489	5.618	5.704	8.095
Y/Y.9	0.794	0.922	0.986	1	1.050	
C %	18.552	63.027	88.020	90	97.315	

MARGEN DERECHO

GASTO: 1420 l/s

SECCIÓN A0 Y.9= 12cm

Y/Y.9	0.017	0.266	0.515	0.763	0.846	0.929
C %	0.625	0.469	0.781	0.833	2.583	33.208
Y/Y.9	1	1.012				
C %	90	100				

SECCIÓN A1 Y.9=11cm

Y/Y.9	0.018	0.199	0.380	0.561	0.741	0.832
C %	15.660	19.094	6.147	1.269	1.366	4.443
Y/Y.9	0.922	1	1.013			
C %	38.595	90	98.399			

SECCIÓN B1 Y.9=11cm

Y/Y.9	0.018	0.193	0.369	0.545	0.721	0.896
C %	8.365	11.906	10.371	4.375	1.535	14.584
Y/Y.9	0.984	1	1.072			
C %	87.816	90	100			

SECCIÓN C1 Y.9=9.4cm

Y/Y.9	0.021	0.233	0.444	0.655	0.867	0.973
C %	2.856	5.220	5.311	5.762	18.976	86.513
Y/Y.9	1	1.078				
C %	90	100				

SECCIÓN D1 Y.9=10cm

Y/Y.9	0.020	0.216	0.412	0.608	0.804	0.902
C %	1.322	2.157	2.376	2.901	6.121	29.130
Y/Y.9	1.000	1	1.098			
C %	89.971	90	100			

MARGEN DERECHO

GASTO: 1420 l/s

SECCIÓN A2 Y.9= 11.2cm

Y/Y.9	0.018	0.198	0.377	0.557	0.647	0.737
C %	16.215	27.175	33.245	23.825	13.113	5.975
Y/Y.9	0.827	0.917	1	1.006		
C %	9.647	50.487	90	93.052		

SECCIÓN B2 Y.9=10.8

Y/Y.9	0.018	0.202	0.386	0.570	0.754	0.846
C %	9.370	16.682	17.514	21.073	20.083	27.947
Y/Y.9	0.938	1	1.030			
C %	72.909	90	98.155			

SECCIÓN C2 Y.9=10.9

Y/Y.9	0.018	0.201	0.383	0.565	0.747	0.839
C %	5.595	7.384	7.129	8.318	10.770	24.129
Y/Y.9	0.930	1	1.021			
C %	65.684	90	97.195			

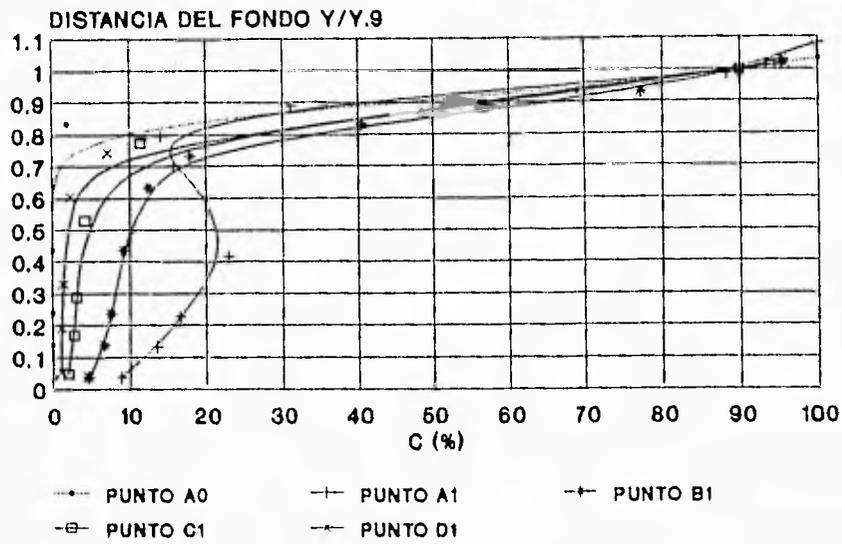
SECCIÓN D2 Y.9=9.3

Y/Y.9	0.021	0.235	0.448	0.661	0.874	0.981
C %	3.295	5.189	5.704	5.532	26.482	85.693
Y/Y.9	1	1.034				
C %	90	97.755				

MARGEN IZQUIERDO						
GASTO: 1420 l/s						
SECCIÓN A0 Y.9= 13.1cm						
Y/Y.9	0.031	0.183	0.336	0.488	0.641	0.794
C %	0.858	0.644	1.921	3.184	3.810	15.296
Y/Y.9	0.870	0.946	1	1.022		
C %	36.894	73.623	90	96.821		
SECCIÓN A1 Y.9=11.8						
Y/Y.9	0.030	0.199	0.368	0.538	0.707	0.792
C %	16.788	14.106	7.003	3.703	6.211	12.129
Y/Y.9	0.877	0.961	1	1.046		
C %	48.479	81.583	90	100		
SECCIÓN B1 Y.9=10.6						
Y/Y.9	0.019	0.208	0.396	0.585	0.774	0.868
C %	5.706	11.379	9.042	4.641	6.475	22.040
Y/Y.9	0.962	1	1.057			
C %	83.326	90	100			
SECCIÓN C1 Y.9=9.7						
Y/Y.9	0.031	0.236	0.440	0.645	0.850	0.901
C %	2.677	4.375	4.750	4.563	14.761	36.010
Y/Y.9	0.952	1	1.003			
C %	68.612	90	91.539			
SECCIÓN D1 Y.9=10.1						
Y/Y.9	0.030	0.227	0.424	0.621	0.819	0.917
C %	1.453	1.762	2.173	2.276	12.129	48.403
Y/Y.9	1	1.016				
C %	90	98.004				

MARGEN IZQUIERDO						
GASTO: 1420 l/s						
SECCIÓN A2 Y.9=13.29cm						
Y/Y.9	0.023	0.173	0.323	0.474	0.624	0.775
C %	18.665	21.959	17.728	9.482	5.019	12.205
Y/Y.9	0.925	1	1.000			
C %	66.595	90	90.094			
SECCIÓN B2 Y.9=13.0						
Y/Y.9	0.023	0.176	0.329	0.482	0.635	0.788
C %	12.990	15.241	14.896	11.593	6.636	11.768
Y/Y.9	0.864	0.941	1	1.017		
C %	30.635	65.447	90	97.200		
SECCIÓN C2 Y.9=10.0						
Y/Y.9	0.020	0.219	0.419	0.618	0.817	0.917
C %	4.658	8.951	8.153	8.242	16.273	54.473
Y/Y.9	1	1.016				
C %	90	97.041				
SECCIÓN D2 Y.9=9.03						
Y/Y.9	0.022	0.244	0.465	0.686	0.797	0.908
C %	2.479	3.571	4.658	5.380	12.554	48.430
Y/Y.9	1	1.019				
C %	90	98.397				

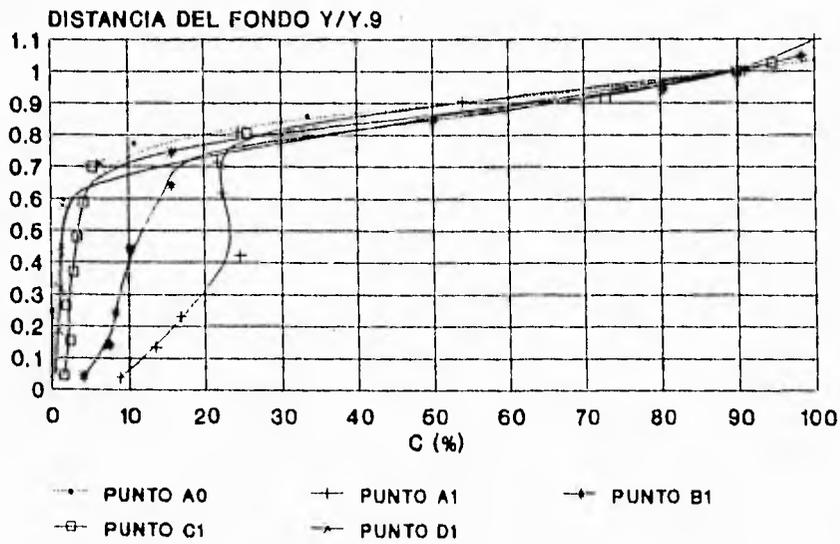
CONCENTRACIONES DE AIRE PARA Q=500 l/s
LECTURAS MARGEN DERECHO



AIREADOR 1

FIG. 4.1.7

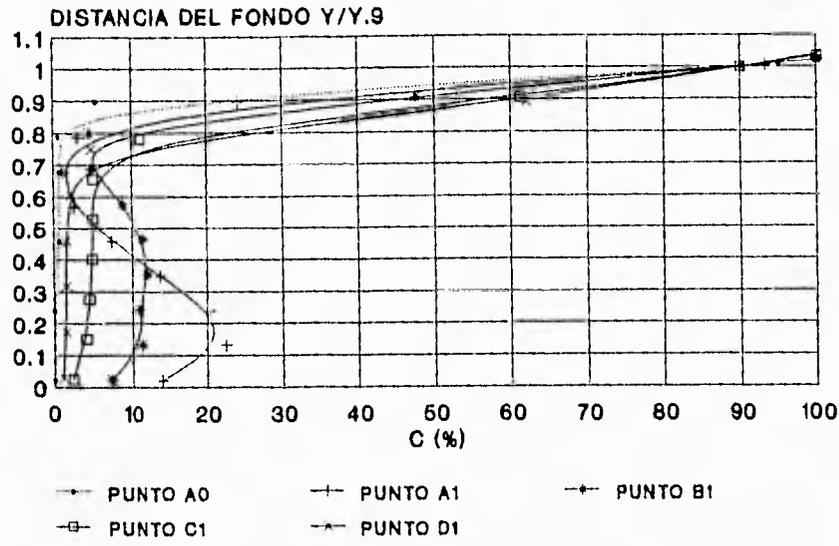
CONCENTRACIONES DE AIRE PARA Q=500 l/s
LECTURAS MARGEN IZQUIERDO



AIREADOR 1

FIG. 4.1.8

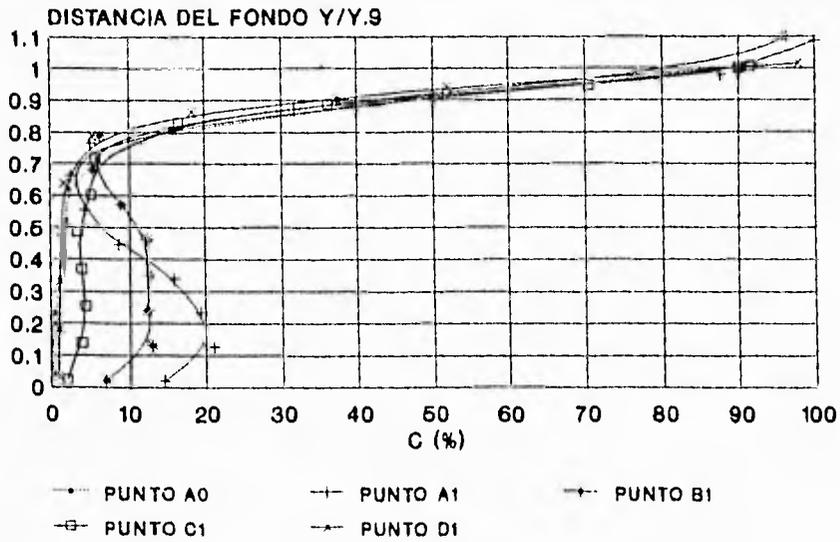
CONCENTRACIONES DE AIRE PARA Q=1000 l/s
LECTURAS MARGEN DERECHO



AIREADOR 1

FIG. 4.1.9

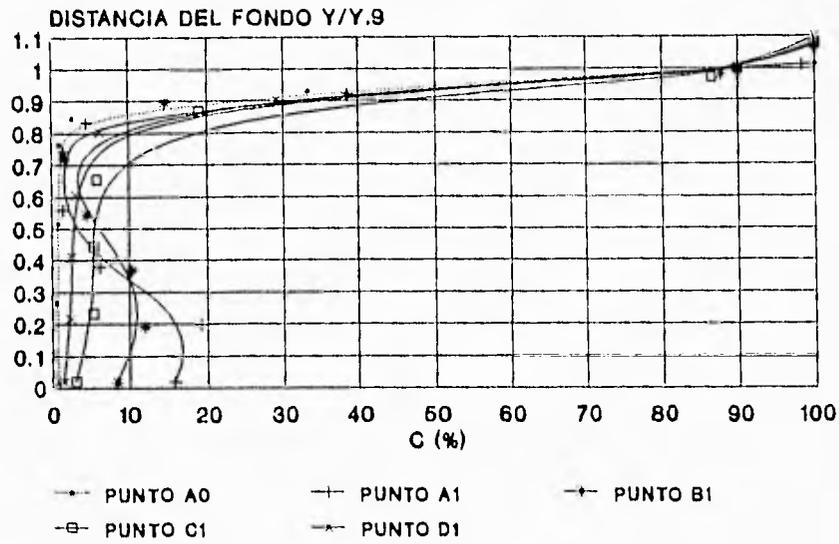
CONCENTRACIONES DE AIRE PARA Q=1000 l/s
LECTURAS MARGEN IZQUIERDO



AIREADOR 1

FIG. 4.1.10

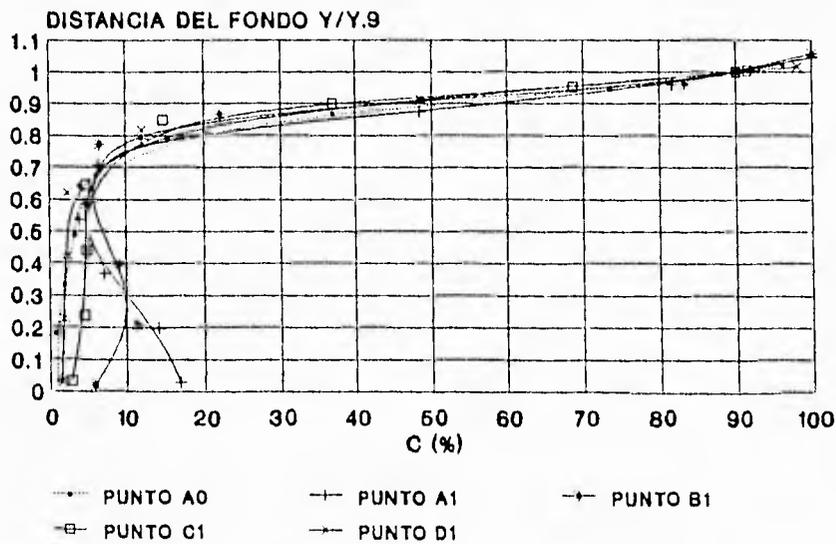
CONCENTRACIONES DE AIRE PARA Q=1420 l/s
LECTURAS MARGEN DERECHO



AIREADOR 1

FIG. 4.1.11

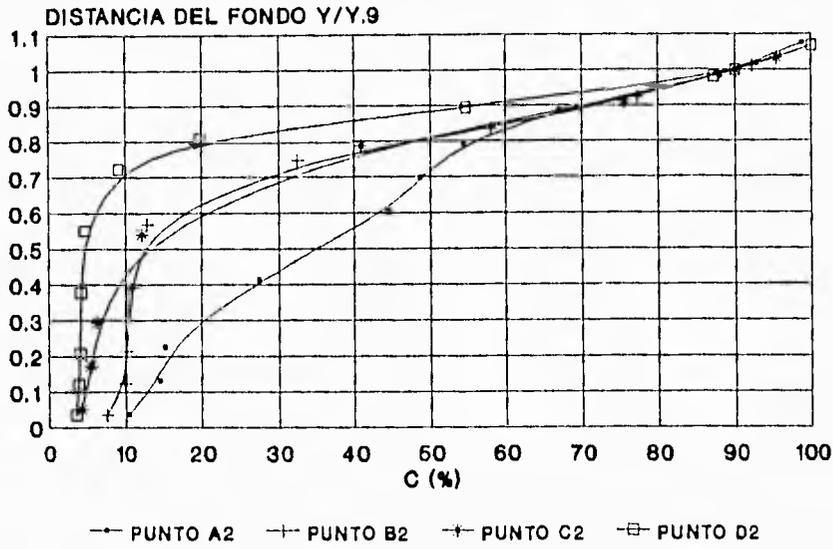
CONCENTRACIONES DE AIRE PARA Q=1420 l/s
LECTURAS MARGEN IZQUIERDO



AIREADOR 1

FIG. 4.1.12

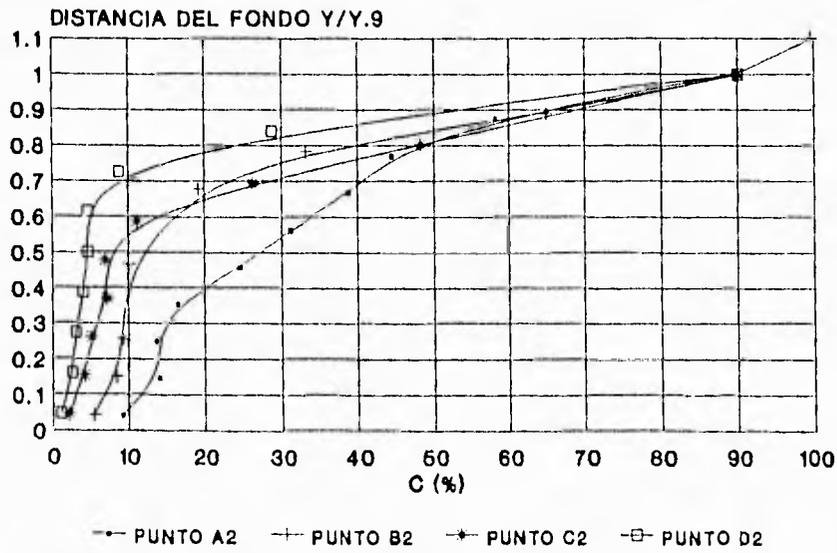
CONCENTRACIONES DE AIRE PARA Q=500 l/s
LECTURAS MARGEN DERECHO



AIRERADOR 2

FIG. 4.1.13

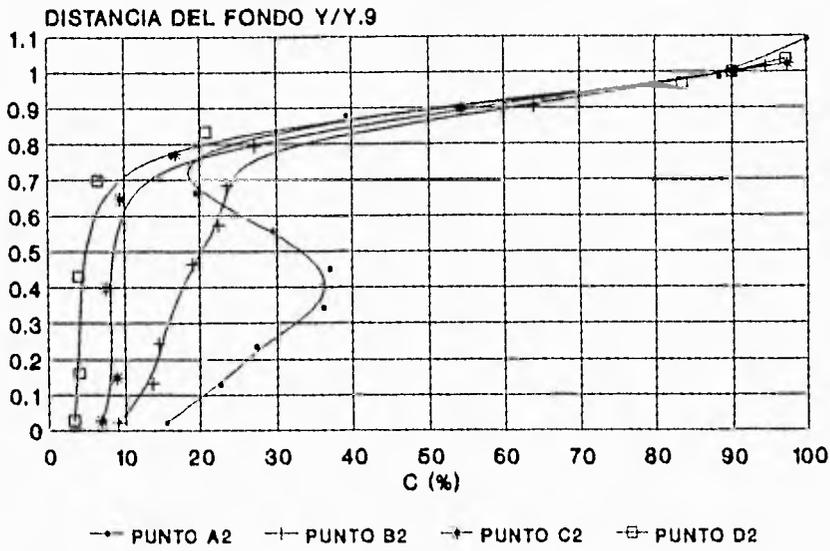
CONCENTRACIONES DE AIRE PARA Q=500 l/s
LECTURAS MARGEN IZQUIERDO



AIREADOR 2

FIG. 4.1.14

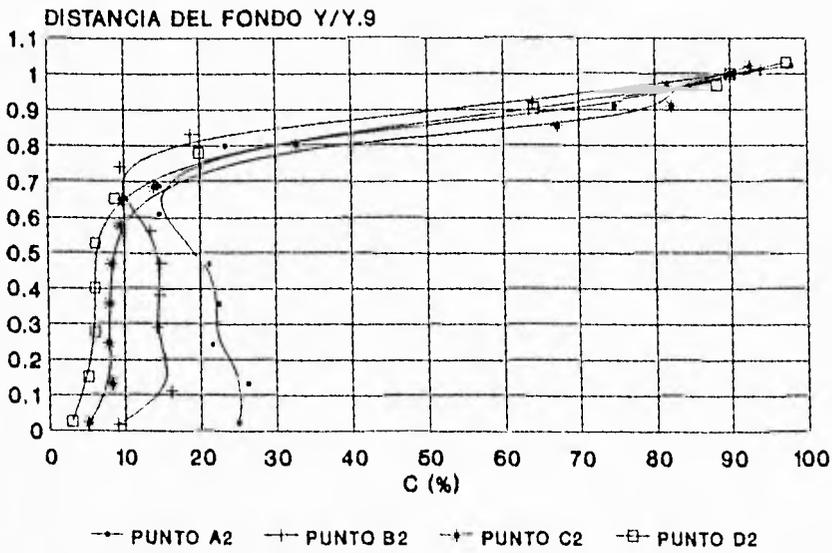
CONCENTRACIONES DE AIRE PARA Q=1000 l/s
LECTURAS MARGEN DERECHO



AIREADOR 2

FIG. 4.1.15

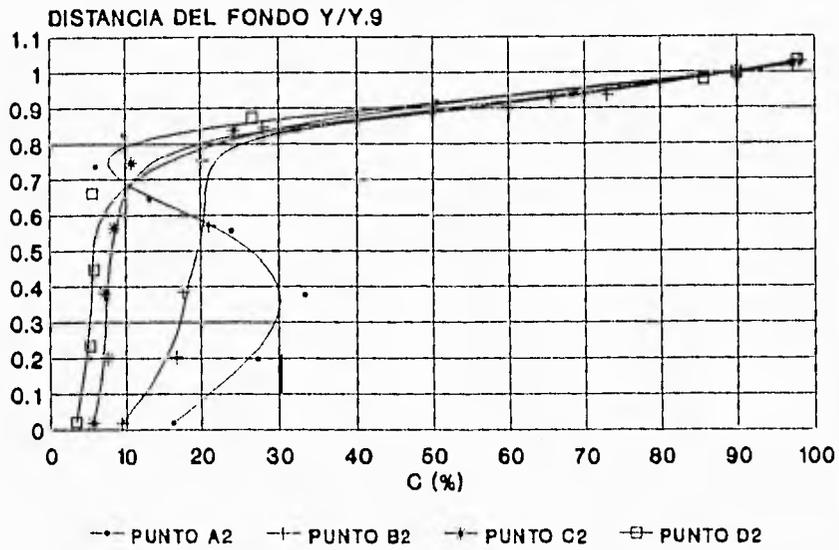
CONCENTRACIONES DE AIRE PARA Q=1000 l/s
LECTURAS MARGEN IZQUIERDO



AIREADOR 2

FIG. 4.1.16

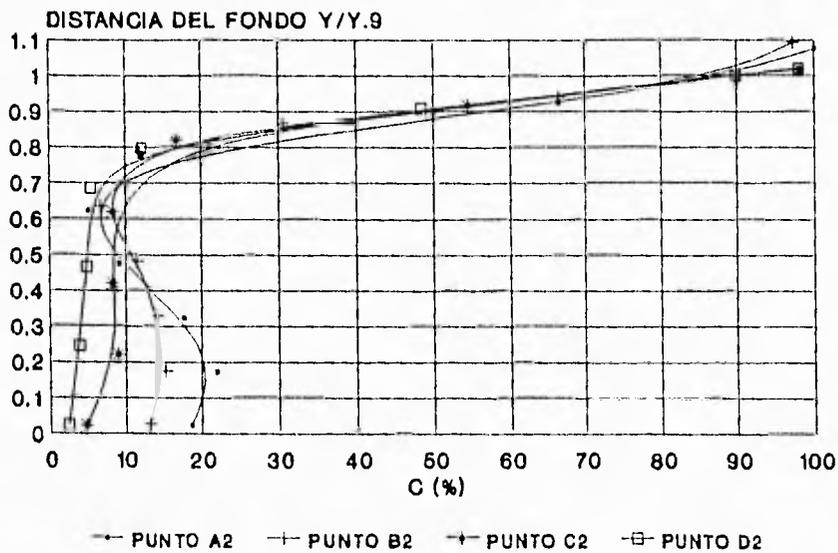
CONCENTRACIONES DE AIRE PARA Q=1420 l/s
LECTURAS MARGEN DERECHO



AIREADOR 2

FIG.4.1.17

CONCENTRACIONES DE AIRE PARA Q=1420 l/s
LECTURAS MARGEN IZQUIERDO



AIREADOR 2

FIG. 4.1.18

De los perfiles de C en función de la distancia al fondo del vertedor es posible obtener el valor de la concentración media C_m (ecuación 4.1.2), esta integración se realizó por medio suma de áreas. En este caso β es la relación de gasto de aire que ingresa por las torres de aireación entre gasto de agua. Las siguientes tablas indican el valor de los parámetros de calculo de cada sección.

MARGEN DERECHO GASTO: 500 l/s							
PUNTO	Y.9	C_m	C^*	β	Yeq	V	Fr
A0	5.038	9.430	10.412	18.5	4.563	6.371	9.522
LA1							
A1	5.269	23.260	30.310	18.5	4.043	7.189	11.847
B1	5.048	21.860	27.975	18.5	3.945	7.370	11.847
C1	4.145	16.080	19.161	18.5	3.478	8.357	14.306
D1	3.650	14.380	16.795	18.5	3.125	9.302	16.799
LA2							
A2	5.290	38.780	63.345	40	3.239	8.976	15.925
B2	5.620	27.000	36.986	40	4.103	7.086	11.169
C2	4.063	25.900	34.953	40	3.011	9.656	17.766
D2	5.800	16.070	19.147	40	4.868	5.972	8.641

MARGEN IZQUIERDO GASTO: 500 l/s							
PUNTO	Y.9	C_m	C^*	β	Yeq	V	Fr
A0	5.695	13.417	15.496	18.5	4.931	5.895	8.475
LA1							
A1	5.186	26.945	36.883	18.5	3.789	7.672	12.584
B1	4.963	23.820	31.269	18.5	3.781	7.690	12.628
C1	4.594	16.748	20.117	18.5	3.824	7.613	12.424
D1	3.861	16.375	19.581	18.5	3.229	9.148	16.384
LA2							
A2	4.895	34.261	52.117	40	3.218	8.723	16.558
B2	4.715	24.284	32.073	40	3.570	8.142	13.759
C2	4.103	18.158	22.187	40	3.358	8.199	15.083
D2	4.130	11.917	13.530	40	3.638	7.99	13.376

MARGEN DERECHO GASTO: 1000 l/s							
PUNTO	Y.9	Cm	C*	β	Yeq	V	Fr
A0	9.143	5.676	6.018	7.6	8.624	6.742	7.329
LA1							
A1	9.153	16.048	19.116	7.6	7.684	7.566	8.714
B1	9.	16.550	19.832	7.6	7.511	7.741	9.018
C1	7.942	15.720	18.652	7.6	6.694	8.686	10.719
D1	6.936	14.690	17.220	7.6	5.917	9.826	12.896
LA2							
A2	9.345	31.970	46.994	20	6.357	9.145	11.580
B2	9.051	26.930	36.855	20	6.614	8.791	10.913
C2	8.026	19.070	23.564	20	6.495	8.951	11.213
D2	7.430	14.860	17.454	20	6.326	9.191	11.666

MARGEN IZQUIERDO GASTO: 1000 l/s							
PUNTO	Y.9	Cm	C*	β	Yeq	V	Fr
A0	10.340	12.050	13.701	7.6	9.102	6.393	6.768
LA1							
A1	9.391	19.175	23.724	7.6	7.590	7.661	8.878
B1	9.094	16.800	20.192	7.6	7.566	7.685	8.921
C1	8.667	13.270	15.300	7.6	7.516	7.795	9.112
D1	6.621	9.290	10.241	7.6	6.006	9.676	12.611
LA2							
A2	9.	27.774	38.455	20	6.435	9.314	11.370
B2	11.060	24.46	32.380	20	8.354	6.968	7.686
C2	9.	21.820	27.910	20	6.799	8.552	10
D2	7.807	16.853	20.268	20	6.329	9.186	11.223

MARGEN DERECHO GASTO: 1420 l/s							
PUNTO	Y.9	Cm	C*	β	Yeq	V	Fr
A0	12.050	6.575	7.038	5.075	11.258	7.344	6.988
LA1							
A1	11.059	13.780	15.982	5.075	9.535	8.671	8.965
B1	11.379	13.100	15.075	5.075	9.888	8.361	8.488
C1	9.458	14.039	16.332	5.075	8.130	10.169	11.386
D1	10.200	9.970	11.074	5.075	9.183	9.003	9.485
LA2							
A2	11.200	26.710	36.444	12.66	8.208	10.072	11.223
B2	10.870	25.240	33.761	12.66	8.126	10.174	11.394
C2	10.970	17.120	20.656	12.66	9.092	9.093	9.628
D2	9.370	14.640	17.151	12.66	7.998	10.337	11.669

MARGEN IZQUIERDO GASTO: 1420 l/s							
PUNTO	Y.9	Cm	C*	β	Yeq	V	Fr
A0	13.100	13.720	15.902	5.07	11.303	7.315	6.946
LA1							
A1	11.807	18.880	23.274	5.07	9.578	8.632	8.905
B1	10.600	15.760	18.708	5.07	8.929	9.259	9.892
C1	9.766	12.740	14.600	5.07	8.522	9.702	10.610
D1	10.140	11.300	12.740	5.07	8.994	9.192	9.785
LA2							
A2	13.290	22.770	29.483	12.66	10.264	8.055	8.027
B2	13.070	19.630	24.425	12.66	10.504	7.870	7.753
C2	10.030	17.000	20.482	12.66	8.325	9.931	10.989
D2	9.031	13.740	15.929	12.66	7.790	10.61	12.14

4.2 REGISTRO EN UN CANAL RECTO.

DESCRIPCION DEL MODELO FISICO.

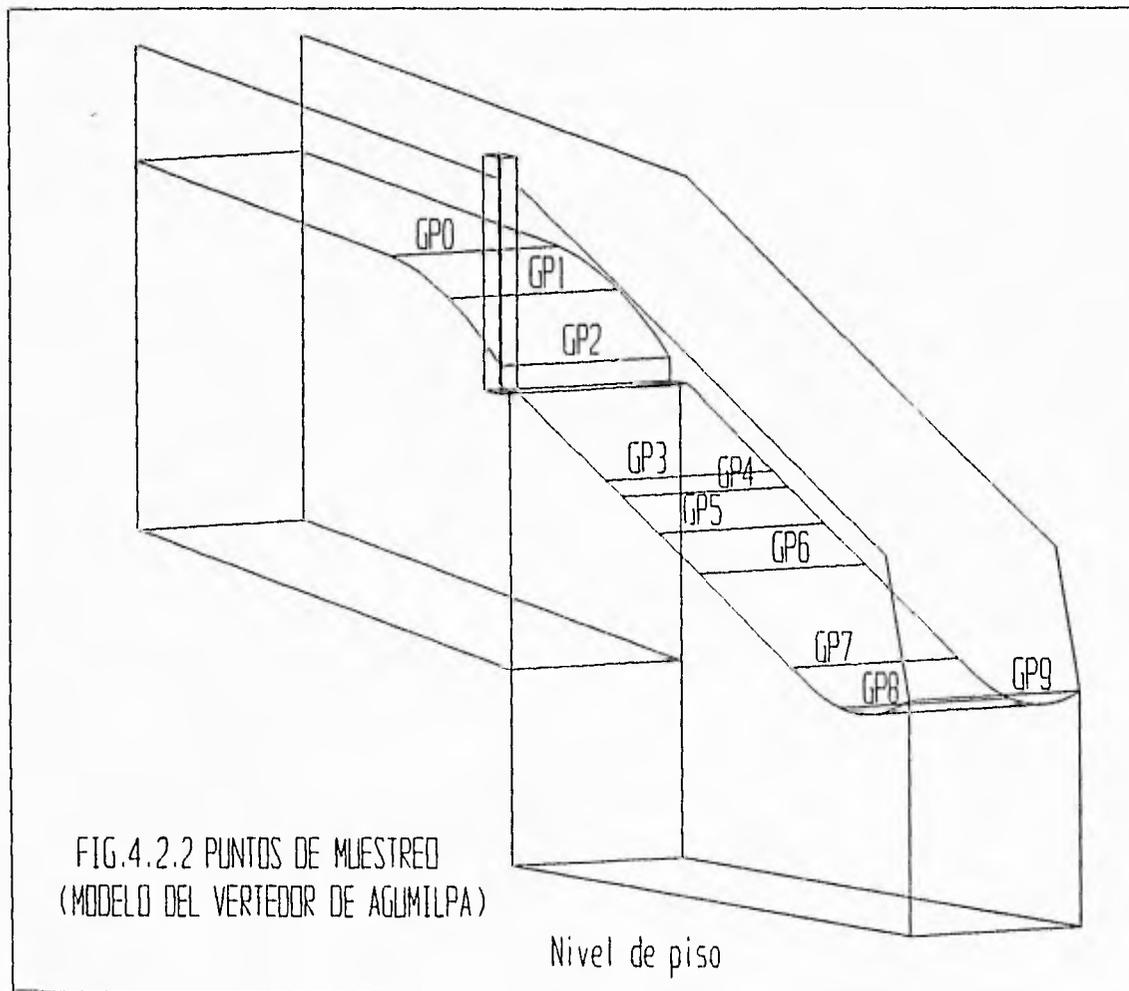
El modelo físico del canal recto se construyó en el laboratorio de modelos hidráulicos de C.F.E. en Cuernavaca Morelos. En este caso, para ver el funcionamiento del aireador, se decidió por un modelo seccional, es decir se construyó la mitad del ancho correspondiente al vertedor de servicio de la presa AGUAMILPA a una escala de 1:30. Este tiene un solo aireador sobre el canal que es recto con dos pendientes (Aguas arriba del aireador $\alpha= 5$, aguas abajo del aireador $\alpha= 20$), de 70cm de ancho y una curva parabólica antes del aireador, la vista general se muestra en la figura 4.2.1.



FIG. 4.2.1

MEDICIONES DE CONCENTRACIÓN DE AIRE EN EL MODELO.

Se realizaron las mediciones de concentración de aire en 10 secciones indicadas como GP0, GP1, GP2, aguas arriba del aireador y las secciones GP3, GP4, GP5, GP6, GP7, GP8, GP9, aguas abajo del aireador, sobre el eje central del modelo, como se indica en la figura 4.2.2.



En la siguiente tabla se indica la ubicación de los puntos.

PUNTO	S	α	Ce
GP0	-0.91	5	.07
GP1	-0.49	5	.07
GP2	-0.01	5	.07
LA	0		
GP3	0.871	20	.11

GP4	1	20	.11
GP5	1.3	20	.11
GP6	1.63	20	.11
GP7	2.4	20	.11
GP8	2.84	20	.11
GP9	3.28	20	.11

El procedimiento de muestreo fue el mismo que se utilizó en el canal con curvatura vertical. Las pruebas se realizaron para dos diferentes gastos en el modelo que fueron próximos a 101 y 304.3 l/s que corresponden a 1000 y 3000 m³/s del prototipo. Los resultados de las mediciones se indican en las siguientes tablas adimensionadas para cada gasto. Las figuras 4.2.3. a 4.2.6. resumen estos resultados en forma gráfica.

CENTRO						
GASTO: 101 l/s						
SECCION GP0 Y.9= 3.1cm						
Y/Y.9	0.064	0.707	0.756	0.804	0.852	0.9
C %	0	0	2.489	7.630	27.951	41.685
Y/Y.9	0.949	0.997	1	1.029		
C %	71.646	89.156	90	100		
SECCION GP1 Y.9=3.15						
Y/Y.9	0.063	0.713	0.760	0.808	0.855	0.903
C %	0	0.884	2.731	6.747	24.337	42.651
Y/Y.9	0.950	0.998	1	1.045		
C %	76.305	89.478	90	100		
SECCION GP2 Y.9=3.12						
Y/Y.9	0.064	0.672	0.784	0.832	0.880	0.960
C %	0	0	2.410	13.012	39.518	79.197
Y/Y.9	1	1.008				
C %	90	92.289				

CENTRO GASTO: 101 Vs						
SECCION GP3 Y.9= 2.95						
Y/Y.9	0.068	0.237	0.407	0.576	0.746	0.915
C %	1.285	3.373	6.908	24.337	58.795	85.301
Y/Y.9	1	1.085				
C %	90	94.699				
SECCION GP4 Y.9= 3.1						
Y/Y.9	0.064	0.224	0.385	0.545	0.706	0.866
C %	0.884	2.731	9.639	29.639	54.699	78.313
Y/Y.9	1	1.026				
C %	90	92.289				
SECCION GP5 Y.9=2.7						
Y/Y.9	0.072	0.253	0.435	0.616	0.797	0.978
C %	1.205	2.249	3.855	14.217	47.550	88.594
Y/Y.9	1	1.159				
C %	90	100				
SECCION GP6 Y.9= 2.9						
Y/Y.9	0.068	0.237	0.407	0.577	0.746	0.916
C %	0.803	1.205	1.794	10.466	33.068	75.880
Y/Y.9	0.984	1	1.086			
C %	88.112	90	100			

CENTRO GASTO: 1011/s						
SECCION GP7 Y.9= 2.6						
Y/Y.9	0.075	0.263	0.452	0.640	0.828	1
C %	0	0.562	0.723	0.723	29.103	90
Y/Y.9	1.016					
C %	95.767					
SECCION GP8 Y.9= 2.6						
Y/Y.9	0.076	0.266	0.456	0.646	0.836	1
C %	0	0	0	1.928	59.277	90
Y/Y.9	1.026					
C %	94.859					
SECCION GP9 Y.9= 2.4						
Y/Y.9	0.081	0.283	0.486	0.688	0.890	1
C %	0	0	0	9.719	57.349	90
Y/Y.9	1.012					
C %	93.494					

CENTRO						
GASTO: 304.3 l/s						
SECCION GP0 Y.9= 8.13cm						
Y/Y.9	0.025	0.848	0.873	0.898	0.922	0.947
C %	0	0	3.695	7.149	17.590	39.116
Y/Y.9	0.971	0.996	1	1.021		
C %	68.032	88.032	90	100		
SECCION GP1 Y.9= 7.9						
Y/Y.9	0.025	0.795	0.820	0.846	0.871	0.896
C %	0	0	3.855	5.141	10.843	24.578
Y/Y.9	0.921	0.947	0.972	0.997	1	1.035
C %	42.249	62.731	73.012	89.157	90	100
SECCION GP2 Y.9=7.9						
Y/Y.9	0.025	0.152	0.279	0.406	0.533	0.659
C %	0	0	0	0	0	0
Y/Y.9	0.786	0.888	0.907	0.913	0.938	0.976
C %	0	15.904	24.578	31.566	46.827	84.016
Y/Y.9	1	1.040				
C %	90	100				

CENTRO						
GASTO: 304.3 l/s						
SECCION GP3 Y.9= 9.0cm						
Y/Y.9	0.022	0.133	0.243	0.354	0.464	0.574
C %	12.450	42.410	59.277	56.787	45.542	27.952
Y/Y.9	0.685	0.795	0.906	0.994	1	1.049
C %	14.378	18.153	57.992	88.835	90	100
SECCION GP4 Y.9= 8.5						
Y/Y.9	0.023	0.140	0.257	0.374	0.490	0.607
C %	8.835	18.072	24.578	40.241	44.659	42.096
Y/Y.9	0.724	0.840	0.957	1	1.074	
C %	23.936	32.209	85.221	90	98.233	
SECCION GP5 Y.9= 8.3						
Y/Y.9	0.024	0.143	0.262	0.382	0.501	0.620
C %	2.892	11.165	13.815	17.671	20.000	25.703
Y/Y.9	0.740	0.859	0.978	1	1.038	
C %	30.924	53.414	87.871	90	93.735	
SECCION GP6 Y.9= 7.6						
Y/Y.9	0.026	0.156	0.286	0.416	0.546	0.676
C %	1.446	6.185	6.908	4.257	4.498	12.610
Y/Y.9	0.806	0.936	1	1.066		
C %	42.570	80.321	90	100		

CENTRO						
GASTO: 304.3 l/s						
SECCION GP7 Y.9= 7.1cm						
Y/Y.9	0.028	0.098	0.169	0.239	0.309	0.380
C %	1.285	1.365	1.526	1.285	1.365	1.687
Y/Y.9	0.450	0.520	0.590	0.661	0.731	0.801
C %	2.273	2.169	2.490	3.534	9.237	19.036
Y/Y.9	0.872	0.942	1	1.019		
C %	43.775	77.912	90	93.976		
SECCION GP8 Y.9= 6.8						
Y/Y.9	0.030	0.177	0.325	0.473	0.620	0.768
C %	1.124	2.008	2.490	2.651	2.410	3.534
Y/Y.9	0.916	0.989	1	1.063		
C %	39.357	88.313	90	100		
SECCION GP9 Y.9= 6.6						
Y/Y.9	0.030	0.181	0.333	0.484	0.635	0.786
C %	0.964	0.964	1.205	1.365	1.446	4.739
Y/Y.9	0.938	1	1.013			
C %	62.169	90	95.904			

CONCENTRACIONES DE AIRE PARA Q=101 l/s
LECTURAS EN EL CENTRO

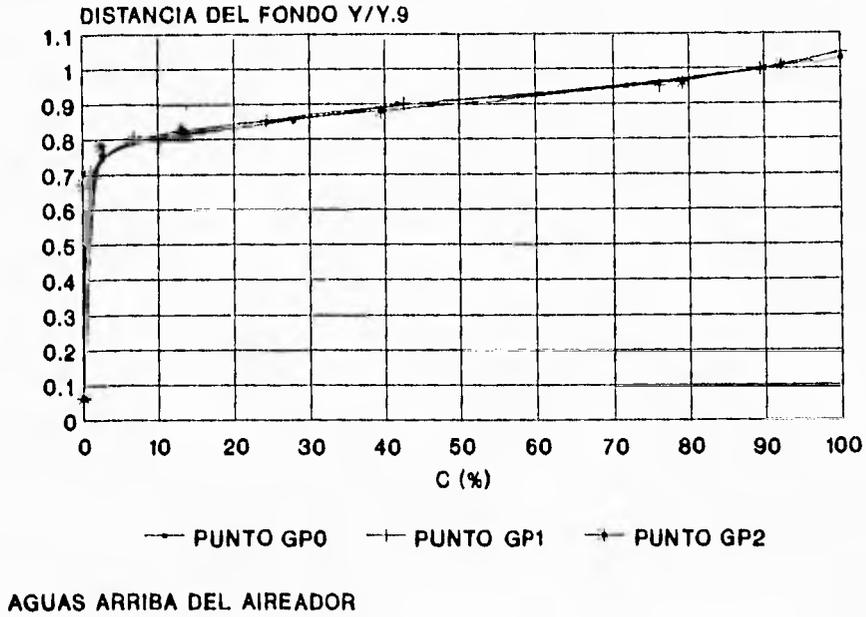


FIG. 4.2.3

CONCENTRACIONES DE AIRE PARA Q=304.3 l/s
LECTURAS EN EL CENTRO

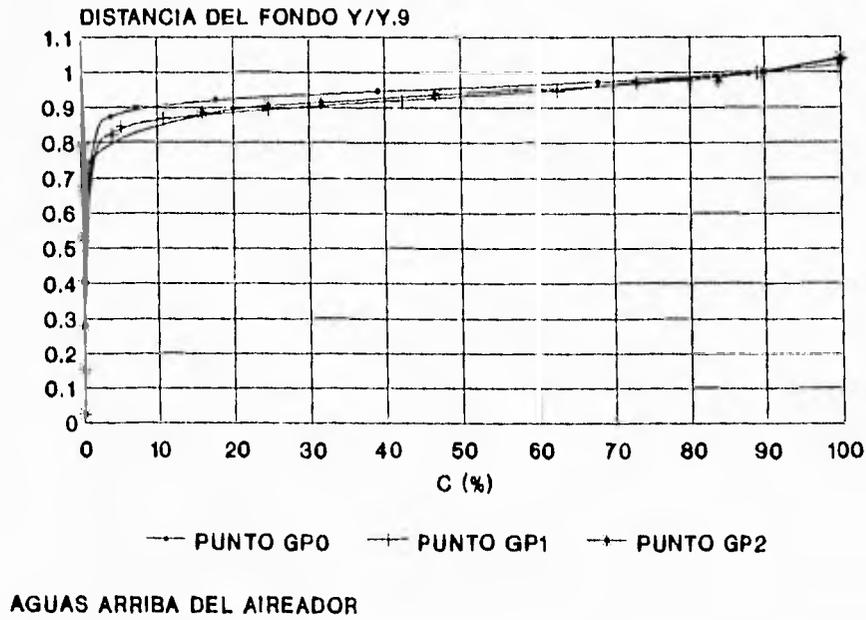
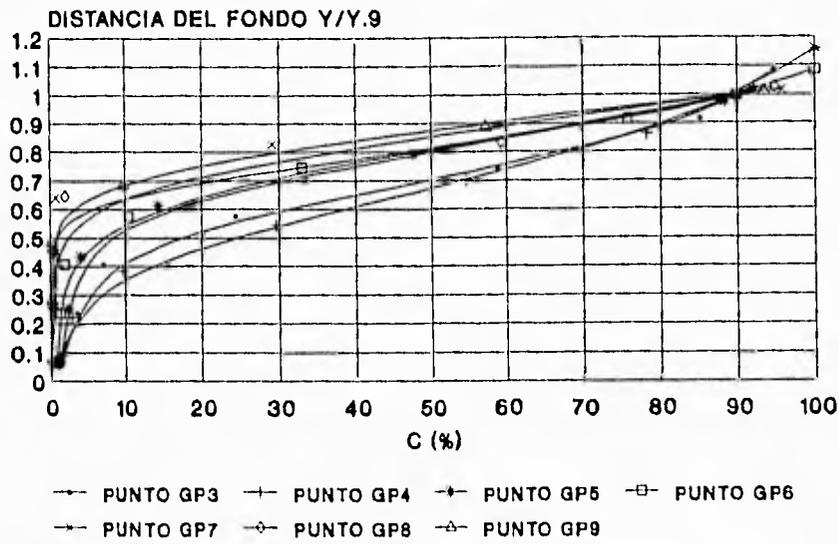


FIG. 4.2.4.

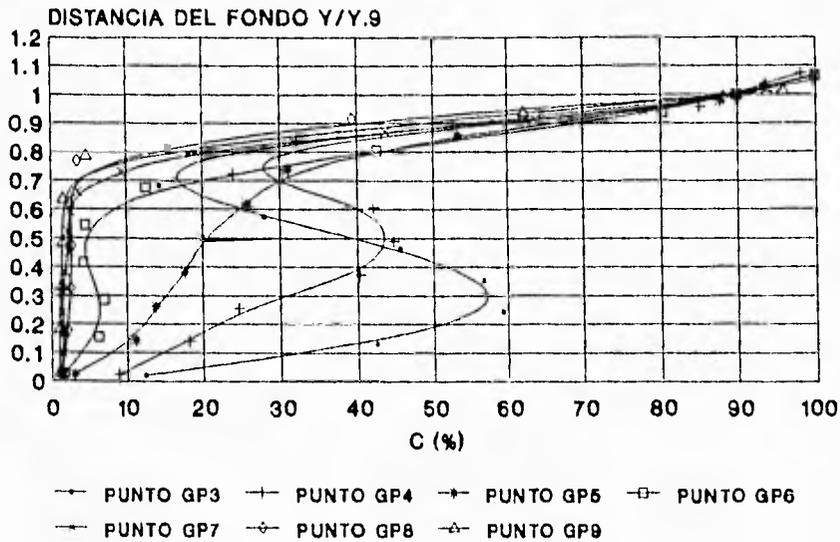
CONCENTRACIONES DE AIRE PARA Q=101 l/s
LECTURAS EN EL CENTRO



AGUAS ABAJO DEL AIREADOR

FIG. 4.2.5

CONCENTRACIONES DE AIRE PARA Q=304.3 l/s
LECTURAS EN EL CENTRO



AGUAS ABAJO DEL AIREADOR

FIG. 4.2.6.

Las siguientes tablas indican el valor de los principales parámetros de cálculo de cada sección.

CENTRO GASTO: 101 l/s							
PUNTO	Y.9	Cm	C*	β	Yeq	V	Fr
GP0	3.100	10.340	11.532	12.23	2.779	5.191	9.941
GP1	3.157	10.570	11.819	12.23	2.823	5.111	9.711
GP2	3.120	10.500	11.732	12.23	2.792	5.167	9.872
LA							
GP3	2.950	32.820	48.854	12.23	1.982	7.281	16.51
GP4	3.118	35.400	54.799	12.23	2.014	7.163	16.11
GP5	2.761	24.150	31.839	12.23	2.094	6.890	15.20
GP6	2.940	22.950	29.786	12.23	2.265	6.369	13.51
GP7	2.650	14.400	16.822	12.23	2.268	6.361	13.48
GP8	2.630	19.740	24.595	12.23	2.111	6.835	15.02
GP9	2.470	17.240	20.831	12.23	2.044	7.058	15.76

CENTRO GASTO: 304.3 l/s							
PUNTO	Y.9	Cm	C*	β	Yeq	V	Fr
GP0	8.132	4.890	5.141	8.12	7.734	5.621	6.453
GP1	7.920	7.180	7.735	8.12	7.351	5.913	6.963
GP2	7.900	7.090	7.631	8.12	7.340	5.923	6.980
LA							
GP3	9.052	41.000	69.492	8.12	5.341	8.140	11.245
GP4	8.567	36.400	57.233	8.12	5.449	7.978	10.913
GP5	8.380	28.620	40.095	8.12	5.982	7.267	9.487
GP6	7.690	21.300	27.065	8.12	6.052	7.183	9.322
GP7	7.110	14.370	16.782	8.12	6.088	7.140	9.239
GP8	6.800	10.900	12.233	8.12	6.059	7.175	9.307
GP9	6.610	11.300	12.740	8.12	5.863	7.414	9.776

4.3 COMPARACIÓN DE MEDIDAS.

En el modelo experimental del vertedor de la presa Huites se observó que para gastos de agua pequeños se introduce mayor cantidad de aire por las torres de aireación que para gastos grandes, pero la concentración media no decae tan rápido en gastos grandes como se da en gastos pequeños.

Como las mediciones se realizaron para dos márgenes, se observó que existe una ligera diferencia en el valor de la concentración media de aire para una misma sección, pero este no es muy significativo. Para fines de cálculo se realizó un promedio de los dos márgenes, y con éste se realizaron los cálculos de la siguiente unidad.

En el modelo experimental del vertedor de la presa Aguamilpa se observó que para gastos de agua pequeños se introduce menor cantidad de aire por las torres de aireación que para gasto grandes, pero la concentración media no decae tan rápido en gasto pequeños como sucede en gasto grandes.

No existe una manera de comparación entre los dos modelos experimentales ya que son diferentes geometrías y diferentes terminados, pero se observó que para el modelo experimental Aguamilpa se introduce más gasto de aire por las torres de aireación que para el modelo experimental Huites, pero la concentración media no decae tan rápido en Huites como en Aguamilpa

5. APLICACIÓN DE MODELOS TEÓRICOS A LA REPRESENTACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE AIRE.

5.1 DESCRIPCIÓN DE MODELOS TEÓRICOS,

Existen diversos modelos teóricos para el cálculo de concentración de aire, pero en la mayoría de ellos el objetivo es calcular el perfil de concentraciones de aire a lo largo del tirante, tal es el caso de Straub y Anderson [8], quienes realizaron mediciones experimentales en un modelo de canal recto, en el que se podía modificar la pendiente, obteniendo así condiciones de flujo permanente. El modelo teórico que obtuvieron fue para ajustar las mediciones de concentración de aire a lo largo del tirante en una sección dada.

Cain y Wood [9] midieron perfiles de concentración de aire en el vertedor de la presa Aviemore y compararon sus resultados con las mediciones en modelo hechas por Straub y Anderson. En su análisis modificaron el modelo teórico propuesto por Straub y Anderson.

Henry Falvey [10] desarrolló un modelo teórico similar al de Straub y Anderson, en el cual introduce más características de la concentración de aire, además de la velocidad terminal y la forma que las burbujas de aire podrían adoptar en la rápida.

Los modelos teóricos antes mencionados no representan la variación de la concentración media a lo largo del vertedor. Levich [20] realizó un modelo teórico de la concentración media de aire en función de la longitud del vertedor, pero el desarrollo de este es muy difícil de seguir.

Chanson [7] hace un desarrollo matemático muy sencillo para representar el fenómeno del escape de las burbujas de aire y la variación de concentración a lo largo del vertedor, calibrándolo con las mediciones hechas en prototipo en la presa Clyde (Nueva Zelanda). Obteniendo así una relación entre las concentraciones medias en diferentes secciones. En esta tesis, el trabajo de Chanson fue extendido para su aplicación a los modelos descritos en el capítulo anterior. El trabajo teórico y la comparación con los resultados experimentales se presentan en lo que resta de este capítulo.

5.2 APLICACIÓN A CANALES EXPERIMENTALES.

El método utilizado por H. Chanson [7] es el que se aplicó a los modelos experimentales descritos en el capítulo anterior para revisar el espaciamiento y localización de aireadores.

En la región de flujo gradualmente variado, aguas abajo de un aireador, se ha demostrado que bajo las siguientes hipótesis [4]:

H1.- Baja velocidad de entrada del aire.

H2.- Distribución de presión cuasi-hidrostática.

H3.- Variaciones de la distribución de la velocidad lentas o graduales.

la ecuación de conservación de masa provee una ecuación que permite calcular la concentración media de aire y la profundidad de referencia $Y.9$ en todos los puntos de un flujo gradualmente variado, aguas abajo del punto de inicio de entrada de aire.

Con el mismo método que usó Wood (1985) [4], aguas abajo del punto de inicio de entrada de aire, la ecuación de conservación de masa para la fase de aire queda definido como:

$$\frac{d}{dx} q_{\text{aire}} = V_e(x) - C_m(x) * U_r * \cos\alpha \quad 5.2.1$$

donde V_e es la velocidad local de entrada de aire, C_m es la concentración media local, U_r es la velocidad límite de ascenso de las burbujas en la región de flujo gradualmente variado y α es la pendiente del canal. Utilizando de la ecuación 5.2.1 en la región del escurrimiento uniforme se convierte en:

$$0 = \overline{V_e} - C_e * U_r * \cos\alpha \quad 5.2.2$$

donde C_e es la concentración media en flujo uniforme, V_e es la velocidad local de entrada del aire. Sustituyendo la ecuación 5.2.2, de condiciones de flujo uniforme, la ecuación de conservación de masa para el aire se reescribe como:

$$\frac{d}{dx} q_{aire} = (V_e(x) - \overline{V_e}) + (C_e - C_m) * U_r * \cos\alpha \quad 5.2.3$$

Considerando la hipótesis H1, se puede despreciar el primer término del lado derecho de la ecuación ya que la velocidad de entrada es pequeña con lo que:

$$\frac{d}{dx} q_{aire} = C_e * U_r * \cos\alpha - C_m * U_r * \cos\alpha \quad 5.2.4$$

La forma de esta ecuación indica que, para una concentración media de aire C_m inferior a la concentración de equilibrio C_e , el escurrimiento es aireado. Por el contrario, cuando la concentración media de aire es superior a la concentración de equilibrio, el escurrimiento es desaireado.

Suponiendo que el perfil de velocidades en una sección es constante e igual a la velocidad media, de la ecuación 4.1.3 se obtiene el valor de q_{aire} en función q_{agua} como:

$$C_m = \frac{q_{aire}}{q_{aire} + q_{agua}}$$

Despejando el q_{aire} de C_m queda:

$$q_{aire} = \frac{C_m}{1 - C_m} * q_{agua} \quad 5.2.5$$

Sustituyendo la ecuación 5.2.5 en la 5.2.4 para tener una aproximación, la ecuación de conservación de masa para la fase de aire se convertida en:

$$\frac{d}{dx} \frac{C_m}{1 - C_m} * q_{agua} = (C_e - C_m) * U_r * \cos\alpha \quad 5.2.6$$

Derivando con respecto a X y separando variables:

$$\frac{\frac{d}{dx} C_m * (1 - C_m) - \frac{d}{dx} (1 - C_m) * C_m}{(1 - C_m)^2} = (C_e - C_m) * \frac{U_r * \cos \alpha}{q_{agua}}$$

Agrupando términos:

$$\frac{d}{dx} C_m - C_m \frac{d}{dx} C_m + C_m \frac{d}{dx} C_m = (C_e - C_m) * (1 - C_m)^2 * \frac{U_r * \cos \alpha}{q_{agua}}$$

separando variables:

$$\frac{d}{dx} C_m = \frac{U_r * \cos \alpha}{q_{agua}} * (C_e - C_m) * (1 - C_m)^2 \quad 5.2.7$$

integrando:

$$\int \frac{dC_m}{(C_e - C_m) * (1 - C_m)^2} = \frac{U_r * \cos \alpha}{q_{agua}} \int dx$$

sustituyendo $K = \frac{U_r * \cos \alpha}{q_{agua}}$

quedando la ecuación como:

$$\frac{1}{(1 - C_e)^2} * \ln \left[\frac{1 - C_m}{C_e - C_m} \right] - \frac{1}{(1 - C_e) * (1 - C_m)} = (K * x) + K_0 \quad 5.2.8$$

donde K_0 es la constante de integración, tomando como condiciones iniciales el punto donde empieza la corriente hacia abajo después del aireador como $C_m = C_0$ y $X = 0$, sustituyendo en la ecuación 5.2.8:

$$K_0 = \frac{1}{(1 - C_e)^2} * \left[\frac{1}{(1 - C_e)} * \ln \left[\frac{1 - C_0}{C_e - C_0} \right] - \frac{1}{(1 - C_0)} \right]$$

Sustituyendo el valor de K_0 en la ecuación 5.2.8 para tener el valor de C_m :

$$K * x + \frac{1}{(1-Ce)^2} * \left(\text{Ln} \left[\frac{1-C_s}{Ce-C_s} \right] - \text{Ln} \left[\frac{1-C_m}{Ce-C_m} \right] \right) + \frac{1}{(1-Ce)} * \left(\frac{1}{(1-C_m)} - \frac{1}{(1-C_s)} \right)$$

$$K * x + \frac{1}{(1-Ce)^2} * \text{Ln} \left[\frac{\frac{1-C_s}{Ce-C_s}}{\frac{1-C_m}{Ce-C_m}} \right] + \frac{1}{(1-Ce)} * \left(\frac{1}{(1-C_m)} - \frac{1}{(1-C_s)} \right) = 0$$

Para poder resolver esta ecuación se utilizaron métodos numéricos, realizándose así dos programas de cálculo, ya que el efecto centrífugo afecta al modelo experimental del vertedor de la presa HUITES, lo cual no sucede para el modelo experimental del vertedor de la presa AGUMILPA.

Para el caso del modelo experimental del vertedor de la presa Huites se realizaron los cálculos para los tres diferentes gastos y para cada sección de las mediciones experimentales. Por la curvatura del vertedor, el cálculo se hizo por tramos entre las secciones de medición. Así, se tomaron las condiciones de la sección A1 como iniciales y se calculó hasta B1. Después se tomó como sección inicial B1 para calcular hasta C2, así sucesivamente para las demás secciones aguas abajo del primer aireador. Iniciando en A2 el procedimiento se repite para los tramos aguas abajo del segundo aireador.

Para obtener el valor de Ce se realizó una correlación entre el valor de Ce utilizado por Chanson[7] para escurrimiento uniformes y el Cm medido en el modelo como:

$$Ce = \frac{Ce(\text{Chanson})}{5.7}$$

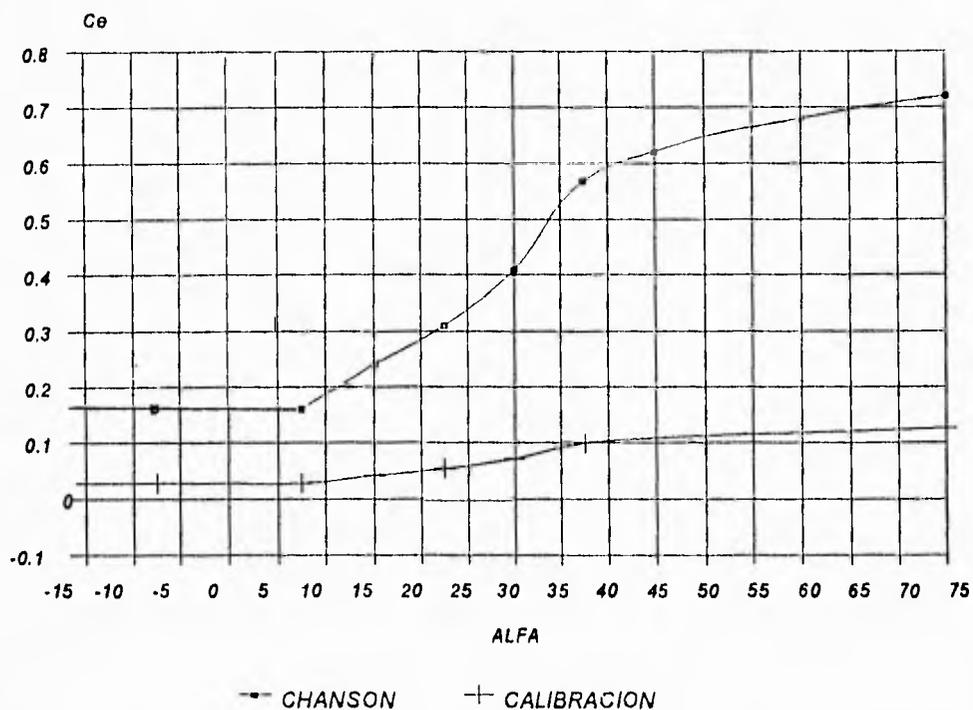
El factor 5.7 se obtuvo del cociente entre el valor de Ce obtenido de Chanson para un ángulo de 39.16 entre el promedio del valor de Cm para los tres gastos en el punto A0.

$$\overline{Cm} = \frac{Cm_{500} + Cm_{1000} + Cm_{1420}}{3} = 10.14\%$$

$$\text{Factor} = \frac{Ce(\text{Chanson para } \alpha = 39.16^\circ)}{\overline{Cm}} = \frac{58.073}{10.14} = 5.7$$

Para ángulos menores de 7° se tomó el valor de Ce constante e igual al obtenido para ángulos de 7°. En la siguiente gráfica se ilustran las curvas de CHANSON con la de calibración. Los valores de Ce para el cálculo se obtuvieron de la gráfica por medio del ángulo que caracteriza al punto, estos se encuentran en las tablas de resultados y en la tabla de posición de los puntos en la unidad 4, así como el ángulo.

CURVAS DE CALIBRACION DE C_e



El cálculo de U_r se realizó de la manera descrita en la unidad 3. Para las demás variables del cálculo de concentración de aire se tomó el promedio de los puntos experimentales, de la margen izquierda y derecha, los cuales se muestran en la siguientes tablas:

PROMEDIO DE MARGENES GASTO: 500 l/s							
PUNTO	Y.9	C_m	C^*	β	Y_{eq}	V	Fr
A0	5.367	11.420	12.892	18.5	4.754	6.115	8.955
LA1							
A1	5.228	25.100	33.511	18.5	3.915	7.424	11.980
B1	5.005	22.840	29.601	18.5	3.862	7.527	12.230
C1	4.368	16.414	19.637	18.5	3.651	7.963	13.306
D1	3.725	15.378	18.173	18.5	3.152	9.222	16.584
LA2							
A2	5.045	36.521	57.531	40	3.203	9.077	16.194
B2	5.168	25.642	34.485	40	3.842	7.565	12.322
C2	4.083	22.029	28.253	40	3.184	9.131	16.339
D2	4.965	13.994	16.270	40	4.270	6.808	10.518

PROMEDIO DE MARGENES GASTO: 1000 l/s							
PUNTO	Y.9	Cm	C*	β	Yeq	V	Fr
A0	9.742	8.863	9.725	7.6	8.878	6.549	7.017
LA1							
A1	9.271	17.612	21.376	7.6	7.639	7.611	8.793
B1	9.047	16.677	20.014	7.6	7.538	7.713	8.969
C1	8.271	14.495	16.952	7.6	7.072	8.221	9.870
D1	6.779	11.990	13.623	7.6	5.966	9.746	12.739
LA2							
A2	9.128	29.872	42.596	20	6.401	9.083	11.462
B2	10.056	25.695	34.580	20	7.472	7.781	9.089
C2	8.495	20.445	25.699	20	6.758	8.603	10.566
D2	7.619	15.857	18.845	20	6.410	9.069	11.437

PROMEDIO DE MARGENES GASTO: 1420 l/s							
PUNTO	Y.9	Cm	C*	β	Yeq	V	Fr
A0	12.575	10.148	11.294	5.075	11.299	7.317	6.950
LA1							
A1	11.433	16.330	19.517	5.075	9.566	8.643	8.922
B1	10.990	14.430	16.863	5.075	9.404	8.792	9.154
C1	9.612	13.390	15.459	5.075	8.325	9.931	10.989
D1	10.170	10.635	11.901	5.075	9.088	9.097	9.634
LA2							
A2	12.245	24.740	32.873	12.66	9.216	8.971	9.435
B2	11.970	22.435	28.924	12.66	9.285	8.905	9.330
C2	10.500	17.060	20.569	12.66	8.709	9.493	10.271
D2	9.201	14.190	16.537	12.66	7.895	10.472	11.899

Con estos datos se alimentó el programa de cálculo, cuyo listado se encuentra en el Anexo 1. Los resultados de este cálculo están en las siguientes tablas.

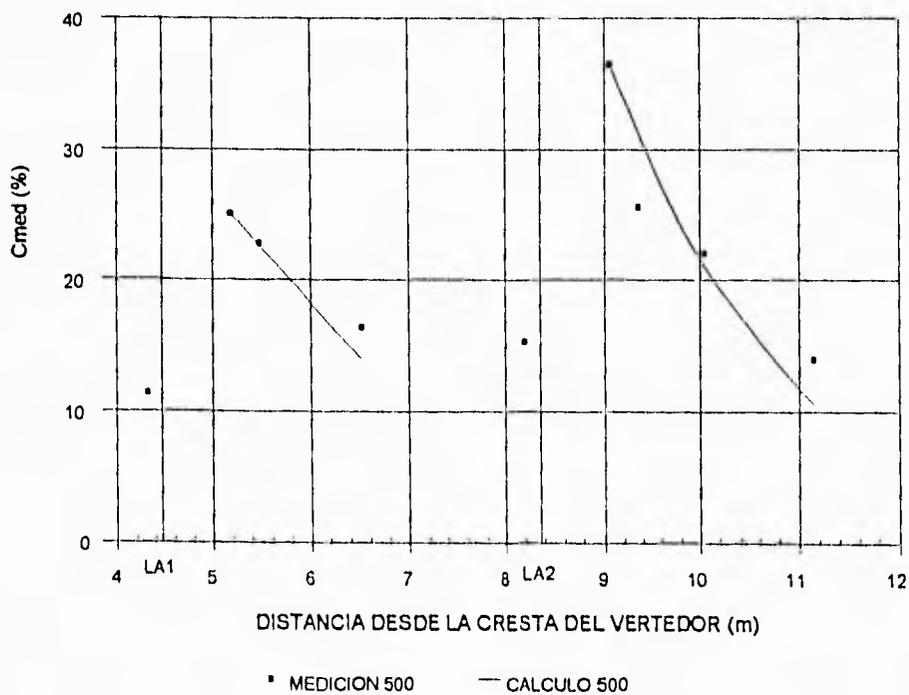
RESULTADO DE CALCULO PARA GASTO 500 l/s								
PUNTO	Yeq	Cm	V	Ce	C.	Cm CAL	V CAL	Ur
A0	4.754	11.420	6.115					
LA1								
A1	3.915	25.100	7.424			25.100	7.424	
B1	3.862	22.840	7.527	.08	25.100	22.53	7.527	.3176
C1	3.651	16.414	7.963	.06	22.53	14.02	7.962	.3316
D1	3.152	15.378	9.222	.04				
LA2								
A2	3.203	36.521	9.077	.028		36.521	9.077	
B2	3.842	25.642	7.565	.028	36.521	31.870	7.566	.3326
C2	3.184	22.029	9.131	.028	31.870	21.130	9.129	.3627
D2	4.270	13.994	6.808	.028	21.130	10.560	6.8079	.3187

RESULTADO DE CALCULO PARA GASTO 1000 l/s								
PUNTO	Yeq	Cm	V	Ce	C.	Cm CAL	V CAL	Ur
A0	8.878	8.863	6.549					
LA1								
A1	7.693	17.612	7.611			17.612	7.611	
B1	7.538	16.677	7.713	.08	17.612	16.720	7.712	.3211
C1	7.072	14.495	8.221	.06	16.720	13.220	8.221	.3366
D1	5.966	11.990	9.746	.04	13.220	8.000	9.745	.3745
LA2								
A2	6.401	29.872	9.083	.028		29.872	9.083	
B2	7.472	25.695	7.781	.028	29.872	27.590	7.780	.3365
C2	6.758	20.445	8.603	.028	27.590	22.45	8.603	.3523
D2	6.410	15.857	9.069	.028	22.45	15.370	9.070	.3608

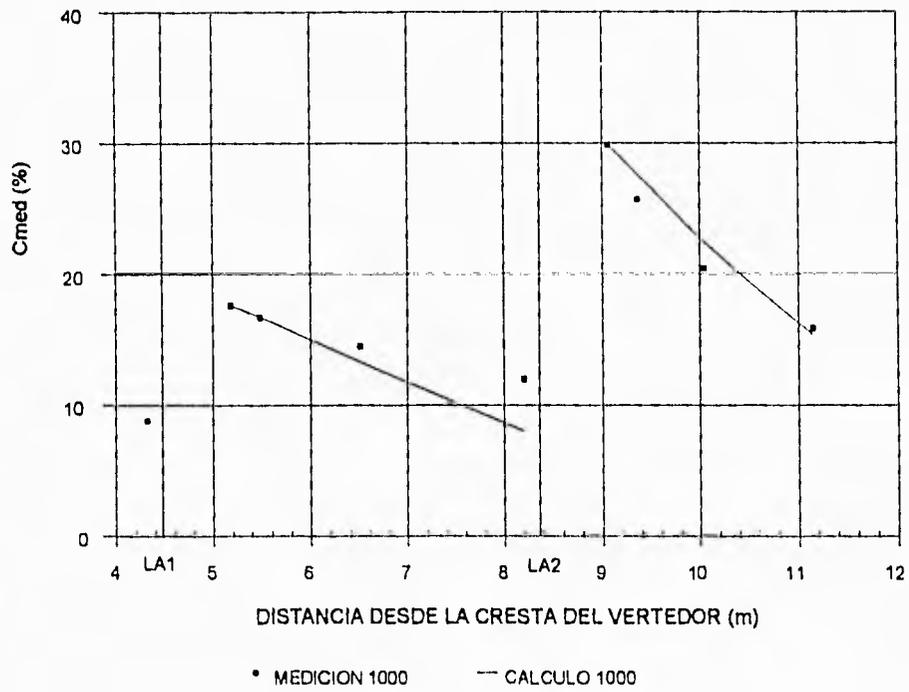
RESULTADO DE CALCULO PARA GASTO 1420 l/s								
PUNTO	Yeq	Cm	V	Ce	C.	Cm CAL	V CAL	Ur
A0	11.299	10.148	7.317					
LA1								
A1	9.566	16.330	8.643			16.330	8.643	
B1	9.404	14.430	8.792	.08	16.330	15.72	8.779	.3420
C1	8.325	13.390	9.931	.06	15.72	13.130	9.916	.3711
D1	9.088	10.635	9.097	.04	13.130	9.170	9.089	.3596
LA2								
A2	9.216	24.740	8.971	.028		24.74	8.971	
B2	9.285	22.435	8.905	.028	24.74	23.15	8.898	.3577
C2	8.709	17.060	9.493	.028	23.15	19.660	9.479	.3698
D2	7.895	14.190	10.472	.028	19.660	14.63	10.459	.3895

Las siguientes figuras muestra los resultados en forma gráfica

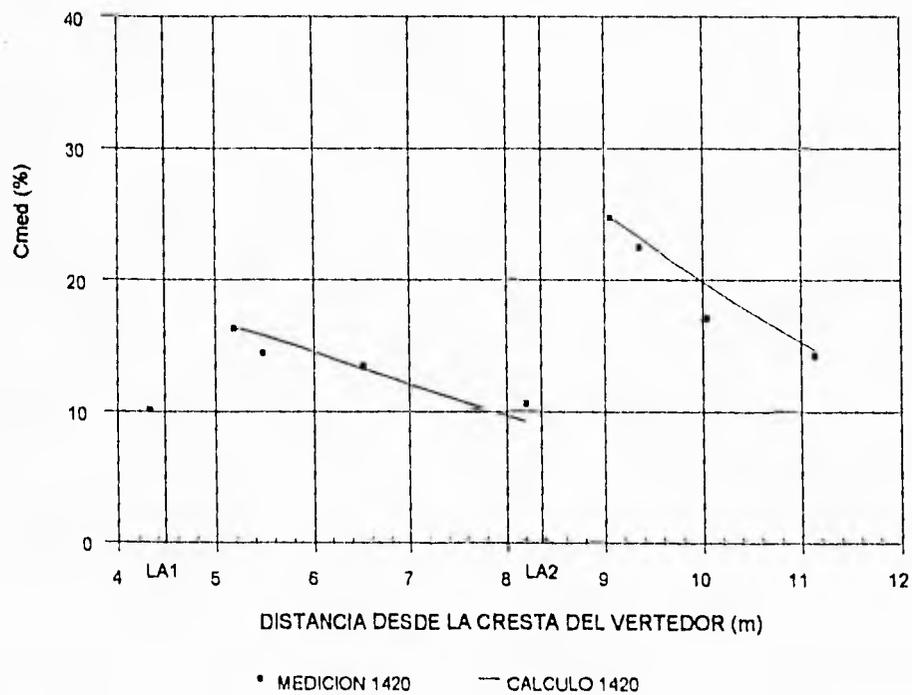
CONCENTRACIONES PARA Q= 500 l/s
PROMEDIO DE MARGENES



CONCENTRACIONES PARA Q= 1000 l/s
 PROMEDIO DE MARGENES



CONCENTRACIONES PARA Q= 1420 l/s
 PROMEDIO DE MARGENES



Para el caso del modelo experimental del vertedor de la presa Aguamilpa se realizaron los cálculos para el gasto de 101 l/s y 304.3 l/s. Los cálculos se realizaron de la misma forma que en el caso del modelo experimental de la presa Huites, pero en este caso se tomó como condiciones iniciales ($x=0$) y C , el valor de C_m del punto GP3 para calcular el punto GP4, y así sucesivamente para los demás puntos aguas abajo del aireador.

Para obtener el valor de C_e se realizó una correlación semejante al caso de Huites, entre el valor de C_e utilizado por Chanson[7] para escurrimiento uniformes y el C_m medido en el modelo como:

$$C_e = \frac{C_e(\text{Chanson})}{2.1}$$

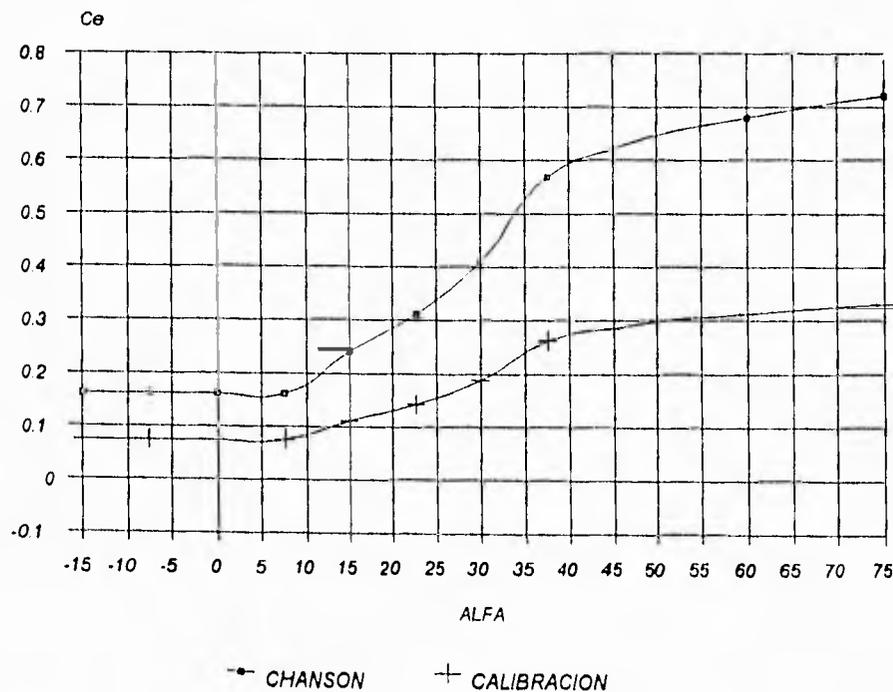
El factor 2.1 se obtiene del cociente entre el valor de C_e obtenido de Chanson para un ángulo de 7.5 entre el promedio del valor de C_m para los puntos GP0, GP1, GP2.

$$\overline{C_m} = \frac{C_{m_{GP0}} + C_{m_{GP1}} + C_{m_{GP2}}}{3} = 7.4\%$$

$$\text{Factor} = \frac{C_e(\text{Chanson para } \alpha = 7.5^\circ)}{\overline{C_m}} = \frac{16.1}{7.4} = 2.$$

Como el vertedor es recto con ángulo constante e igual a 20° , se tomo el valor de C_e constante para todos los puntos. En la siguiente gráfica se ilustran las curvas de CHANSON con la de calibración.

CURVAS DE CALIBRACION DE C_e
MODELO DEL VERTEDOR DE AGUAMILPA



El cálculo de U_r se realizó de la manera descrita en la unidad 3. Para las demás variables del cálculo de concentración de aire se tomaron los datos de las secciones experimentales, los cuales se muestran en las siguientes tablas:

CENTRO GASTO: 101 l/s							
PUNTO	Y.9	Cm	C*	β	Yeq	V	Fr
GP0	3.100	10.340	11.532	12.23	2.779	5.191	9.941
GP1	3.157	10.570	11.819	12.23	2.823	5.111	9.711
GP2	3.120	10.500	11.732	12.23	2.792	5.167	9.872
LA							
GP3	2.950	32.820	48.854	12.23	1.982	7.281	16.51
GP4	3.118	35.400	54.799	12.23	2.014	7.163	16.11
GP5	2.761	24.150	31.839	12.23	2.094	6.890	15.20
GP6	2.940	22.950	29.786	12.23	2.265	6.369	13.51
GP7	2.650	14.400	16.822	12.23	2.268	6.361	13.48
GP8	2.630	19.740	24.595	12.23	2.111	6.835	15.02
GP9	2.470	17.240	20.831	12.23	2.044	7.058	15.76

CENTRO GASTO: 304.3 l/s							
PUNTO	Y.9	Cm	C*	β	Yeq	V	Fr
GP0	8.132	4.890	5.141	8.12	7.734	5.621	6.453
GP1	7.920	7.180	7.735	8.12	7.351	5.913	6.963
GP2	7.900	7.090	7.631	8.12	7.340	5.923	6.980
LA							
GP3	9.052	41.000	69.492	8.12	5.341	8.140	11.245
GP4	8.567	36.400	57.233	8.12	5.449	7.978	10.913
GP5	8.380	28.620	40.095	8.12	5.982	7.267	9.487
GP6	7.690	21.300	27.065	8.12	6.052	7.183	9.322
GP7	7.110	14.370	16.782	8.12	6.088	7.140	9.239
GP8	6.800	10.900	12.233	8.12	6.059	7.175	9.307
GP9	6.610	11.300	12.740	8.12	5.863	7.414	9.776

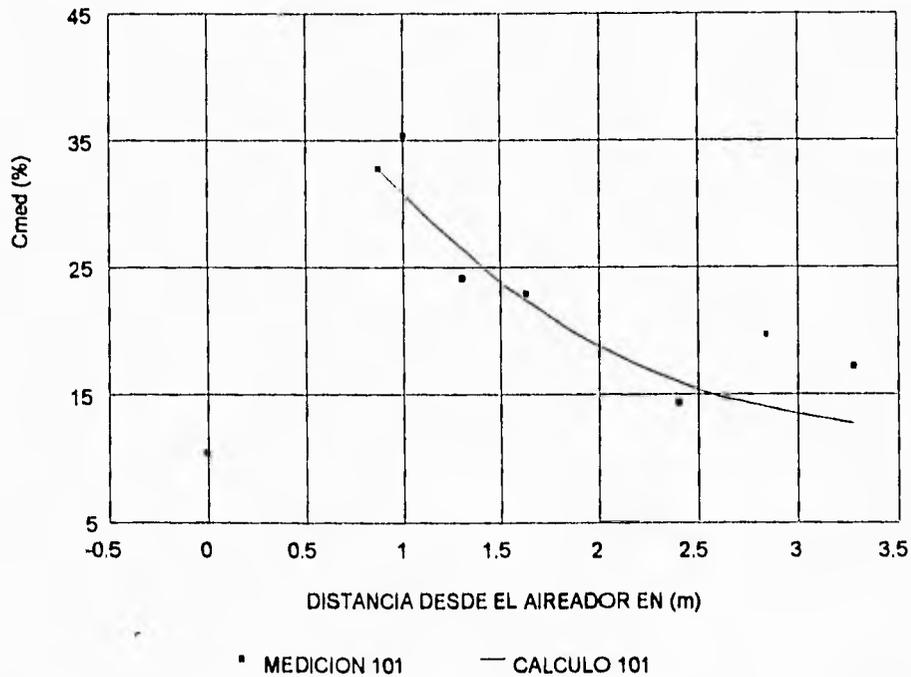
Con estos datos se alimentó el programa de cálculo, cuyo listado se encuentra en el Anexo 1. Los resultados de este cálculo están en las siguientes tablas.

RESULTADO DE CALCULO PARA AGUAMILPA								
GASTO 101 l/s								
PUNTO	Yeq	Cm	V	Ce	C.	Cm CAL	V CAL	Ur
GP0	2.779	10.340	5.191	.07				
GP1	2.823	10.570	5.111	.07				
GP2	2.792	10.500	5.167	.07				
LA								
GP3	1.982	32.820	7.281	.11		32.820		
GP4	2.014	35.400	7.163	.11	32.820	30.800	7.164	.2477
GP5	2.094	24.150	6.890	.11	30.800	26.470	6.890	.2477
GP6	2.265	22.950	6.369	.11	26.470	22.400	6.370	.2477
GP7	2.268	14.400	6.361	.11	22.400	16.030	5.380	.2477
GP8	2.111	19.740	6.835	.11	16.030	14.010	6.835	.2477
GP9	2.044	17.240	7.058	.11	14.010	12.760	7.058	.2477

RESULTADO DE CALCULO PARA AGUAMILPA								
GASTO 304.3 l/s								
PUNTO	Yeq	Cm	V	Ce	C.	Cm CAL	V CAL	Ur
GP0	7.734	4.890	5.621	.07				
GP1	7.351	7.180	5.913	.07				
GP2	7.340	7.090	5.923	.07				
LA								
GP3	5.341	41.000	8.140	.11		41.000		
GP4	5.449	36.400	7.978	.11	41.000	38.000	7.977	1.021
GP5	5.982	28.620	7.267	.11	38.000	31.316	7.267	1.021
GP6	6.052	21.300	7.183	.11	31.316	24.960	7.182	1.021
GP7	6.088	14.370	7.140	.11	24.960	15.650	7.140	1.021
GP8	6.059	10.900	7.175	.11	15.650	13.280	7.174	1.021
GP9	5.863	11.300	7.414	.11	13.280	12.085	7.414	1.021

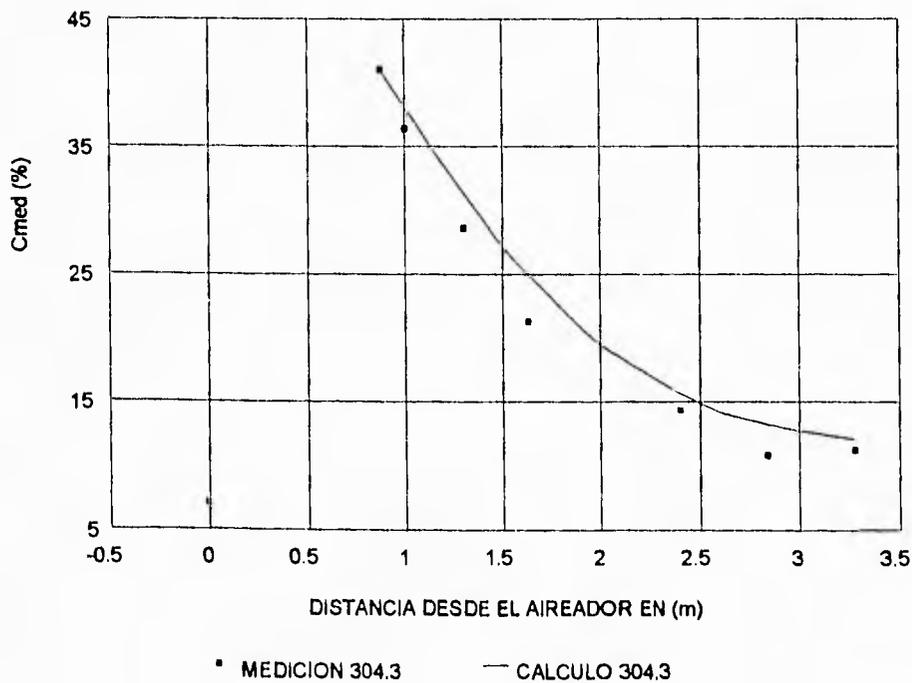
Las siguientes figuras muestran los resultados en forma gráfica

CONCENTRACIONES PARA Q= 101 l/s
AGUAMILPA



ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

CONCENTRACIONES PARA Q= 304.3 l/s
AGUAMILPA



La extensión del trabajo de Chanson aplicado a los modelos experimentales de los vertedores de las presas Huites y Aguamilpa permitió desarrollar una ecuación que se resuelve numéricamente. Esta ecuación representa la permanencia de aire en el flujo de agua a lo largo del vertedor, dando una estimación de la concentración media de aire que se tiene en diferentes secciones del vertedor.

Este modelo teórico se basa en varios parámetros, pero los más importantes son: el diámetro de burbuja d_B , el coeficiente de arrastre (forma) C_D y la concentración media en flujo uniforme C_e . Conociendo bien los parámetros antes mencionados se puede tener una mejor estimación de la concentración media de aire en las diferentes secciones del vertedor.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA ESPACIAMIENTO DE AIREADORES.

Cuando la aireación natural del flujo a través de la superficie libre es insuficiente, o la erosión por cavitación pueda desarrollarse aguas arriba del punto de inicio de entrada de aire, será necesaria la instalación de un aireador, que permita el ingreso de aire al flujo para protección de la plantilla en cierta distancia aguas abajo de ese aireador.

Para el caso de un canal de pendiente débil (tal es el caso del modelo experimental del vertedor de la presa Aguamilpa), la concentración media de aire decae rápidamente dejando sin protección alguna la plantilla del vertedor, lo cual indica la necesidad de colocar un aireador aguas arriba de la zona crítica para seguir manteniendo una concentración en la plantilla C_w mayor que el 5%.

Para un canal de pendiente fuerte (semejante al modelo experimental del vertedor de la presa Huites), convendrá localizar el aireador lo más aguas arriba posible, de tal manera que se pueda combinar la aireación artificial del flujo con la aireación natural aguas abajo del aireador, manteniendo una C_w mayor que el 5%!

En el modelo experimental del vertedor de la presa Huites se observó que para gastos de agua pequeños se introduce mayor cantidad de aire por las torres de aireación que para gastos grandes, pero la concentración media no decae tan rápido en gastos grandes como se da en gastos pequeños.

Como las mediciones se realizaron para dos márgenes, se observó que existe una ligera diferencia en el valor de la concentración media de aire para una misma sección, pero este no es muy significativo. Para fines de cálculo se realizó un promedio de los dos márgenes, y con éste se realizaron los cálculos de la siguiente unidad.

En el modelo experimental del vertedor de la presa Aguamilpa se observó que para gastos de agua pequeños se introduce menor cantidad de aire por las torres de aireación que para gasto grandes, pero la concentración media no decae tan rápido en gasto pequeños como sucede en gasto grandes.

No existe una manera de comparación entre los dos modelos experimentales ya que son diferentes geometrías y diferentes terminados, pero se observó que para el modelo experimental Aguamilpa se introduce más gasto de aire por las torres de aireación que para el modelo experimental Huites, pero la concentración media no decae tan rápido en Huites como en Aguamilpa

Los resultados experimentales de los modelos mostraron que la introducción de aire por la superficie libre depende de la rugosidad de la plantilla del vertedor, es decir si la rugosidad es incrementada la introducción de aire aumenta por efecto difusivo turbulento, además la concentración media de aire no decae tan rápido.

La extensión del trabajo de Chanson aplicado a los modelos experimentales de los vertedores de las presas Huites y Aguamilpa permitió desarrollar una ecuación que se resuelve numéricamente. Esta ecuación representa la permanencia de aire en el flujo de agua a lo largo del vertedor, dando una estimación de la concentración media de aire que se tiene en diferentes secciones del vertedor. La aplicación de la ecuación a los modelos experimentales dió resultados favorables.

Los principales parámetros que se deben tener bien caracterizados para representar el desarrollo de la concentración media a lo largo del vertedor son: el diámetro de burbuja d_B , el coeficiente de arrastre (forma) C_D y la concentración media en flujo uniforme C_e . Los dos primeros afecta en la caracterización de la velocidad terminal U_r , ya que si la velocidad es alta las burbujas de aire tienden a salir rápidamente del agua. El tercero es para tener una mejor estimación del valor de la concentración media en el flujo.

EL modelo teórico que se estudió en esta tesis fue referente a la permanencia de aire en el flujo de agua, basado en función de concentraciones medias C_m de aire, en lugar de concentraciones en la plantilla C_w , pero hace falta tener la correlación de C_w en función de C_m que se dará en estudios posteriores.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Chanson, H. "**Study of air entrainment and aereation devices**" Journal of hydraulic research Vol. 27, 1989, No. 3
- [2] Chanson, H. "**Study of air demand on spillway aerator**" Journal of fluids engineering, september 1990, Vol. 112
- [3] Torres Herrera, F. "**Obras hidraulicas**" Ed. Limusa, México, 1987.
- [4] Wood, Ian R. "**Air Entrainment in free-surface flows**" pag 85-88 IAHR Hydraulic structures design manual, 1991.
- [5] Echavez, Gabriel "**Cavitación en vertedores**" Instituto de ingeniería UNAM, Nò. 415, Feb. 1979
- [6] Chanson, H "**Aeration of free jet above a spillway**" Journal of hydraulic research Vol 29, 1991 No 5.
- [7] Chanson, H "**Flow downstream of an aerator - aerator spacing**" Journal of hydraulic research Vol 27, 1989, No 4.
- [8] Straub, L. G. and Anderson, A. G. "**Experiments on Self - Aerated flow in open channel**" Journal of hydraulic division ., ASCE, Vol. 84, HY7, 1958.
- [9] Cain, P. and Wood, Ian R. "**Measurements of Self - Arated flow on a spillway**" Journal of hydraulics division ., ASCE,. Vol 107 No HY11, 1981.
- [10] Falvey Henry T. "**Air- water flow in hydraulic structures**" A water resources technical publication, Engineering Monograph No 41, 1980, Denver Colorado U.S.A
- [11] Binder, R. C. "**Fluid Mechanics**" Ed. Prentice-Hall, INC. London, 1987.
- [12] Chow, Ven Te "**Open - channel hydraulics**" Ed. McGraw - Hill. Japan, 1983.
- [13] White, Frank M. "**Mecanica de fluidos**" Ed. McGraw - Hill. México, 1993.
- [14] Streeter, WYLIE. "**Mecanica de los fluidos**" De McGraw - Hill México sexta edició, 1983.
- [15] Henderson . "**Open Channel flow**" Mac Millan Series in civil Engineering. New York, 1966
- [16] Golzé, Alfred. "**Handbook of Dam engineering**" Ed. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1977

- [17] Linsley, R.; Franzini, J. **"Ingeniería de los recursos hidraulicos"** Ed. CECSA, México, 1964.
- [18] Comisión Federal de Electricidad **"Manual de obras civiles"** México, 1969.
- [19] Haberman W. L. and Morton R. K. **"An experimental study bubbles of moving in liquids."** Proc. ASCE vol 80, No 387, 1954.
- [20] Levich, V. G. **"Physico - chemical hydrodynamics"** Englewood Cliffs, N. Y., Prentice-Hall, 1962, pp 395-471.
- [21] Rao, N. S., Gangadharaiah, T., **"Self-Aerated Flow Characteristics in Wall Region"** Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol 97, No 9, September 1971.

ANEXO 1

LISTADO DE PROGRAMAS

```

CLS
PRINT "UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO"
PRINT "  FACULTAD DE INGENIERÍA  "
PRINT "    D.I.M.E.            "
PRINT "PROGRAMA PARA CALCULAR LA CONCENTRACIÓN MEDIA DE"
PRINT "AIRE EN EL MODELO EXPERIMENTAL VERTEDOR DE HUITES"
1 INPUT "DAME EL DIÁMETRO DE BURBUJA"; D
  INPUT "DAME EL GASTO"; Q
  INPUT "DAME EL VALOR DE C*= "; ci
  INPUT "DAME EL VALOR DE LA DISTANCIA x="; x
5 INPUT "DAME EL TIRANTE EQUIVALENTE"; Y
  INPUT "DAME EL VALOR DE Ce= "; ce
  INPUT "DAME EL VALOR DEL ÁNGULO alfa "; alfg
  INPUT "DAME EL VALOR DE CD"; C
  LET dc = .001
  qw = Q / 1.72
  alfr = alfg * 3.1416 / 180
  V = Q/(1.72*Y)
  ur = (87.2*(D/C)*cos(ALFR)*(1-(.9751/1000))+.159*(D/C)*V^2)^.5
  dcm = dc * ci
  k = ur * COS(alf) / qw
  cm = ci
  n = 0
10  cmd = cm + dc * cm
  dfd = k * x + 1 / ((1 - ce) ^ 2) * LOG((1 - ci) * (ce - cmd) / ((ce - ci) * (1 - cmd))) + (1 /
  (1 - ce)) * (1 / (1 - cmd) - 1 / (1 - ci))
  IF cm = 0 GOTO 60
  f = k * x + 1 / ((1 - ce) ^ 2) * LOG((1 - ci) * (ce - cm) / ((ce - ci) * (1 - cm))) + (1 / (1 -
  ce)) * (1 / (1 - cm) - 1 / (1 - ci))
  dfdc = (dfd - f) / (dc * cm)
  cml = cm - f / dfdc
  cm = cml
PRINT "n= ";n
  n = n + 1
  IF n > 1000 GOTO 60
  IF ABS(f) < .0001 GOTO 30
  GOTO 10
30 PRINT "EL VALOR DE Cm= "; cm
  PRINT "EL VALOR DE Ur= "; ur
  PRINT "EL VALOR DE V= "; V
  PRINT "SI NO DESEA OTRO CALCULO DEFINA LA DISTANCIA COMO x=0
  "
  INPUT "DAME EL VALOR DE LA NUEVA DISTANCIA x= "; x
  ci = cm
  IF x > 0 GOTO 5
60 END

```

CLS

```
PRINT "UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO"
PRINT "  FACULTAD DE INGENIERÍA    "
PRINT "    D.I.M.E.                "
PRINT "PROGRAMA PARA CALCULAR LA CONCENTRACIÓN MEDIA DE"
PRINT "AIRE EN MODELO EXPERIMENTAL VERTEDOR AGUAMILPA"
1 INPUT "DAME EL DIÁMETRO DE BURBUJA"; D
INPUT "DAME EL GASTO"; Q
INPUT "DAME EL VALOR DE C*= "; ci
INPUT "DAME EL VALOR DE LA DISTANCIA x="; x
INPUT "DAME EL VALOR DE Ce= "; ce
INPUT "DAME EL VALOR DEL ÁNGULO alfa "; alfg
5 INPUT "DAME EL TIRANTE EQUIVALENTE"; Y
INPUT "DAME EL VALOR DE CD "; C
  LET dc = .001
  qw = Q / .7
  alfr = alfg * 3.1416 / 180
  V = Q / (.7 * Y)
  ur = (87.2 * (D / C) * cos(ALFR) * (1 - (.9751 / 1000))) ^ .5
  dcm = dc * ci
  k = ur * COS(alfr) / qw
  cm = ci
  n = 0
10  cmd = cm + dc * cm
  dfd = k * x + 1 / ((1 - ce) ^ 2) * LOG((1 - ci) * (ce - cmd) / ((ce - ci) * (1 - cmd))) + (1 /
  (1 - ce)) * (1 / (1 - cmd) - 1 / (1 - ci))
  IF cm = 0 GOTO 60
  f = k * x + 1 / ((1 - ce) ^ 2) * LOG((1 - ci) * (ce - cm) / ((ce - ci) * (1 - cm))) + (1 / (1 -
  ce)) * (1 / (1 - cm) - 1 / (1 - ci))
  dfdc = (dfd - f) / (dc * cm)
  cm1 = cm - f / dfdc
  cm = cm1
PRINT "n="; n
  n = n + 1
IF n > 1000 GOTO 60
  IF ABS(f) < .0001 GOTO 30
GOTO 10
30 PRINT "EL VALOR DE Cm= "; cm
PRINT "EL VALOR DE Ur= "; ur
PRINT "EL VALOR DE V= "; V
PRINT "SI NO DESEA OTRO CALCULO DEFINA LA DISTANCIA COMO x=0"
INPUT "DAME EL VALOR DE LA NUEVA DISTANCIA x= "; x
  ci = cm
  IF x > 0 GOTO 5
60 END
```