

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ANÁLISIS DEL REQUERIMIENTO DE AIREACIÓN FORZADA EN
RÁPIDAS Y ELABORACIÓN DE UNA HOJA DE CÁLCULO PARA
EL DISEÑO DE AIREADOR SELECCIONADO**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MÁSTER EN INGENIERÍA
DE RECURSOS HÍDRICOS MENCIÓN DISEÑO DE PROYECTOS
HIDRÁULICOS**

JENNY MARITZA CARRERA CASA
jen.carrera@gmail.com

DIRECTORA: ING. XIMENA DEL ROCÍO HIDALGO BUSTAMANTE. MSc
ximena.hidalgob@gmail.com

Quito, Marzo 2016

DECLARACIÓN

Yo Jenny Maritza Carrera Casa, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Jenny Carrera C.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jenny Maritza Carrera Casa, bajo mi supervisión.

Ing. Ximena Hidalgo
DIRECTORA DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A Dios por sus bendiciones, por permitirme superar obstáculos para fortalecerme y poder cumplir con éxito esta Tesis.

A mi familia. A mi esposo Santiago por tu amor, confianza y apoyo en todo momento por alentarme a continuar, por acompañarme en cada desvelo y ser mi compañero de vida; A mi hijo Santiago Andrés, gracias por llenarme de tus fuercitas, tus sonrisas y tus besos, eres parte de esta meta cumplida. Gracias mis amores por ser pacientes y comprensivos, somos un gran equipo.

A mis padres Mario e Hilda, gracias por estar siempre junto a mí, son un valioso ejemplo de bondad, apoyo y constancia, por estar pendientes de cada paso con su mano extendida.

A Ing. Ximena Hidalgo y Dr. Marco Castro, por compartir sus experiencias, sus conocimientos y por el apoyo recibido en la dirección de esta Tesis.

Jenny Carrera Casa

DEDICATORIA

Con todo el amor para mi esposo y mi hijo. El tiempo de Dios es perfecto.

Jenny

CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
DEDICATORIA.....	V
CONTENIDO.....	VI
INDICE DE FIGURAS	X
INDICE DE TABLAS	XIV
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	XVI
SIMBOLOGÍA.....	XVII
RESUMEN	XX
PRESENTACIÓN	XXI
CAPÍTULO 1 GENERALIDADES.....	1
1.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	2
1.1.1 EFECTOS DE LA CAVITACIÓN.....	3
1.1.2 INVESTIGACIONES SOBRE AIREADORES HASTA 1990	4
1.2 CONCEPTOS BÁSICOS	5
1.2.1 CAPA LÍMITE.....	5
1.2.2 FLUJO EN CANALES.....	6
1.2.3 RÁPIDA	8
1.2.4 CONDICIONES HIDRODINÁMICAS EN UN CANAL DE PENDIENTE FUERTE	16
1.2.5 CAVITACIÓN.....	20
1.2.6 CRITERIOS PARA DETERMINAR POSIBLE CAVITACIÓN	22
1.2.7 LOS EFECTOS DEL AIRE EN LOS DAÑOS POR CAVITACIÓN ..	27
1.2.8 PÉRDIDAS DE HORMIGÓN CAUSADO POR LA CAVITACIÓN ...	28
1.2.9 AIREADOR.....	30
1.2.10 AIREACIÓN FORZADA.....	30
1.3 OBJETIVOS, ALCANCE, LIMITACIONES Y JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS	31
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	31
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	31

1.3.3	ALCANCE.....	31
1.3.4	LIMITACIONES.....	32
1.3.5	JUSTIFICACIÓN.....	33
CAPÍTULO 2 ANÁLISIS DEL REQUERIMIENTO DE AIREACIÓN FORZADA		34
2.1	ANÁLISIS DE CAVITACIÓN.....	34
2.2	ANÁLISIS DE CONCENTRACIÓN DE AIRE.....	34
2.2.1	DIVISIÓN DEL FLUJO EN REGIONES EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE AIRE.....	37
2.2.2	ANÁLISIS DE LA AIREACIÓN.....	38
2.3	INCORPORACIÓN DE AIRE EN EL FLUJO DE CANAL ABIERTO.....	38
2.4	DESAIREACIÓN.....	40
2.5	FUNCIONAMIENTO DEL AIREADOR.....	41
2.6	ANÁLISIS DE REPORTES TÉCNICOS.....	43
2.6.1	EJEMPLOS DE AIREADORES IMPLANTADOS EN LAS OBRAS HIDRÁULICAS.....	43
2.6.2	FOTOGRAFÍAS DE AIREADORES IMPLEMENTADOS EN OBRAS HIDRÁULICAS EN MODELO Y PROTOTIPO.....	48
2.7	JUSTIFICACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN AIREADOR EN LA RÁPIDA.....	54
2.8	CONCLUSIONES.....	54
CAPÍTULO 3 CRITERIOS DE DISEÑO.....		56
3.1	ESTRUCTURA DE UN AIREADOR.....	56
3.1.1	TIPOS DE AIREADORES.....	57
3.1.2	UBICACIÓN DEL AIREADOR.....	62
3.1.3	CONDICIONES PARA LA SUMERGENCIA DEL AIREADOR.....	63
3.1.4	DISEÑO GEOMÉTRICO DE UN AIREADOR.....	64
3.2	GEOMETRÍA E IMPLANTACIÓN DE LOS DUCTOS DE AIRE.....	66
3.2.1	TIPOS DE DUCTOS DE AIRE.....	67
3.2.2	ARRASTRE DE AIRE SEGÚN KOSCHITZKY Y KOBUS (1988) ...	73
3.3	MÉTODOS PROPUESTOS PARA EL DISEÑO DEL AIREADOR Y SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE.....	78
3.3.1	MÉTODO FALVEY.....	78

3.3.2	MÉTODO ICOLD	93
3.3.3	MÉTODO KÖKPINAR & GÖGÜS.....	103
3.3.4	MÉTODO GUTIERREZ ORELLANO Y VEGA.....	108
3.4	CAMBIOS DEL FLUJO DE AGUA DEBIDO A LOS DISPOSITIVOS DE AIREACIÓN IMPLANTADOS	108
3.5	CONCLUSIONES	109
CAPÍTULO 4 IMPLEMENTACIÓN DE UNA HOJA DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO DEL AIREADOR.....		111
4.1	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO DEL AIREADOR SELECCIONADO	111
4.1.1	DATOS	112
4.1.2	CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE CAVITACIÓN EN CADA SECCIÓN INGRESADA AL PROGRAMA A LO LARGO DE LA RÁPIDA ..	112
4.1.3	CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA GEOMETRÍA DEL AIREADOR COMBINADO	112
4.2	HOJA DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO DEL AIREADOR SELECCIONADO	114
4.3	DIAGRAMA DE FLUJO.....	115
4.4	MANUAL DE USO	116
4.4.1	INGRESO A LA HOJA DE CÁLCULO	116
4.4.2	OPCIONES DISPONIBLES	118
4.4.3	ANÁLISIS DE CAVITACIÓN	119
4.4.4	DIMENSIONAMIENTO AIREADOR.....	125
4.5	EJEMPLO DE CÁLCULO EN BASE AL AIREADOR SELECCIONADO USANDO LA HOJA DE CÁLCULO CREADA.....	135
4.5.1	ANÁLISIS DE LA CAVITACIÓN.....	136
4.5.2	GEOMETRÍA DEL AIREADOR SELECCIONADO	137
4.5.3	DIMENSIONAMIENTO AIREADOR.....	138
4.5.4	ANALISIS COMPARATIVO	141
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		145
5.1	CONCLUSIONES	145
5.2	RECOMENDACIONES	149
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....		152

ANEXOS 155

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 DESARROLLO DE LA CAPA LÍMITE EN UN CANAL ABIERTO CON UNA CONDICIÓN DE ENTRADA IDEAL	6
FIGURA 1.2 PARÁMETROS BÁSICOS Y ENERGÍA EN UNA RÁPIDA DE PENDIENTE FUERTE	11
FIGURA 1.3 ÁBACO PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR FRICCIÓN EN RÁPIDAS.....	15
FIGURA 1.4 ENTREGA DE UN CANAL CON FLUJO SUPERCRÍTICO	16
FIGURA 1.5 NÚMERO DE FROUDE CRÍTICO AL INTERIOR DE CONDUCCIONES DE SECCIONES TRANSVERSALES RECTANGULAR, TRAPEZOIDAL Y CIRCULAR.....	19
FIGURA 1.6 PROCESO DE COLAPSO DE UNA BURBUJA Y EFECTOS DE LA IMPLOSIÓN DE LA BURBUJA EN LA SUPERFICIE DE CONTACTO.....	21
FIGURA 1.7 IMPLOSIÓN DE UNA BURBUJA.....	21
FIGURA 1.8 PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN EL MÉTODO PROPUESTO POR ECHÁVEZ PARA DETERMINAR EL ÍNDICE DE CAVITACIÓN LOCAL	22
FIGURA 1.9 VARIACIÓN DE LA CARGA DE VAPORIZACIÓN DEL AGUA H_v VS. TEMPERATURA	23
FIGURA 1.10 DEFINICIÓN DE LA ECUACIÓN DE FLUJO A UNA DISTANCIA K DE LA SUPERFICIE MEDIANTE DATOS EXPERIMENTALES EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN X/K	24
FIGURA 1.11 VELOCIDADES CARACTERÍSTICAS E ÍNDICES DE CAVITACIÓN INCIPIENTES PARA DIFERENTES IRREGULARIDADES DE LA SUPERFICIE DE LA SOLERA	26
FIGURA 1.12 RESULTADO DE PRUEBAS REALIZADAS POR PETERKA (1965). PÉRDIDAS DE HORMIGÓN A CAUSA DE LA CAVITACIÓN EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE AIRE	28
FIGURA 2.1 DIVISIÓN DEL FLUJO EN REGIONES: SUPERIOR E INFERIOR SEGÚN LA ELEVACIÓN SOBRE EL FONDO Y LA CONCENTRACIÓN DE AIRE, STRAUB Y ANDERSON, 1960	37

FIGURA 2.2 ZONAS DE FLUJO. INCORPORACIÓN DE AIRE EN UNA ESTRUCTURA. DESARROLLO DE UN FLUJO SEMI-AIREADO EN UN CANAL ABIERTO..... 39

FIGURA 2.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE AIREADORES, VOLKART P., RUTCHMANN P., (1984)..... 42

FIGURA 3.1 PARÁMETROS PRINCIPALES QUE INTERVIENEN EN LA RÁPIDA, AIREADOR Y SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE..... 57

FIGURA 3.2 TIPOS DE AIREADORES Y SUS COMBINACIONES. VISCHER... 58

FIGURA 3.3 RAMPA DE FONDO Y RANURA EN LA PARED LATERAL 59

FIGURA 3.4 RAMPA DE FONDO DESPLAZAMIENTO LATERAL..... 60

FIGURA 3.5 RAMPA EN FONDO Y LATERAL..... 60

FIGURA 3.6 RAMPA EN SOLERA JUNTO A PILA..... 61

FIGURA 3.7 NOMENCLATURA GENERAL DEL AIREADOR Y SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE EN LA RÁPIDA..... 65

FIGURA 3.8 GEOMETRÍA DE LA RANURA Y NOMENCLATURA..... 66

FIGURA 3.9 SOLUCIONES PARA EL SUMINISTRO DE AIRE, UBICACIÓN DE LA TOMA DE AIRE, IMPLEMENTADO INMEDIATAMENTE AGUAS ABAJO DEL AIREADOR. PINTO N. L. 67

FIGURA 3.10 IMPLANTACIÓN DEL DUCTO EN PARED LATERAL 68

FIGURA 3.11 IMPLANTACIÓN DEL DUCTO CON ORIFICIOS BAJO LA RAMPA 68

FIGURA 3.12 AIREADOR CON DUCTO AGUAS ABAJO DE LA RAMPA Y CONECTADO A UNA TOMA DE AIRE..... 69

FIGURA 3.13 SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE CON DEFLECTOR LATERAL. VISTA LATERAL Y VISTA SUPERIOR EN DIRECCIÓN DEL FLUJO. (“TIPO A”) 70

FIGURA 3.14 SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE CON DESPLAZAMIENTO DE PARED LATERAL. VISTA LATERAL Y VISTA SUPERIOR EN DIRECCIÓN DEL FLUJO. (“TIPO B”) 71

FIGURA 3.15 SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE DETRÁS DE UNA PILA. VISTA LATERAL Y VISTA SUPERIOR EN DIRECCIÓN DEL FLUJO. (“TIPO C”) 71

FIGURA 3.16 SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE POR RANURAS LATERALES. VISTA LATERAL Y VISTA SUPERIOR EN DIRECCIÓN DEL FLUJO. (“TIPO D”)	72
FIGURA 3.17 SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE POR DUCTOS ESPECIALES QUE INTRODUCEN AIRE BAJO EL FLUJO. VISTA LATERAL Y VISTA SUPERIOR EN DIRECCIÓN DEL FLUJO. (“TIPO E”)	72
FIGURA 3.18 SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE DE GEOMETRÍA ESPECIAL. VISTA LATERAL Y VISTA SUPERIOR EN DIRECCIÓN DEL FLUJO. (“TIPO F”)	73
FIGURA 3.19 FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO AIREADOR DE INGRESO TOTAL DE AIRE, FLUJO DE SUMINISTRO DE AIRE Y FLUJO AIREADOR	78
FIGURA 3.20 ÁBACO PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE DE LA TRAYECTORIA DEL CHORRO	81
FIGURA 3.21 LONGITUD DE LA TRAYECTORIA DEL CHORRO	82
FIGURA 3.22 RELACIÓN DE PRESIÓN CRÍTICA EN LA SALIDA DEL AIRE	84
FIGURA 3.23 ARRASTRE DE AIRE BAJO LA LÁMINA DE AGUA	86
FIGURA 3.24 PISCINA FORMADA BAJO LA LÁMINA DE AGUA	88
FIGURA 3.25 CONVERGENCIA DE DRENAJE CON EL DESPLAZAMIENTO AGUAS ABAJO DEL AIREADOR	89
FIGURA 3.26 RELACIÓN $B/B_{MÁX}$ Y ΔE	98
FIGURA 3.27 RELACIÓN ENTRE θ Y $Tr\theta$ PARA LA CORRECCIÓN DEL ÁNGULO DE LA RAMPA	98
FIGURA 4.1 ESQUEMA DE AIREADOR SELECCIONADO Y NOMENCLATURA DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS	113
FIGURA 4.2 DIAGRAMA DE FLUJO	115
FIGURA 4.3 INGRESO HOJA DE CÁLCULO	116
FIGURA 4.4 HOJA DE CÁLCULO CON DATOS GUARDADOS	117
FIGURA 4.5 ACCIONES QUE SE PUEDEN SELECCIONAR	118
FIGURA 4.6 ANÁLISIS DE CAVITACIÓN	119
FIGURA 4.7 CRITERIOS DISPONIBLES	120
FIGURA 4.8 CRITERIO DE THOMA	121
FIGURA 4.9 CRITERIO ECHÁVEZ	122
FIGURA 4.10 CARGA DE VAPORIZACIÓN DEL AGUA. ECHÁVEZ G. 1971	124

FIGURA 4.11 DIMENSIONAMIENTO AIREADOR.....	125
FIGURA 4.12 MÉTODO KOSCHITZKY Y KOBUS (1988)	126
FIGURA 4.13 MÉTODO HAGER Y RUTSCHMANN (1990)	127
FIGURA 4.14 MÉTODO KÖKPINAR Y GÖGÜS (2002).....	129
FIGURA 4.15 MÉTODO GUTIERREZ ARELLANO Y VEGA (2010).....	130
FIGURA 4.16 REPORTES	132
FIGURA 4.17 COEFICIENTE DE ARRASTRE DE AIRE	133
FIGURA 4.18 CAUDAL DEL AIRE	133
FIGURA 4.19 ÁREA DEL DUCTO	134
FIGURA 4.20 LONGITUD DEL CHORRO.....	134
FIGURA 4.21 INGRESO DE DATOS CRITERIO DE THOMA	136
FIGURA 4.22 INGRESO DE DATOS CRITERIO DE ECHAVEZ	136
FIGURA 4.23 MÉTODO KOSCHITZKY Y KOBUS (1988)	138
FIGURA 4.24 MÉTODO HAGER Y RUTSCHMANN (1990)	139
FIGURA 4.25 MÉTODO KÖKPINAR Y GÖGÜS (2002).....	140
FIGURA 4.26 MÉTODO GUTIERREZ ARELLANO Y VEGA (2010).....	141
FIGURA 4.27 GRÁFICO COMPARATIVO DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE DE AIRE OBTENIDO EN CADA MÉTODO, PARA DETERMINAR EL CAUDAL DE AIRE.....	141
FIGURA 4.28 GRÁFICO COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL CAUDAL DE AIRE SEGÚN CADA MÉTODO PROPUESTO.....	142
FIGURA 4.29 GRÁFICO COMPARATIVO DEL VALOR OBTENIDO PARA EL ÁREA DEL DUCTO DE AIRE.....	142
FIGURA 4.30 GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE EL MÉTODO DE HAGER Y RUTSCHMANN CON KÖKPINAR Y GÖGÜS, CON RESULTADOS DE LA LONGITUD DE CHORRO	143

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1 FLUJO SEGÚN EL NÚMERO ADIMENSIONAL DE FROUDE.....	8
TABLA 1.2 CLASIFICACIÓN DEL RÉGIMEN DE FLUJO EN CANALES ABIERTOS	20
TABLA 1.3 ÍNDICES DE CAVITACIÓN INCIPIENTES RECOMENDADOS SEGÚN EL TIPO DE SUPERFICIE Y RANGOS DE RUGOSIDAD K	25
TABLA 1.4 EVALUACIÓN DE LA CAVITACIÓN SEGÚN ÍNDICES INCIPIENTES Y LOCALES.....	26
TABLA 2.1 PORCENTAJES DE PÉRDIDAS DE AIRE POR METRO LINEAL PROPUESTO POR PRUSZA, MANTELLINI & SEMENKOV	40
TABLA 2.2 RESUMEN DE AIREADORES IMPLANTADOS EN LAS OBRAS HIDRÁULICAS DE VARIOS PAÍSES. DATOS HIDRÁULICOS, PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS Y OBSERVACIONES (A).....	43
TABLA 2.3 RESUMEN DE AIREADORES IMPLANTADOS EN LAS OBRAS HIDRÁULICAS DE VARIOS PAÍSES. DATOS HIDRÁULICOS, PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS Y OBSERVACIONES (B).....	44
TABLA 2.4 RESUMEN DE ESPACIAMIENTO ENTRE AIREADORES DE LOS DISTINTOS PROYECTOS, CON BASE EN LA INFORMACIÓN RECOPIADA.	45
TABLA 2.5 ESCALAS DE MODELOS FÍSICOS IMPLEMENTADAS EN VARIOS PROYECTOS.....	46
TABLA 2.6 LONGITUD DEL CHORRO REGISTRADA EN EL MODELO FÍSICO DEL P.H. REVENTAZÓN EN COSTA RICA CON DESCARGAS LIBRE Y CONTROLADA PARA UNA GAMA DE CAUDALES Y ALTURA DE RAMPA DE 0,40M Y 0,50M.....	47
TABLA 3.1 RESUMEN DE VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS TIPOS DE AIREADORES.....	62
TABLA 3.2 CONDICIONES PARA LA SUMERGENCIA DE AIREADOR CON RAMPA, AIREADOR SIN RAMPA, RANURA HORIZONTAL Y CAVIDAD BAJO UN CUERPO ROMO (CHANSON, 1995).....	63
TABLA 3.3 COMPARACIÓN ENTRE DUCTO ABIERTO Y DUCTO CERRADO.	69

TABLA 3.4 COEFICIENTES EN FUNCIÓN DEL ARRASTRE DE AIRE PARA VARIAS GEOMETRÍAS DE UN AIREADOR, QUE INTERVIENEN EN LA FUNCIÓN ESPECÍFICA DE ARRASTRE SEGÚN KOSCHITZKY Y KOBUS (1988).....	76
TABLA 3.5 RACIONALIZACIÓN ENTRE CAUDALES E ÍNDICES DE CAVITACIÓN	79
TABLA 5.1 CAUDAL DE DISEÑO	148

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

FOTOGRAFÍA 1.1 DAÑOS POR CAVITACIÓN EN LA SUPERFICIE DEL VERTEDERO	29
FOTOGRAFÍA 1.2 DAÑOS POR CAVITACIÓN EN LA SUPERFICIE DE HORMIGÓN DEL VERTEDERO DE LA PRESA HÖLJES EN SUECIA	29
FOTOGRAFÍA 2.1 AIREADOR EN MODELO HIDRÁULICO DEL VERTEDERO DE LA PRESA ZAPOTILLO EN MÉXICO	48
FOTOGRAFÍA 2.2 AIREADOR EN MODELO FÍSICO DE LA PRESA EL CAJÓN QUE CONSTA DE CUATRO AIREADORES INSTALADOS.....	48
FOTOGRAFÍA 2.3 AIREADORES Y DUCTOS DE AIRE EN EL VERTEDERO DE LA PRESA FOZ DO AREIA.....	49
FOTOGRAFÍA 2.4 DISPOSITIVOS DE AIREACIÓN. PRESA CHUNGJU EN COREA.....	49
FOTOGRAFÍA 2.5 DETALLE DE LA PRIMERA RANURA DE AIREACIÓN. SITUADO AGUAS ABAJO DE COMPUERTAS. PRESA CHUNGJU EN COREA.....	50
FOTOGRAFÍA 2.6 ÚLTIMA RÁPIDA DEL VERTEDERO AUXILIAR DE LA PRESA SAYANO SHUSHENSKAYA	50
FOTOGRAFÍA 2.7 DISPOSITIVOS DE AIREACIÓN. PRESA CHUNGJU EN COREA	51
FOTOGRAFÍA 2.8 AIREADOR DE LA PRESA TRIGOMIL EN MÉXICO.....	51
FOTOGRAFÍA 2.9 AIREADOR DE LA PRESA HUITES	52
FOTOGRAFÍA 2.10 AIREADORES DE LA PRESA AGUAMILPA	52
FOTOGRAFÍA 2.11 AIREADOR DE LA PRESA CORRAL	53
FOTOGRAFÍA 2.12 AIREADORES DE LA P. H. EL CAJÓN	53

SIMBOLOGÍA

Símbolo	Descripción
A	Área del flujo de agua en una sección transversal
A_a	Área del ducto para el ingreso de aire
A_r	Coefficiente de la trayectoria del chorro.
A_v	Área de la sección transversal del ducto de aire
A_w	Área del flujo de agua aguas arriba del aireador
B	Número de Boussinesq del flujo
c	Concentración de aire
C_1	Sumatoria de coeficientes de pérdida a través del ducto de aire
C_a	Concentración media de aire en la aireación desarrollada.
C_n	Factor de presión
C_o	Concentración media de aire al inicio de la aireación
C_x	Concentración media de aire a una distancia X
$d_1 \cos \phi$:	Carga de presión
E	Número de Eötvös
Eu	Número adimensional Euler
f	Coefficiente de fricción de Darcy-Weisbach.
F,Fr	Número adimensional Froude
F_o	Número de Froude del flujo en la rampa
g	Constante de aceleración de gravedad
H_1	Carga sobre el aireador
h_i	Calado del flujo aguas abajo del punto de impacto.
h_o	Calado del flujo al final de la rampa
h_p	Calado de la piscina formada
h_p	Carga de presión de la agua en la solera de la rápida
h_v	Carga de presión de vapor
K	Rugosidad equivalente de Nikuradse de la superficie
L	Longitud del tramo
L_i	Distancia inclinada aguas abajo desde el aireador hasta el inicio de la aireación.
L_j	Longitud del chorro (jet)
L_x	Distancia inclinada aguas abajo del aireador
n	Coefficiente de rugosidad
P_a	Presión atmosférica
P_j	Presión bajo el chorro (jet)
P_N	Subpresión de la cavidad. Presión negativa
Q	Caudal unitario

q_a	Caudal unitario del aire
q_w	Caudal unitario del agua
Q_a	Caudal de aire en el ducto de aire, caudal de aire.
Q_e	Caudal de aire arrastrado
Q_w	Caudal de agua
R_h, R	Radio hidráulico de la sección transversal
T	Altura relativa del aireador
t_r	Altura de la rampa
t_s	Altura del escalón
u'	Componente de la velocidad longitudinal turbulenta
u_w	Velocidad del agua
U	Velocidad media del flujo
U_a	Velocidad del aire en el ducto
U_i	Velocidad media del chorro en el punto de impacto
U_o	Velocidad media de flujo en el labio de la rampa.
v'	Componente de la velocidad transversal turbulenta
V	Velocidad del flujo
V_c	Velocidad crítica del flujo
V_k	Velocidad del flujo a una altura k de la superficie
We	Número adimensional Weber
x	Distancia de la cresta del cimacio al punto de análisis
X_i	Distancia horizontal desde el final de la rampa hasta el punto de impacto del chorro.
X_n	Distancia horizontal desde el final de la rampa al centro del punto de impacto del chorro
y	Calado normal
y, h	Calado perpendicular a la solera
Y_i	Elevación del punto del impacto
Y_n	Elevación de la línea central del chorro al punto de impacto.
Y_o	Elevación del labio de la rampa
Y_c	Calado crítico
Z	Carga de posición
α	Ángulo entre la rápida y la horizontal, en ($^{\circ}$).
α	Coeficiente de Coriolis para velocidad
α_o	Coeficiente de distribución de velocidad (coeficiente de energía cinética=1,1)
β	Caudal de aire o relación de arrastre de aire.
β	Q_e/Q_w
Δp	Subpresión bajo la lámina de agua (cavidad)
ϵ	Tensión superficial o tensión interfacial de superficie

θ	Ángulo de inclinación de la rampa, en ($^{\circ}$). Métodos Gögüs y ICOLD
θ_e	Ángulo entre la tangente de la lámina de agua en la rampa y la horizontal.
θ_i	Ángulo aguas abajo de la rampa entre el fondo de la rápida y la horizontal.
θ_j	Ángulo entre la línea central de impacto del chorro y el fondo de la rápida.
θ_o	Ángulo entre el deflector y la horizontal
λ_j	Longitud relativa del chorro
$\lambda_{m\acute{a}x}$	Longitud relativa máxima del chorro
μ	Viscosidad dinámica del agua
ξ	Coefficientes de pérdida de la carga total en el sistema de suministro de aire
ρ	Densidad del agua.
ρ_a	Densidad del aire
ρ_w	Densidad del agua
σ	Coefficiente de tensión en la superficie de agua
$\bar{\theta}$	Ángulo efectivo de despegue, en (rad)
$\Delta\bar{p}$	Presión inferior a la atmosférica
0,017	Constante dimensional por metro, $0,017m^{-1}$
ΣH_f :	Sumatoria de pérdidas en el tramo en m.

RESUMEN

A través de la presente tesis se ha desarrollado el análisis del requerimiento de aireación forzada en rápidas y la elaboración de una hoja de cálculo para el aireador seleccionado.

En los capítulos siguientes se muestra estudios históricos que permitieron llegar a plantear como solución a la cavitación el dispositivo de aireación artificial o forzada, en una breve recopilación bibliográfica se presentan los designados métodos que permiten dimensionar un aireador combinado, así como también se plantean criterios de diseño propuestos por varios autores.

La implementación de una hoja de cálculo permite analizar resultados sobre la posibilidad de riesgo de cavitación para distintos escenarios, ya sea para una gama de caudales o rugosidades de la superficie de hormigón según el criterio seleccionado: Criterio de Echávez y Criterio de Thoma.

La hoja de cálculo además permite dimensionar al aireador combinado y determinar su caudal de aire así como también dimensionar el ducto de aire requerido para la incorporación de aire al flujo de agua, y presenta además la longitud que alcanza el chorro conforme a la geometría del aireador.

PRESENTACIÓN

La presente Tesis se basa en una recopilación de criterios para el diseño de aireadores, se analiza el requerimiento de aireación para un ejemplo práctico mediante una hoja de cálculo para un aireador combinado.

La hoja de cálculo permite el análisis de la cavitación con el ingreso de hasta 20 secciones a lo largo de la rápida, se evalúa el riesgo mediante los Criterios de Echávez y Thoma.

El ejemplo planteado permite analizar el requerimiento de aireación forzada mediante un aireador, así como también identificar el lugar de implantación del primer aireador. Una vez definido el sitio se procede a dimensionar el aireador con base en los llamados “métodos” planteados: Método Koschitzky y Kobus, Método Falvey, Método ICOLD, Método Kokpinar y Kobus, éstos permiten obtener como resultado el caudal de aire requerido, dimensionamiento del ducto de aire y longitud del chorro.

Posteriormente se evalúan los resultados para establecer los valores definitivos como solución al ejemplo propuesto en este estudio.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

Los flujos de alta velocidad se presentan en estructuras hidráulicas de pendiente fuerte, en este tipo de flujos existe una elevada probabilidad de que ocurran problemas de cavitación y por ende erosión en la superficie de contacto con el agua.

Existen varios estudios realizados a partir de 1915 hasta la actualidad, con diferentes autores que proponen varias teorías acerca del fenómeno de la cavitación y las posibles soluciones. En este trabajo se recopila información acerca de los aireadores utilizados en rápidas con el fin de mitigar la cavitación.

El fenómeno de la cavitación se produce cuando la presión baja, es decir cuando hay presiones negativas iguales o menores que la presión de vapor de agua, esto genera burbujas en el flujo de agua. Las burbujas son trasladadas por medio del fluido, hacia las zonas donde la presión es hidrostática, el cambio de presión provoca la implosión de las burbujas; si esta implosión se produce en las cercanías o en la misma superficie de contacto, causaría daños debido a la presión elevada ejercida en la superficie hormigonada de la estructura hidráulica. A causa de la cavitación, se produce la erosión del hormigón convirtiendo la superficie lisa en irregular debido a su composición heterogénea de materiales. Este fenómeno altera las condiciones iniciales del flujo por lo que, si no son controladas, las consecuencias pueden llegar al punto de colapsar la estructura.

Existen varios métodos para evitar los fenómenos de cavitación y erosión, algunos de ellos se refieren a soluciones de tipo hidráulico y constructivo. En la presente investigación se recopilan estudios realizados en varios países donde se propone como alternativa de solución la aireación artificial del flujo, mediante el uso de aireador/es ubicados a lo largo de la rápida, la presencia del fenómeno de cavitación conlleva al uso del dispositivo de aireación, el análisis de las condiciones permite el dimensionamiento del aireador con el objetivo de suministrar la suficiente

cantidad de aire requerido, para que el flujo pueda mitigar de manera acertada la cavitación.

Cabe recalcar que existen varios tipos de aireadores simples y combinados, su selección depende de las características de la rápida y del entorno; según las condiciones de borde, cada proyecto requiere de una geometría específica por lo que no se ha generalizado una forma estandarizada y óptima de aireador.

En esta investigación se propone la geometría más común utilizada en el medio; este documento se direcciona al análisis de los tipos de aireadores, su efectividad, funcionalidad, geometría, criterios de diseño, selección del aireador y la sistematización del diseño mediante una hoja cálculo, y para finalizar las conclusiones y recomendaciones del aireador seleccionado.

1.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA ¹

El fenómeno de cavitación se presentó en rápidas con flujos de alta velocidad, y la necesidad de evitar los daños se planteó la solución de un aireador con rampa, dando así el inicio de su estudio en el siglo XIX.

Poco más del año 1900, tanto los caudales como las cargas de agua incrementaban, por lo que requerían de su evacuación, bajo la necesidad de conducir flujos de alta velocidad con grandes pendientes hasta su descarga, se introducen conducciones adicionales a la obra hidráulica permitiendo evaluar los daños ocasionados por la cavitación, para el año 1930 aproximadamente, se aplica como solución el salto en esquí a la salida de la conducción disminuyendo parte de los daños ocasionados pero la velocidad de la rampa se mantenía sobre los 20m/s ocurriendo daños por cavitación, estos eran similares a los daños en una turbina Kaplan. Los investigadores L. Rayleigh y O. Reynolds analizaron la temperatura y la presión; J. Ackeret estudió la formación de burbujas de cavitación en el agua,

¹ Hager W., Pfister M., "Historical Advance of Chute Aerators", 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment.

introduciendo así el concepto de número de cavitación, en la actualidad este concepto se lo utiliza en el diseño para predecir la cavitación (según la propuesta de Falvey 1990). En 1943 se expone la primera conferencia nacional sobre el fenómeno de cavitación en la que participan varias organizaciones ASCE, USBR, TVA. Por el año 1950 se propone la introducción de aire para reducir el daño por cavitación en flujos de alta velocidad. Dentro de los años 60's se plantea una investigación de los fenómenos. Entre los años 1960 y 1980 se produjeron daños en superficies de hormigón y cimentaciones de varios vertederos (Falvey, 1990), planteándose como solución eficaz los aireadores en las rápidas, mitigando los daños por cavitación. Los modernos aliviaderos están constituidos por aireadores en sus rápidas, por ejemplo Vischer y Hager (1998), Khatsuria (2004).

Diversos han sido los análisis experimentales para aireadores de fondo, Volkart y Chervet (1983) propusieron distintos diseños de aireadores. Varios investigadores han realizado sus estudios aportando con valiosos criterios, entre ellos se pueden citar a: Galperin et. Al. (1971), Pinto et. Al. (1982), Rutschmann (1988), Chanson (1988), y Rutschmann y Hager (1990).

1.1.1 EFECTOS DE LA CAVITACIÓN

En el año 1945, se realizó el primer simposio sobre daños por cavitación. Bradley en el mismo año, investigó los problemas del aliviadero de la presa Boulder, probando diferentes medios para introducir aire en el flujo, con el fin de que exista un amortiguador entre el flujo de alta velocidad y el revestimiento del túnel. Su propuesta se dirigió a implementar deflectores dando mejores resultados tanto en comportamiento, viabilidad y economía.

En el año 1953, Peterka, presentó un documento en el 5to. Congreso de la IAHR, afirmando que la presencia de burbujas de aire en el flujo es favorable a la disminución de daños por cavitación. Su investigación lo llevó a un estudio en

modelo, en el que demostró que una cantidad de aire entre el 1% y 2% puede ser suficiente para disminuir los daños ocasionados por la cavitación.

1.1.2 INVESTIGACIONES SOBRE AIREADORES HASTA 1990

Galperin et al. (1979), publicó un libro inédito sobre cavitación en estructuras hidráulicas. Semenkov y Lentyaev en 1973, comparten el criterio de Peterka basados en experimentos realizados por Hidroproekt, señalando que una cierta cantidad de aire introducido elimina daños en la rampa. Aguas abajo del aireador se estima una pérdida de aire de 0,5%/m según estudios, permitiendo el diseño de un siguiente aireador, aumentando la concentración de aire a tal punto de eliminar el fenómeno de cavitación.

Pinto et al. (1982), consideró algunos tipos de aireadores para su estudio experimental y teórico. Pinto y Neidert en 1983 y Pinto en 1984, empezaron sus investigaciones tratando de obtener bases para diseños futuros.

A principio de 1980, en Zurich se inician las investigaciones por parte de Vischer et al.(1982), tras varios análisis, resultaron criterios sobre la concentración de aire inferior y la ubicación que debería tener el siguiente aireador.

Para el año 1986, Volkart y Rutschmann, realizaron investigaciones en las que proponen parámetros que influyen en el arrastre de aire como la longitud relativa del chorro, el número de Froude del flujo de aproximación y el número de Euler relacionado a la presión negativa, y un número para la concentración de aire en la parte inferior en la que elimina los daños por cavitación. Pinto et al. (1982, 1983) define al coeficiente de arrastre de aire en función de los números de Froude y Euler. Rutschmann en 1987 propuso un esquema de cálculo para la determinación del suministro de aire.

Wood en 1991 recopiló en una monografía la entrada de aire en flujos de rápidas. Falvey y Ervine en 1988 consideran como básicos a los mecanismos físicos, efectos de escala, condiciones de inyección, cantidad de aire arrastrado, difusión y transporte de burbujas de aire. Ervine et al. (1995), en un estudio experimental realizado demostraron que un aireador genera turbulencia y arrastre de aire y que un deflector en el canal arrastra mayor cantidad de aire.

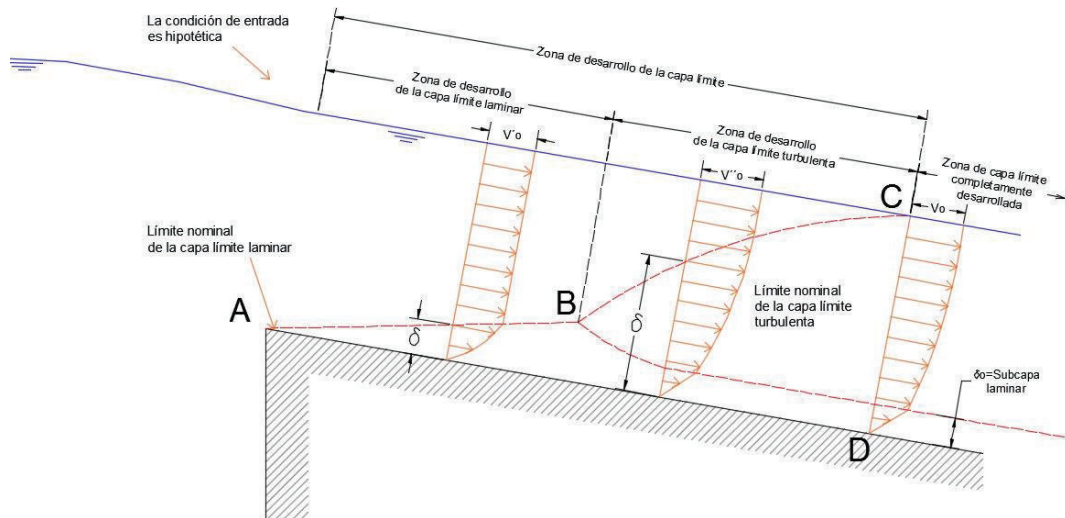
Con base en las investigaciones realizadas se concluye que el aireador es un elemento técnico necesario en flujos de alta velocidad y mediante las investigaciones realizadas en Estados Unidos hasta 1990, se propone: a la rampa, al escalón o a su combinación, como aireadores con mejores resultados.

1.2 CONCEPTOS BÁSICOS

1.2.1 CAPA LÍMITE

La capa límite es la zona donde se analiza el movimiento del fluido, perturbado a causa del contacto con un sólido. La velocidad del fluido respecto al sólido en movimiento varía de 0% a 99% de la velocidad de corriente no perturbada. Esta capa se genera por la viscosidad del fluido. La distribución de velocidades en un canal está ligado a la rugosidad de contorno y cambia con la distancia a lo largo del canal como se muestra en la Figura 1.1.

FIGURA 1.1 DESARROLLO DE LA CAPA LÍMITE EN UN CANAL ABIERTO CON UNA CONDICIÓN DE ENTRADA IDEAL



FUENTE: Chow, V. T., 2004, pág. 190

MODIFICADO POR: Jenny Carrera

1.2.2 FLUJO EN CANALES

Se clasifica al flujo en canales en: uniforme, no uniforme, permanente, no permanente, laminar, turbulento, subcrítico, supercrítico, entre otros.

- Flujo uniforme, la velocidad es uniforme en todos los sentidos, es permanente con respecto al espacio.
- Flujo no uniforme, la velocidad varía en cada punto
- Flujo permanente, cuando las características del fluido no cambian en un punto con el pasar del tiempo.
- Flujo no permanente, cuando la velocidad varía en módulo y dirección.

- Flujo laminar, no existe cambio en el movimiento de las partículas, las pérdidas van en función de la velocidad y la viscosidad evita que el flujo sea turbulento. El desplazamiento de las partículas es en trayectorias paralelas formando capas o láminas.
- Flujo turbulento, produce esfuerzos cortantes debido al roce con las paredes y por lo tanto pérdidas de energía, el movimiento de las partículas del fluido es desordenado. Es característico de un flujo a través de un canal de gran pendiente. Las fuerzas gravitatorias son importantes en flujos a superficie libre, la presión atmosférica en la superficie es constante. El número adimensional de Froude determina la relación entre las fuerzas inerciales las fuerzas gravitatorias.
- Flujo subcrítico, su número de Froude es menor a 1, se caracteriza por tener velocidades pequeñas y en este caso una perturbación puede propagarse hacia aguas arriba.
- Flujo supercrítico, es también conocido como flujo rápido, en este tipo de flujo una perturbación no se propaga hacia aguas arriba. El número de Froude es mayor a 1.
- Flujo estable, en el caso de canales de alta pendiente con flujo supercrítico, se considera estable cuando no hay presencia de ondas de Froude.
- Flujo inestable, en el caso de canales de alta pendiente fuerte con flujo supercrítico, se considera inestable cuando hay presencia de ondas de Froude.

TABLA 1.1 FLUJO SEGÚN EL NÚMERO ADIMENSIONAL DE FROUDE

Régimen	Froude	y	v
Subcrítico	$Fr < 1$	$y > y_c$	$v < v_c$
Crítico	$Fr = 1$	$y = y_c$	$v = v_c$
Supercrítico	$Fr > 1$	$y < y_c$	$v > v_c$

ELABORADO POR: Carrera J.

1.2.3 RÁPIDA

La rápida es un canal abierto de descarga, debido a la gravedad y a su característica de tener pendiente fuerte, permite la conducción del flujo a altas velocidades y a superficie libre. La sección transversal de una rápida es generalmente rectangular o trapezoidal y permite conducir el caudal desde una estructura de control hacia su descarga. Su dimensionamiento dependerá de las condiciones del proyecto y de las características topográficas del sitio.

Se recomienda que la rápida sea de tramo recto, de sección uniforme, manteniendo su régimen de flujo para evitar ondas cruzadas a lo largo de la conducción.

En la rápida, debido a que se tiene grandes pendientes, las velocidades del flujo aumentan, ocasionando un régimen supercrítico o rápido con número de Froude mayor a 1. Cuando la lámina de agua inferior se separa de la superficie de contacto a causa de la velocidad, se produce una zona de presión baja dando como efecto el fenómeno de cavitación. Para disminuir y evitar los riesgos por cavitación se adopta la solución de la implementación de aireadores para incorporar aire suficiente al flujo.

Las condiciones del flujo en rápidas dependen de las características físicas como: geometría, rugosidad, material, pendiente, y de las características del fluido como: caudal, velocidad, viscosidad, temperatura.

1.2.3.1 Características hidráulicas de la rápida

A continuación se detallan las principales características de una rápida.

- El Calado (y), es la altura de agua en una sección transversal, medido desde la solera hasta la superficie libre.
- El Ancho de la sección (B), es el ancho medido en la superficie libre de la sección transversal de la rápida.
- El Radio hidráulico (R_h), es la relación entre el área mojada y el perímetro mojado de la sección transversal de la rápida.
- La Pendiente de la rápida (I), es el porcentaje de inclinación de la rápida, es decir la altura que desciende por cada metro.
- El Área mojada (A), es la superficie de la sección transversal que ocupa el agua.

1.2.3.2 Diseño hidráulico de una rápida

La aplicación de las ecuaciones básicas de la hidráulica permite el diseño de la estructura, el principio de conservación de energía consta en definir un volumen de control con dos secciones de control aguas arriba y aguas abajo, se considera flujo permanente, incompresible y unidimensional. La energía del flujo en un canal abierto con pendiente fuerte está representada en la Figura 1.3.

Para rápidas la carga de presión en la ecuación de energía debe ser corregida por la proyección vertical del calado mediante el coseno del ángulo de inclinación de la solera multiplicado por su calado, $y \cos \phi$.

La altura de energía total en una sección de la rápida es igual a la suma de la altura sobre el nivel de referencia, la altura de presión y la altura de velocidad.

$$H = Z_1 + y_1 \cos \phi + \alpha \frac{V_1^2}{2g} \quad (1.1)$$

Donde, Z_1 : Elevación medida desde el nivel de referencia en m.
 y_1 : Distancia perpendicular desde el fondo del canal a la superficie libre en m.
 ϕ : Ángulo de inclinación de la rápida en grad.
 α : Coeficiente de Coriolis o coeficiente de energía cinética
 V : Velocidad del flujo en m/s
 g : Aceleración de la gravedad en m/s²

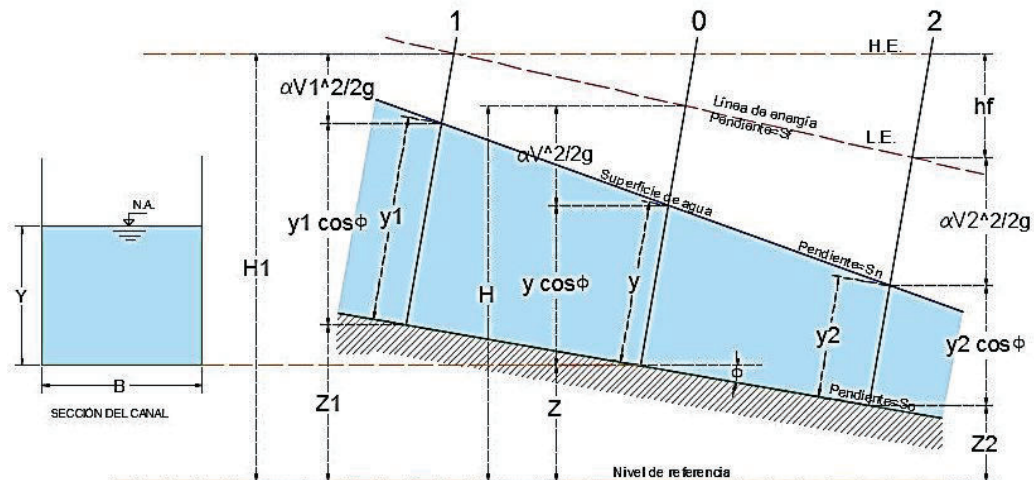
La energía específica en una sección es medida respecto al fondo del canal, siendo igual a la suma de la altura de presión más la altura de velocidad.

$$E_1 = y_1 \cos \phi + \alpha \frac{V_1^2}{2g} = y_1 \cos \phi + \alpha \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (1.2)$$

Donde, Q : Caudal
 g : Aceleración de la gravedad
 A : Área hidráulica

Al adoptar el principio de conservación de energía, la altura de energía total en una sección (1) aguas arriba debe ser igual a la altura de energía total en una sección (2) aguas abajo, más la pérdida de energía (h_f) entre las dos secciones debido a la fricción.

FIGURA 1.2 PARÁMETROS BÁSICOS Y ENERGÍA EN UNA RÁPIDA DE PENDIENTE FUERTE



ELABORADO POR: Jenny Carrera

Dentro del diseño hidráulico de una rápida, se plantea la ecuación de energía como:

$$Z_1 + y_1 \cos \phi + \alpha_1 * \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + y_2 \cos \phi + \alpha_2 * \frac{V_2^2}{2g} + \sum h_f \quad (1.3)$$

Donde, Z_1, Z_2 : elevaciones medidas sobre el nivel de referencia
 $y_1 \cos \phi, y_2 \cos \phi$: es la proyección vertical de la distancia perpendicular medida desde el fondo del canal a la superficie libre, considerando la pendiente del canal
 $\alpha V_1^2/2g, \alpha V_2^2/2g$: es la carga de velocidad
 $\sum h_f$: Sumatoria de pérdidas de energía por fricción en el tramo 1-2.

Los términos que intervienen en la ecuación de la energía son interpretados como: la carga de posición representa la energía potencial, la carga de presión representa la energía correspondiente al trabajo mecánico ejecutado por las fuerzas de presión, la carga de velocidad representa la energía cinética de la vena líquida y las pérdidas representan la energía disipada por el sistema.

En la siguiente ecuación de Manning se evalúan las pérdidas por fricción interna o por esfuerzo cortante que corresponden a la energía disipada.

$$h_f = \left(\frac{V^2 n^2}{Rh^{4/3}} \right) L \quad (1.4)$$

Dónde, hf: Valor de las pérdidas por fricción en m.
 V: Velocidad del flujo en m/s.
 n: Coeficiente de rugosidad de Manning en s/m^{1/3}.
 L: Longitud del tramo en m.
 Rh: Radio hidráulico de la sección del canal en m.

Los valores de los coeficientes de Manning dependen de la rugosidad del material del contorno del canal. Para canales revestidos de hormigón el coeficiente de Manning está en el rango desde 0,011 a 0,027².

Se consideran canales de pendiente alta:

- “Aquel con una pendiente mayor que 1 en 10.” (Chow, 2004, pág 33)
- “Donde el ángulo de inclinación del canal es mayor a 8 grados, como por ejemplo para rápidas.” (Toapaxi, 2014, pág 42)

Para determinar aproximadamente las pérdidas por fricción en canales de pendiente fuerte (rápidas), la U.S. Bureau of Reclamation propone la ecuación de Manning considerando las siguientes hipótesis:

- Radio hidráulico igual al calado, permite aplicarla a canales anchos y de poca profundidad. Y con base en la ecuación de continuidad se obtiene que:

$$A = \frac{Q}{V} \quad (1.5)$$

² Los valores son obtenidos de la tabla 5-6, pág. 109 del libro Hidráulica de canales abiertos, de Ven Te Chow.

$$bd = \frac{qb}{V} \quad (1.6)$$

$$d = Rh = \frac{q}{V} \quad (1.7)$$

Dónde, A: Área hidráulica en m²
 Q: Caudal en m³/s
 V: Velocidad del flujo en m/s
 b: Base de la sección en m
 d: Calado del flujo en m
 q: Caudal unitario en m³/s/m
 Rh: Radio hidráulico en m

- La energía cinética aumenta de manera proporcional a la longitud del canal.

$$\frac{h_v}{x} = \text{constante} \quad (1.8)$$

Utilizando la ecuación de Manning:

$$S_f = \left(\frac{V n}{Rh^{2/3}} \right)^2 \quad (1.9)$$

Donde, n: Coeficiente de rugosidad de Manning en s/m^{1/3}
 Sf: Pendiente en m/m

La velocidad media del flujo es:

$$h_v = \frac{V^2}{2g} \rightarrow V = \sqrt{2gh_v} \quad (1.10)$$

Las pérdidas por fricción son:

$$S_f = \frac{dh_f}{dx} \rightarrow h_f = \int_0^L s \, dx \quad (1.11)$$

Se reemplaza en la ecuación de Manning y se integra para el cálculo aproximado de las pérdidas por fricción en rápidas:

$$h_f = \frac{3L(2gh_v)^{5/3}}{8q^{4/3} - \frac{1}{n^2}} \quad (1.12)$$

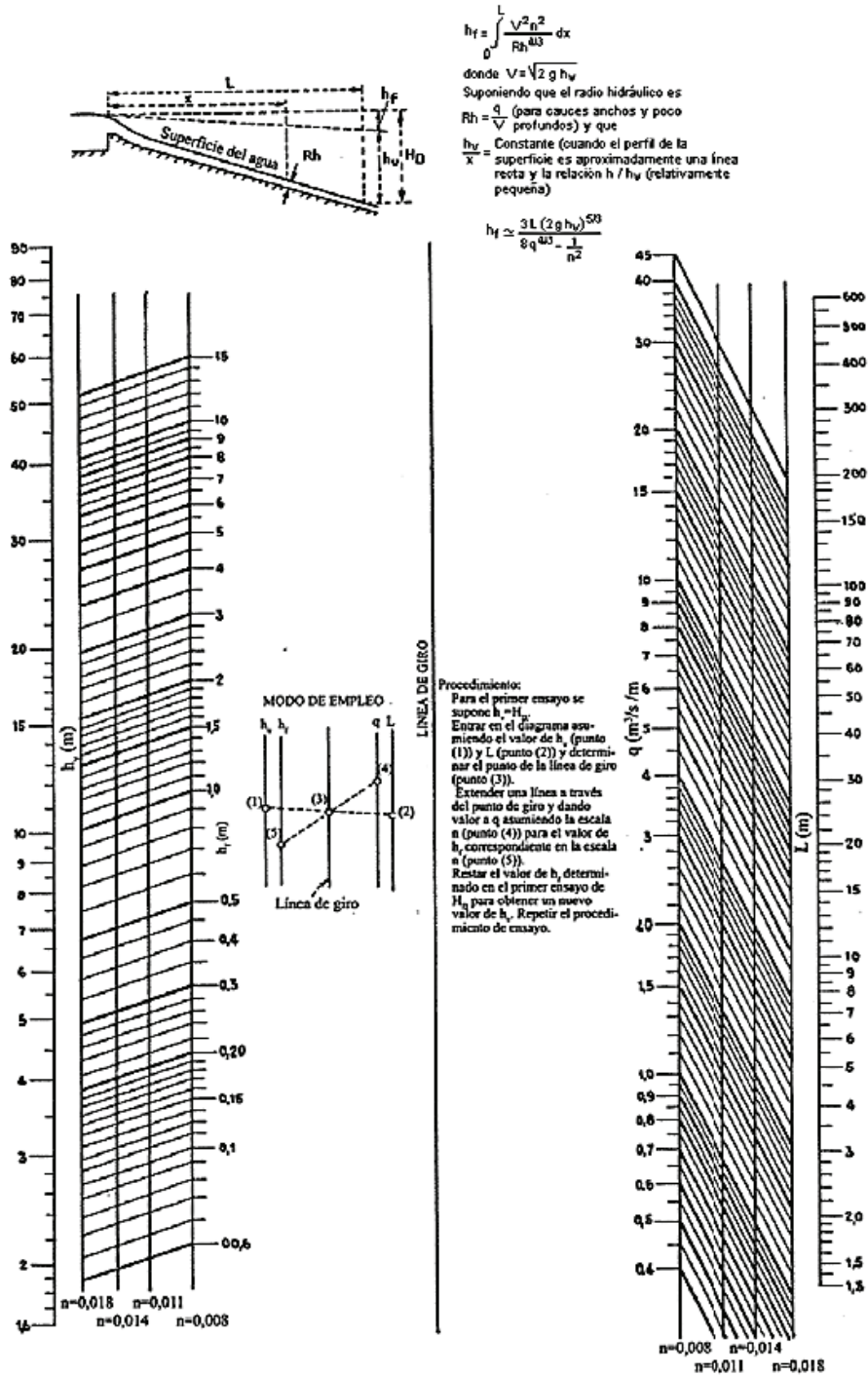
Donde, h_f : es el valor de las pérdidas por fricción en m.
 L: Proyección en horizontal de la longitud del canal en m.
 g: Aceleración de la gravedad en m/s².
 h_v : Carga de velocidad al final del canal en m.
 q: Caudal unitario en m³/s/m
 n: Coeficiente de rugosidad de Manning en s/m^{1/3}.

Para obtener el valor de pérdidas por fricción h_f se realizan varias iteraciones asumiendo el valor de h_v como la diferencia de niveles de la superficie libre del agua en un tramo de longitud L y el valor de h_f igual a cero en el cálculo inicial; Con el primer valor obtenido de h_f , recalcularlo, teniendo en cuenta que h_v es igual a la diferencia de niveles menos el h_f calculado. La iteración culmina cuando los valores de pérdidas por fricción son aproximados.

La U. S. Bureau of Reclamation propone una forma gráfica de generar el valor de h_f , utilizando el ábaco de la Figura. 1.3.

“Para rápidas menores de 9 metros de longitud, la fricción en la rápida puede ser despreciable.” (Palomino, 2003, p.10)

FIGURA 1.3 ÁBACO PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR FRICCIÓN EN RÁPIDAS



FUENTE: Bureau of Reclamation, 2007 citado en Toapaxi J.

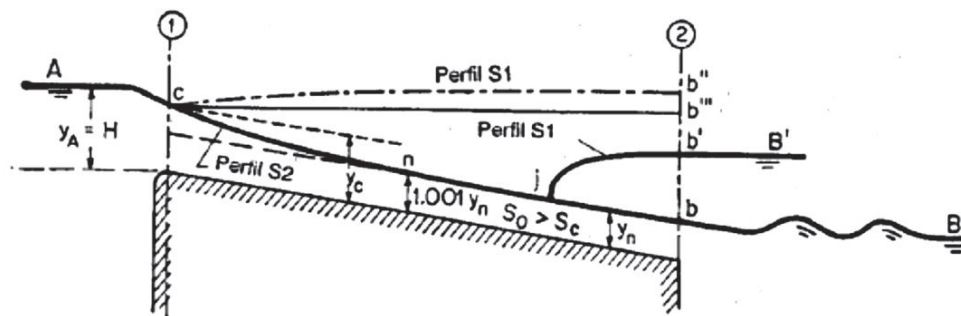
1.2.4 CONDICIONES HIDRODINÁMICAS EN UN CANAL DE PENDIENTE FUERTE³

Los canales muy empinados desarrollan un flujo inestable no permanente. Se presenta un flujo supercrítico cuando la pendiente crítica es menor que la pendiente del canal. La sección de control se ubica aguas arriba, en la sección 1 se controla con el caudal crítico.

El tipo de perfil de flujo que se desarrolla en el canal de pendiente fuerte depende de las condiciones aguas abajo por lo que el perfil generado es una curva S; las perturbaciones son reproducidas hacia aguas abajo.

Se tiene una curva tipo S2 cuando el nivel B es menor a la profundidad en la sección 2, por tanto el flujo no es afectado por el nivel aguas abajo; Una curva de tipo S1 se genera cuando el nivel B es mayor que la profundidad de salida, es decir aumenta el nivel aguas abajo, mientras el nivel aguas abajo sigue en aumento, el resalto se mueve hacia aguas arriba hasta alcanzar la profundidad crítica. Ver Figura 1.4.

FIGURA 1.4 ENTREGA DE UN CANAL CON FLUJO SUPERCRÍTICO



FUENTE: Chow, V. T., 2004, pág.296

³ Chow, V. T., Problemas Prácticos. En M. Suárez (Ed). Hidráulica de Canales Abiertos (pp. 295-296)

1.2.4.1 Desarrollo del flujo supercrítico en canales de fuerte pendiente

En las rápidas se desarrolla un flujo supercrítico debido a su pendiente fuerte, se lo define como supercrítico debido al valor del número de Froude mayor a uno, es la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitacionales. Se caracteriza por velocidades relativamente altas y con bajo calado en el que predomina la energía cinética. Al número de Froude se lo expresa de la siguiente forma:

$$F = \frac{V}{\sqrt{g * y}} \quad (1.13)$$

Donde, F: Número adimensional Froude
 V: Velocidad media del flujo en m/s
 g: Aceleración de la gravedad en m/s²
 y: Profundidad hidráulica en m

1.2.4.2 Características del Flujo supercrítico estable e inestable⁴

El flujo supercrítico inestable se presenta cuando la pendiente del canal es muy fuerte o la velocidad del flujo es muy alta, se caracteriza por la formación de ondas de remolino, la presencia del flujo inestable en prototipo puede ser estudiada experimentalmente mediante un modelo físico.

El número de Vedernikov caracteriza la condición de acuerdo a la estabilidad de la superficie libre (Chow, 1959), su valor depende de la forma geométrica del canal, rugosidad, alineación en planta y pendiente longitudinal⁵, se expresa mediante una ecuación básica:

$$V = x * y * F \quad (1.14)$$

⁴ Del Toro, N. "Bases y Criterios de Diseño de Canales con Flujo Escalonado y Sujetos a Aireación Natural", UCE, Quito, 2013.

⁵ Carrera, J., Lara, V. "Estudio en Modelo Hidráulico del Túnel de Desvío y el Túnel de Descarga Intermedia de la Central Hidroeléctrica Sopladora", EPN, Quito, 2010.

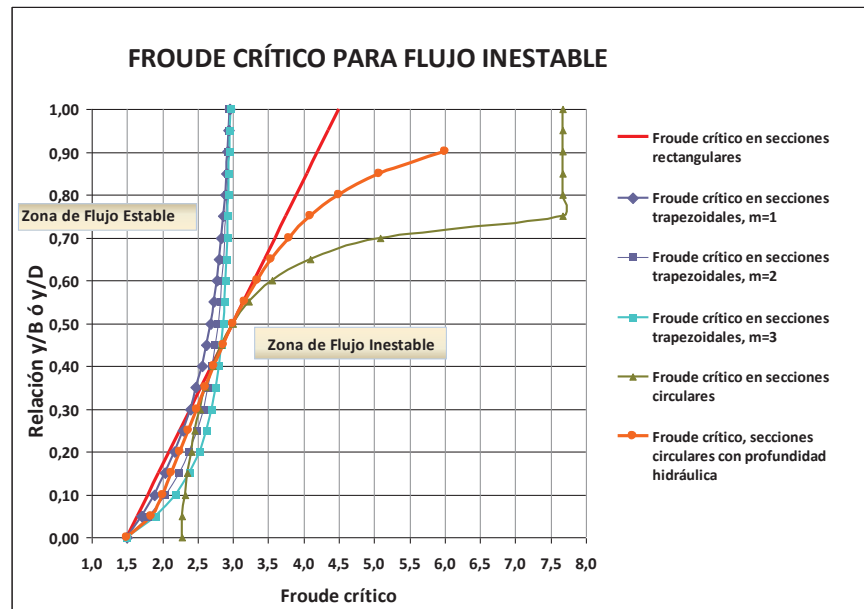
Donde, x : es el parámetro de fricción de borde o el exponente del radio hidráulico de la ecuación general del flujo uniforme, es decir igual a 0,5 para flujo turbulento si se usa la fórmula de Chézy, ó $x=2/3$ para flujo turbulento si se usa la fórmula de Manning.
 y : es el parámetro de forma de la sección transversal de la rápida, siendo igual a uno para canales anchos y cero para canales angostos.

El flujo es inestable si el número de Vedernikov es mayor a la unidad predominando el flujo no permanente con ondas, y el flujo es estable si el número de Vedernikov es menor a uno.

Si el número de Vedernikov es igual a 1, puede ser transformado en un número de Froude conocido como Froude crítico, define las condiciones bajo las cuales el flujo llega a ser inestable, representando las condiciones críticas en las que suceden las ondas superficiales transversales y longitudinales.

En la Figura 1.5, se presentan los números de Froude crítico según la sección transversal de la conducción.

FIGURA 1.5 NÚMERO DE FROUDE CRÍTICO AL INTERIOR DE CONDUCCIONES DE SECCIONES TRANSVERSALES RECTANGULAR, TRAPEZOIDAL Y CIRCULAR



FUENTE: Carrera, J. & Lara V., 2010, pág 18

1.2.4.3 Clasificación del régimen de flujo en canales abiertos

La siguiente Tabla 1.2, expresa los valores de los números adimensionales conforme a los regímenes de flujo en canales abiertos y especialmente para las rápidas.

TABLA 1.2 CLASIFICACIÓN DEL RÉGIMEN DE FLUJO EN CANALES ABIERTOS

Número adimensional	Relación	Régimen de flujo		
Froude	$F=V/(g*y)^{0.5}$	Subcrítico $F<1$	Crítico $F=1$	Supercrítico $F>1$
Reynolds	$Re=V*Rh/v$	Laminar $Re<500$	Transición $500<Re<12500$	Turbulento $12500<Re$
Vedernikov	$Ve=x*y*F$	Estable $V<1$	Neutral $V=1$	Inestable $V>1$

ELABORADO POR: Carrera J.

El número de Froude, para canales de alta pendiente, se lo calcula introduciendo el término $\cos(\theta)$ debido al efecto de la inclinación.

El número de Vedernikov mayor o igual a la unidad, indica la amplificación de las ondas (pulsantes o remolino) predominando el flujo no permanente. El flujo uniforme pasa a ser inestable cuando la velocidad del flujo es muy alta o la pendiente del canal es muy pronunciada.

El número de Reynolds, para un flujo turbulento en canales abiertos supera el valor de 12500, característico de las rápidas.

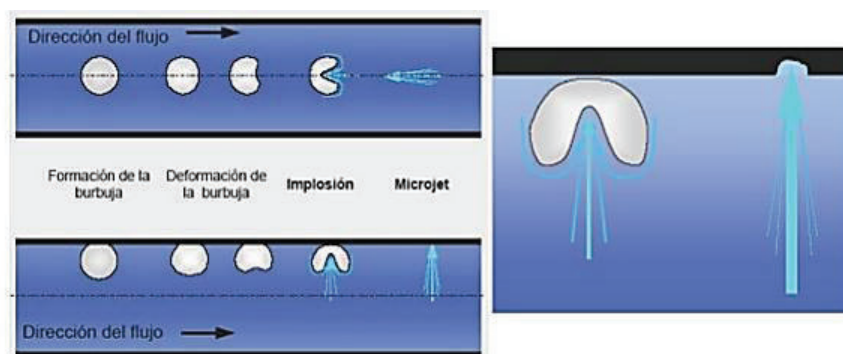
1.2.5 CAVITACIÓN

En el caso de las rápidas se manejan flujos de alta velocidad por lo que existe la posibilidad de que se presente el fenómeno llamado cavitación.

La cavitación es un fenómeno que ocurre en lugares en los que se presentan presiones negativas iguales o menores a la presión de vaporización, se generan burbujas o cavidades de vapor de agua en el flujo que son arrastradas hacia zonas de mayor vapor.

Si las burbujas de vapor de agua implosionan cuando están en contacto con la superficie de hormigón causan daños en la estructura hidráulica, ver Figura 1.6. El proceso de formación de las cavidades de vapor está dada en dos etapas: la primera etapa es de fase líquida a fase vapor y la segunda etapa de fase vapor a fase líquida.

FIGURA 1.6 PROCESO DE COLAPSO DE UNA BURBUJA Y EFECTOS DE LA IMPLOSIÓN DE LA BURBUJA EN LA SUPERFICIE DE CONTACTO



FUENTE: Marchegiani, A. 2006. Pág. 8

Arreguín (1992) señala que “Una vez que las cavidades se han formado, existe la posibilidad de que se separen burbujas llenas de vapor, que al pasar a una zona de mayor presión se condensan repentinamente con reducciones de volumen de 100 a 1000 veces, si ello sucede cerca de una frontera rígida inducirá esfuerzos de hasta 10 000 kg/cm², siendo esto el origen de los daños en las superficies expuestas a este fenómeno”⁶.

FIGURA 1.7 IMPLOSIÓN DE UNA BURBUJA



FUENTE: Marchegiani, A. 2006. Pág. 8

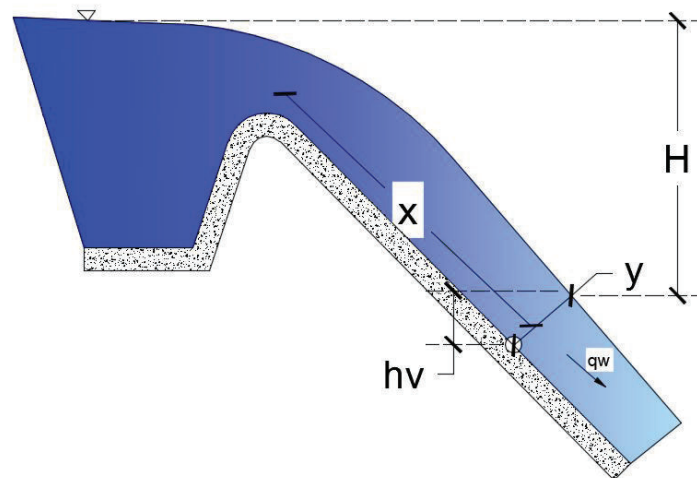
⁶ Arreguín Felipe, “Cavitación y Aireación en Obras de Excedencia”, 2005. Pág. 31

1.2.6 CRITERIOS PARA DETERMINAR POSIBLE CAVITACIÓN

Existen varios criterios para analizar si hay o no riesgo de cavitación, se establecen dos criterios para su evaluación: Criterio de Thoma y Criterio de Echávez, estos pueden ser utilizados para el diseño de obras, fiscalización o revisión de las ya construidas.

El método propuesto por Echávez G. (1979), emplea algunas condiciones hidráulicas de la superficie en estudio para la evaluación del índice de cavitación local σ_k , y propone la comparación con el índice de cavitación incipiente σ_{ki} , para determinar si existe o no cavitación. Los índices de cavitación incipiente son valores experimentales para superficies rugosas, donde k es la rugosidad equivalente de la superficie, o la altura de los escalones perpendiculares al flujo dejado por la cimbra.

FIGURA 1.8 PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN EL MÉTODO PROPUESTO POR ECHÁVEZ PARA DETERMINAR EL ÍNDICE DE CAVITACIÓN LOCAL



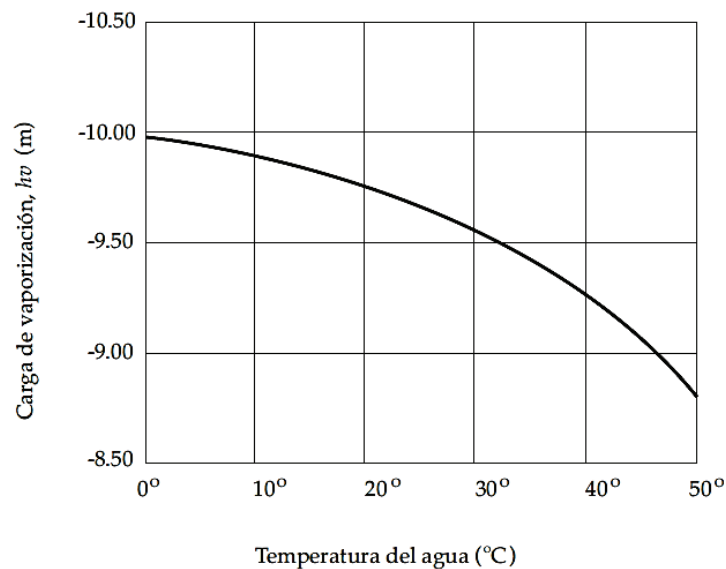
REALIZADO POR: Carrera J.

Para superficies rugosas, se puede calcular el índice de cavitación local σ_k , con la siguiente ecuación:

$$\sigma_k = \frac{hp - hv}{\frac{v_k^2}{2g}} \quad (1.15)$$

Donde, σ_k : Índice de cavitación local
 hp : Carga de presión del agua en la solera de la rápida
 hv : Carga de vaporización en el sistema barométrico. Ver Figura 1.9
 v_k : Velocidad del flujo a una distancia k de la superficie
 g : Aceleración de la gravedad
 k : Rugosidad equivalente de Nikuradse de la superficie

FIGURA 1.9 VARIACIÓN DE LA CARGA DE VAPORIZACIÓN DEL AGUA h_v VS. TEMPERATURA



FUENTE: Arreguín, F., & Alcocer, V., 2011, pág. 80

En el caso de curvas verticales cóncavas se debe multiplicar al índice de cavitación local por 0,76.⁷

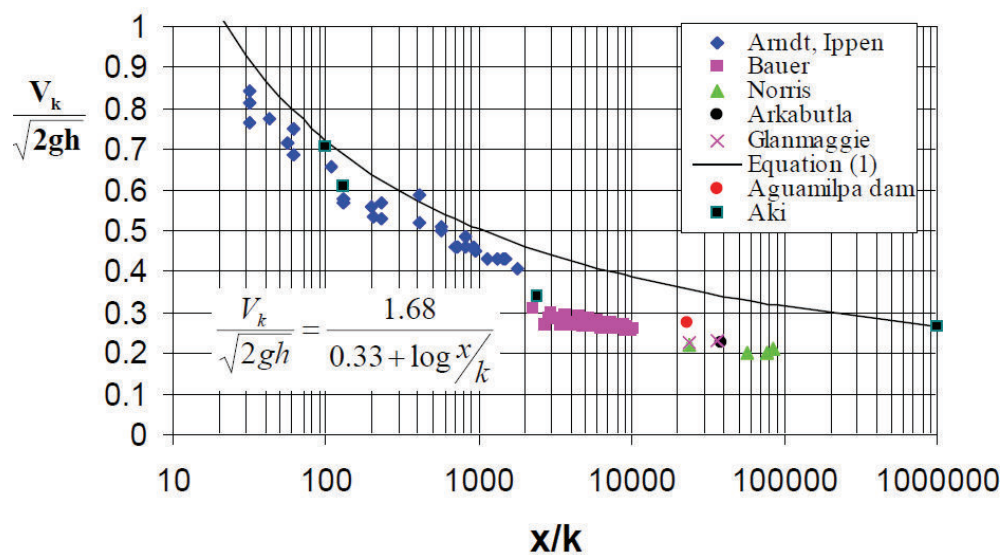
⁷ Ver Arreguín F., Alcocer V., "Diseño hidráulico de vertedores", pág 78, 2011.

Echávez y Ruiz (2006) proponen que la velocidad de flujo a una distancia k de la superficie, v_k , se calcula mediante la siguiente ecuación, sustentada en varios experimentos como lo muestra en la Figura 1.10.

$$\frac{v_k}{\sqrt{2gh}} = \frac{1,68}{0,33 + \log \frac{x}{k}} \quad (1.16)$$

Donde, h : altura medida desde la superficie libre del vaso a la superficie del escurrimiento
 x : Distancia desde la cresta al punto de análisis

FIGURA 1.10 DEFINICIÓN DE LA ECUACIÓN DE FLUJO A UNA DISTANCIA K DE LA SUPERFICIE MEDIANTE DATOS EXPERIMENTALES EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN X/K



FUENTE: Echávez, G., Ruiz G., 2006, pág. 4.

TABLA 1.3 ÍNDICES DE CAVITACIÓN INCIPIENTES RECOMENDADOS SEGÚN EL TIPO DE SUPERFICIE Y RANGOS DE RUGOSIDAD K

ÍNDICES DE CAVITACIÓN INCIPIENTES σ_{ki} RECOMENDADOS		
Tipo de superficie	Rango de rugosidad k	
	0 mm < k < 5 mm	5 mm < k < 10 mm
Superficies de hormigón	1.3	1.6
Superficies con cimbra	1.8	2.2

FUENTE: Echávez, G. 1969. Pág. 70

ELABORADO POR: Carrera J.

Echávez y Ruiz (2006), proponen un procedimiento en el que se observa que las irregularidades en la superficie determinan que velocidad debe calcularse, la velocidad v_k a una distancia k puede ser obtenida como se señala anteriormente, pero en caso de la velocidad v_b sobre una protuberancia puede ser obtenida mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{v_b}{v_k} = 0,68 \log \frac{b}{k} + 1 \quad (1.17)$$

Donde,

- v_k : Velocidad del flujo a una distancia k de la superficie
- v_b : Velocidad del flujo a una distancia b de la superficie
- b: Altura de la protuberancia
- k: Altura de la rugosidad equivalente de Nikuradse

Para determinar la posibilidad de que ocurra cavitación, se evalúa el riesgo mediante el índice de cavitación incipiente e índice de cavitación local como lo presenta la Tabla 1.4, basado en la rugosidad k y en el tipo de superficie como lo muestra la Tabla 1.3, según el rango en el que se encuentre, se establece el valor límite del índice de cavitación incipiente.

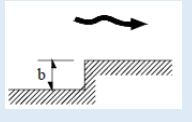
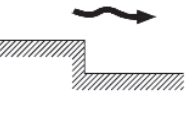
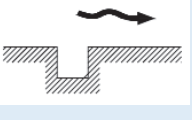
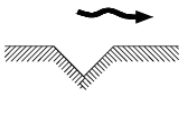
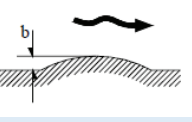
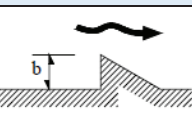
TABLA 1.4 EVALUACIÓN DE LA CAVITACIÓN SEGÚN ÍNDICES INCIPIENTES Y LOCALES

CAVITACIÓN	
Comparación	Evaluación
$\sigma_k > \sigma_{ki}$	No se presenta cavitación
$\sigma_k < \sigma_{ki}$	Existe el riesgo de cavitación

FUENTE: Camargo, J., Baldi, R. & Aquino, C. 2014. Pág. 1

ELABORADO POR: Carrera J.

FIGURA 1.11 VELOCIDADES CARACTERÍSTICAS E ÍNDICES DE CAVITACIÓN INCIPIENTES PARA DIFERENTES IRREGULARIDADES DE LA SUPERFICIE DE LA SOLERA

Irregularidad	Velocidad característica	Índice de cavitación incipiente σ_i
	V_b	2,4
	V_k	1,1
	V_k	1,5
	V_k	1,4
	V_b	1,4
	V_b	1,6

FUENTE: Echávez, G., Ruiz G., 2006, pág. 9

MODIFICADO POR: Jenny Carrera

Echávez (1979) expresa que en el caso de obras de excedencia, se relaciona a la cavitación con la aparición de las primeras manchas blancas en un flujo con velocidades altas.

El método propuesto por Thoma, permite determinar la presencia de cavitación, mediante el índice de cavitación crítico que está en función de las cargas de presiones: de la atmósfera, del agua y de vapor, de la velocidad media del flujo y la gravedad. (Citado en Camargo, Baldi, Aquino 2014)

$$\sigma_c = \frac{(h_a + h_p - h_v) * 2g}{V^2} \quad (1.18)$$

Donde,

- σ_c : Índice de cavitación crítico
- h_a : Presión atmosférica del sitio
- h_p : Presión del agua en la solera de la rápida
- h_v : Carga de presión de vapor en el sistema barométrico
- g : Aceleración de la gravedad
- V : Velocidad media del flujo

En este criterio, cuando el número de Thoma es menor a 0,20, existe cavitación.

1.2.7 LOS EFECTOS DEL AIRE EN LOS DAÑOS POR CAVITACIÓN⁸

Russell y Sheehan (1974) mencionan que la función del aire en el flujo permite: reducir la celeridad de la onda de choque, también la magnitud de las ondas de choque se reducen en la superficie de hormigón y amortigua el colapso de las cavidades.

⁸ Chanson, H., “Model Studies Of The Aeration Device Of The Clyde Dam Spillway, Aircold Bulletin No. 94.

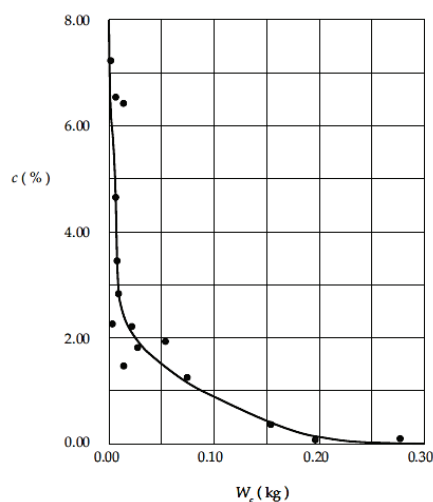
Falvey (1990) señala que los daños por cavitación disminuyen con el aumento de calado del flujo, es decir que el riesgo decrece mientras los índices de cavitación aumentan con la presión.

Peterka (1965 citado en Arreguín y Alcocer 2011) “estudió la relación entre concentración de aire y daños por cavitación para flujo de alta velocidad (30,00m/s), y encontró que para $c=7,40\%$ no se presentan daños en el concreto y que estos son pequeños para $c=2,00\%$. (p.88). Ver figura 1.12.

1.2.8 PÉRDIDAS DE HORMIGÓN CAUSADO POR LA CAVITACIÓN

Un criterio importante para prevenir la erosión por cavitación está basado en los resultados de los experimentos realizados por Peterka (1953), relacionando concentración de aire y daño por cavitación mediante pruebas en muestras de hormigón para flujos de alta velocidad (30m/s).

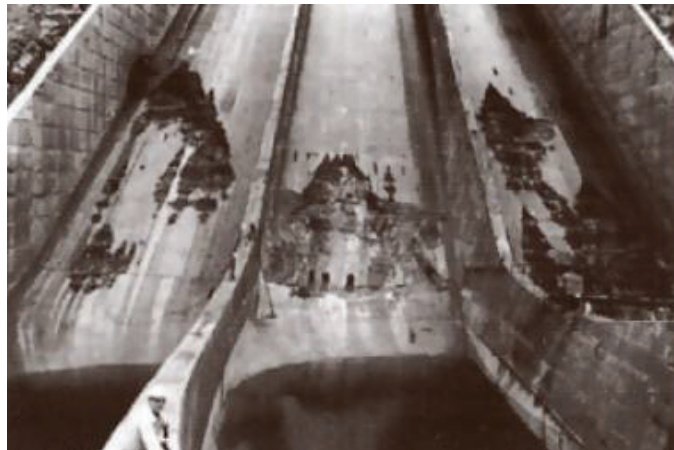
FIGURA 1.12 RESULTADO DE PRUEBAS REALIZADAS POR PETERKA (1965). PÉRDIDAS DE HORMIGÓN A CAUSA DE LA CAVITACIÓN EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE AIRE



FUENTE: Arreguín, F., & Alcocer, V., 2011, pág. 89

Los daños a causa de la cavitación y erosión en estructuras hidráulicas son comunes, a continuación se presentan fotografías que muestran los efectos de este fenómeno.

FOTOGRAFÍA 1.1 DAÑOS POR CAVITACIÓN EN LA SUPERFICIE DEL VERTEDERO



FUENTE: Tropea, Yarin & Foss, 2007, pág 960

FOTOGRAFÍA 1.2 DAÑOS POR CAVITACIÓN EN LA SUPERFICIE DE HORMIGÓN DEL VERTEDERO DE LA PRESA HÖLJES EN SUECIA



FUENTE: Pettersson, K., 2012, pág 3

1.2.8.1 Protección de la superficie de hormigón contra daños por cavitación

La superficie de hormigón de una rápida puede ser protegida de daños por cavitación mediante la aireación del flujo, la solución que se plantea es la implementación de un dispositivo llamado *aireador* que permita la introducción de aire de manera artificial.

1.2.9 AIREADOR

Es un dispositivo que permite la incorporación de aire al flujo, mediante la cavidad formada bajo la trayectoria que sigue el chorro. La función principal es evitar daños por cavitación y erosión de la superficie del hormigón. La literatura técnica proporciona varios tipos de aireadores, los cuales pueden ser combinados entre sí, según las condiciones de borde de la rápida. Arreguín, 1985, plantea que la solución para el manejo de caudales unitarios grandes es el aireador, que permite el ingreso de aire al flujo de forma artificial y evita el desgaste de la solera.

1.2.10 AIREACIÓN FORZADA

Es llamada artificial o inducida, se genera mediante la implantación de aireadores en rápidas de alta velocidad y a lo largo del canal de conducción del flujo.

1.3 OBJETIVOS, ALCANCE, LIMITACIONES Y JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el requerimiento de la aireación forzada en flujos de alta velocidad, para la prevención de efectos de cavitación en las rápidas y elaborar una hoja de cálculo con los principales criterios para el diseño del aireador, seleccionando un ejemplo de aplicación de la literatura técnica.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer criterios de diseño que permitan satisfacer el requerimiento de aireación forzada e identificar el aireador más común para el análisis de su funcionamiento.
- Elaborar una hoja de cálculo para el diseño del aireador seleccionado, en base a un ejemplo de aplicación de la literatura técnica, sujeto a criterios de diseño con sustento teórico.
- Emitir recomendaciones y conclusiones de la investigación realizada, mediante el análisis de los resultados obtenidos generados por la hoja de cálculo.

1.3.3 ALCANCE

La presente investigación busca plantear una metodología para definir el requerimiento de aireación forzada en flujos de alta velocidad, como prevención a los riesgos de cavitación. La investigación empezará por exponer los antecedentes de la problemática, estableciendo objetivos, alcances y limitaciones. Se

desarrollará un breve resumen acerca de los fenómenos que son parte del estudio así como también de los conceptos básicos para una mejor comprensión del fenómeno. Para el análisis del requerimiento de aireación forzada se establecerán pautas determinantes para el uso de aireadores. Los criterios de diseño serán definidos en base al dispositivo de aireación.

Se seleccionará un ejemplo de aplicación y posteriormente se implementará una hoja de cálculo para el diseño del aireador que conlleva a definir parámetros de diseño, según el caso de estudio que se proponga, permitiendo evaluar los resultados obtenidos sistemáticamente en base a condiciones de borde. Finalmente se emitirá conclusiones y recomendaciones correspondientes para el diseño óptimo del aireador en estudio.

1.3.4 LIMITACIONES

La investigación realizada está dirigida a establecer los aireadores más utilizados en la Ingeniería Hidráulica, al no haber una forma estandarizada de un aireador, la selección recae sobre el aireador más común, el mismo que será analizado sistemáticamente por una hoja de cálculo, en base a criterios de diseño establecidos en la literatura técnica.

Además cabe recalcar, que este es el paso inicial para la investigación física, en laboratorios de hidráulica de la Escuela Politécnica Nacional; plantear problemas de aireación en estructuras hidráulicas y dar solución mediante el uso de modelos a escala, permitiendo afianzar y validar los criterios teóricos y técnicos propuestos por distintos autores, pero acoplados a la realidad nacional.

1.3.5 JUSTIFICACIÓN

Con el desarrollo del presente trabajo, se pretende dar solución a problemas de aireación de flujos de alta velocidad producidos sobre superficies de estructuras hidráulicas como la rápida. En la actualidad, la realidad nacional presenta un desarrollo significativo del aprovechamiento de los recursos hídricos, por ende, el objeto de este estudio es proporcionar una solución mediante aireación forzada ante los problemas de cavitación y erosión en las rápidas, el contacto entre el agua y el hormigón produce desgaste de la superficie, y lo que se busca es prolongar la vida útil de la obra, evitando reparaciones y mantenimientos constantes en la superficie de contacto, y a la vez disminuyendo el tiempo de interrupción de la operación normal de las obras hidráulicas.

Además queda sentada la propuesta del análisis físico en laboratorio, para futuras investigaciones prácticas; y da pie al desarrollo de distintos temas para proyectos de titulación dentro de este amplio campo como lo es la aireación forzada.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DEL REQUERIMIENTO DE AIREACIÓN FORZADA

En este capítulo se analizará los requerimientos para una aireación forzada mediante el aireador, este dispositivo permite el ingreso de aire al flujo de agua de forma artificial.

2.1 ANÁLISIS DE CAVITACIÓN

El análisis de la cavitación permite evaluar el sitio en el que es posible ocurra el daño en la superficie del hormigón debido al fenómeno de cavitación.

En el numeral 1.2.5 del capítulo anterior se detalla a la cavitación y a los criterios que intervienen en la evaluación.

La importancia que se debe dar a la cavitación es alta, porque permite determinar el sitio en el que se implementará el primer aireador en la rápida.

2.2 ANÁLISIS DE CONCENTRACIÓN DE AIRE

En el estudio de Peterka (1965) se propone la relación entre la concentración de aire y los daños por cavitación para flujos de alta velocidad a partir de 30m/s, para concentraciones menores al 2% los daños en la superficie del hormigón son significativos.

Falvey (1979), relacionó la concentración media \bar{C} con el número de Froude.

Arreguín y Echávez (1984), propusieron la siguiente expresión que define la concentración de aire, basado en los efectos de la aireación en la región inferior de la solera.

$$c = \frac{Q_a}{Q_a + Q_w} = \frac{Q_a}{Q_m} \quad (2.1)$$

Donde, c: Concentración de aire
 Q_a: Caudal de aire
 Q_w: Caudal de agua
 Q_m: Caudal de la mezcla

La distribución de concentración de aire en flujo turbulento depende de la geometría del canal, características de las burbujas y condiciones hidráulicas del flujo.

Arreguín (2005) define a la concentración media \bar{c} , como:

$$\bar{c} = \frac{1}{y_m} \int_0^{y_m} c \cdot dy_0 \quad (2.2)$$

Donde, y_m: Profundidad de la mezcla
 c: Concentración de aire
 dy₀: Derivada del calado y₀

El caudal de la mezcla Q_m, está dado por:

$$Q_m = V_m \cdot b \cdot y_m \quad (2.3)$$

Donde, b: Ancho de la solera
 V_m: Velocidad de la mezcla

El caudal de agua Q_w, está dado por:

$$Q_w = (1 - \bar{c}) \cdot Q_m \quad (2.4)$$

$$Q_w = V_w \cdot b \cdot y_w \quad (2.5)$$

$$V_m = \frac{Q_w}{(1 - \bar{c}) \cdot b \cdot y_m} \quad (2.6)$$

Donde, Q_w : Caudal de agua
 Q_m : Caudal de la mezcla
 V_w : Velocidad de agua
 y_m : Calado del agua

El número de Froude para flujo aireado Fr_a es el siguiente:

$$Fr_a = \frac{V_m}{(g \cdot y_m)^{1/2}} \quad (2.7)$$

Para un flujo no aireado Fr_w , y flujo aireado Fr_a , la relación del número de Froude y la concentración media está dada por:

$$Fr_w = (1 - \bar{c}) \cdot \frac{Q_m}{g^{1/2} \cdot b \cdot y_w^{3/2}} \quad (2.8)$$

$$Fr_a = \frac{Q_w}{(1 - \bar{c}) \cdot g^{1/2} \cdot b \cdot y_m^{3/2}} \quad (2.9)$$

Donde, Fr_w : Número de Froude del agua
 Fr_a : Número de Froude del aire

Dadas las ecuaciones anteriores se puede concluir para un flujo no aireado el número de Froude es menor en comparación con el número de Froude para flujo aireado, solamente al comparar que el término $(1 - \bar{c})$ pasa de numerador a denominador, cuyo valor es menor a la unidad. La relación V_w/V_m es directamente proporcional a la relación y_m/y_w , y por lo tanto, el caudal del agua es directamente proporcional al caudal de la mezcla con respecto a la concentración media.

Medina & Soriano (1992), señalan que la aireación no debe ser menor que:

$$C = 8\% + L * \Delta C\% \quad (2.10)$$

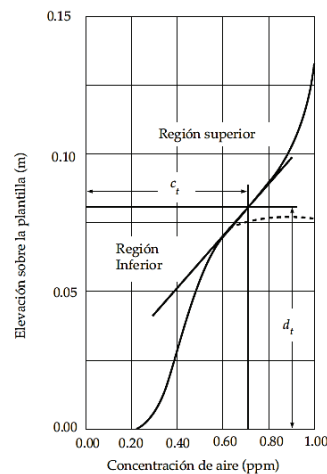
Donde, L: Distancia a lo largo de la rápida

ΔC : Pérdida de la concentración de aire por metro lineal. Ver Tabla 2.1

2.2.1 DIVISIÓN DEL FLUJO EN REGIONES EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE AIRE

Straub y Anderson (1960 citado en Arreguín y Alcocer 2011) proponen dividir al flujo en dos regiones en función de la concentración de aire; la región superior consiste en la mezcla de agua y aire en forma de rocío y la inferior consiste en burbujas de aire distribuidas en el flujo debido a la turbulencia y fluctuación del flujo, a una distancia de transición d_t . Como se observa en la Figura 2.1.

FIGURA 2.1 DIVISIÓN DEL FLUJO EN REGIONES: SUPERIOR E INFERIOR SEGÚN LA ELEVACIÓN SOBRE EL FONDO Y LA CONCENTRACIÓN DE AIRE, STRAUB Y ANDERSON, 1960



Fuente: Arreguín, F., 2005, pág. 42

2.2.2 ANÁLISIS DE LA AIREACIÓN

El caudal de aire incorporado al flujo de agua depende de: la geometría del aireador (tipo de dispositivo empleado en el diseño), del suministro de aire (área del ducto de ingreso de aire), y de la longitud del salto (trayectoria recorrida).

El caudal unitario de aire puede calcularse en función de la velocidad sobre la rampa y de la longitud de la cavidad, según Hamilton (1980 citado en Arreguín y Alcocer 2011).

$$q_a = \frac{Q_a}{b} = K \times V \times L \quad (2.11)$$

Donde, q_a : Volumen de aire demandado por el chorro, por unidad de tiempo y por unidad de ancho.

V : Velocidad media sobre la rampa

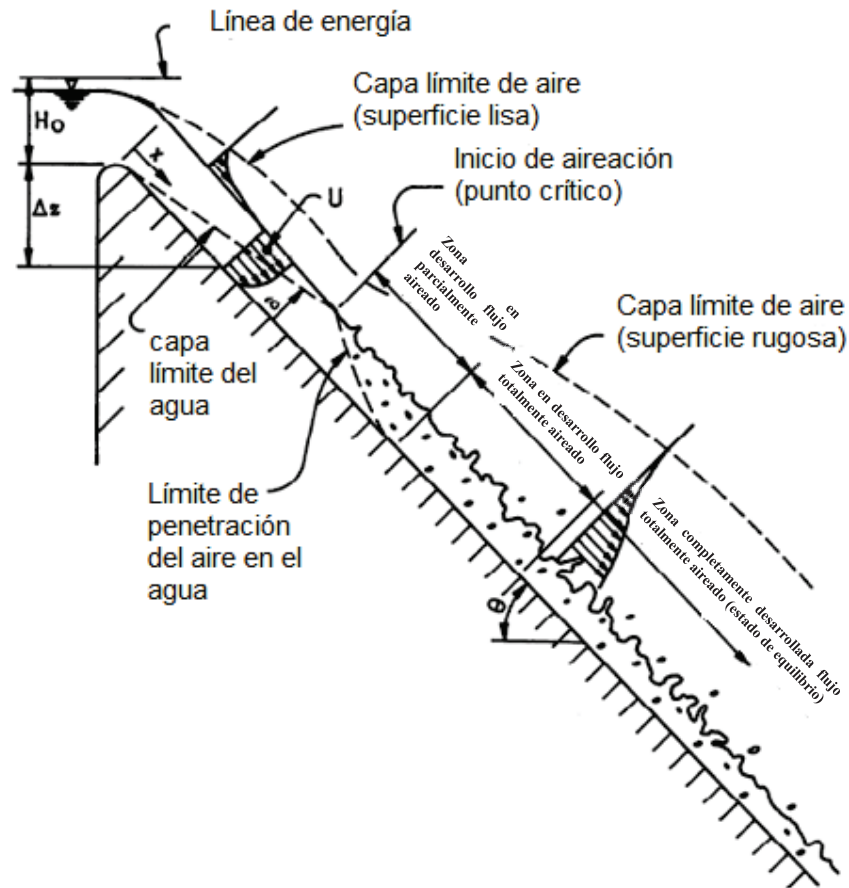
K : Constante. Según Hamilton (1980) está en el rango (0,01 a 0,035). Para un diseño preliminar se puede asumir el valor medio, igual a 0,03.

L : Longitud de la cavidad

2.3 INCORPORACIÓN DE AIRE EN EL FLUJO DE CANAL ABIERTO

La Figura 2.2 representa el desarrollo de un flujo propuesto por Falvey (1980), en la que se observa un vertedero seguido de una rápida, está caracterizado por la identificación de zonas según el comportamiento de la mezcla agua-aire.

FIGURA 2.2 ZONAS DE FLUJO. INCORPORACIÓN DE AIRE EN UNA ESTRUCTURA. DESARROLLO DE UN FLUJO SEMI-AIREADO EN UN CANAL ABIERTO



FUENTE: Falvey H., EM41, 1980. Pág 68

MODIFICADO POR: Carrera J.

- Zona sin arrastre de aire, se considera un flujo no aireado con la capa límite turbulenta bajo la lámina de agua. Se establece como punto de inicio la inclusión de aire en el flujo, es ahí donde la capa límite turbulenta llega a la superficie de agua.
- Zona en desarrollo, se trata de un flujo gradualmente variado debido a que las concentraciones de aire varían con la distancia.

- Zona en desarrollo con flujo parcialmente aireado, la aireación no se desarrolla por completo y el aire que ingresó al volumen de agua no ha alcanzado la solera del canal.
- Zona en desarrollo con flujo totalmente aireado, esta zona está completamente aireada, es decir que el aire ha alcanzado la solera de canal, pero la concentración de aire varía con la distancia.
- Zona completamente aireada, está en equilibrio por lo que se trata como un flujo uniforme, la concentración de aire es constante.

2.4 DESAIREACIÓN

La desaireación es producida por la pérdida de aire en el flujo debido principalmente a la fluctuación y difusión de las burbujas. Las pérdidas de aire por metro lineal son propuestas por Prusza, Mantellini & Semenkov (1983 citado en Arreguín y Alcocer 2011). Ver Tabla 2.1.

Este parámetro debe considerarse aguas abajo del aireador ya que la concentración de aire va disminuyendo; Cuando la concentración llegue a valores aproximados al 8% será necesario colocar otro aireador, este procedimiento debe ser tomado en cuenta en toda la longitud de la rápida e implementarse los aireadores requeridos. (Medina & Soriano, 1992)

TABLA 2.1 PORCENTAJES DE PÉRDIDAS DE AIRE POR METRO LINEAL PROPUESTO POR PRUSZA, MANTELLINI & SEMENKOV

Tipo de tramo	Porcentaje de pérdidas
Recto	0,15% – 0,20% por metro lineal
Cóncavo	0,50% – 0,60% por metro lineal
Convexo	0,15% – 0,20% por metro lineal

FUENTE: Arreguín, F., y Alcocer V., 2011, pág. 95.

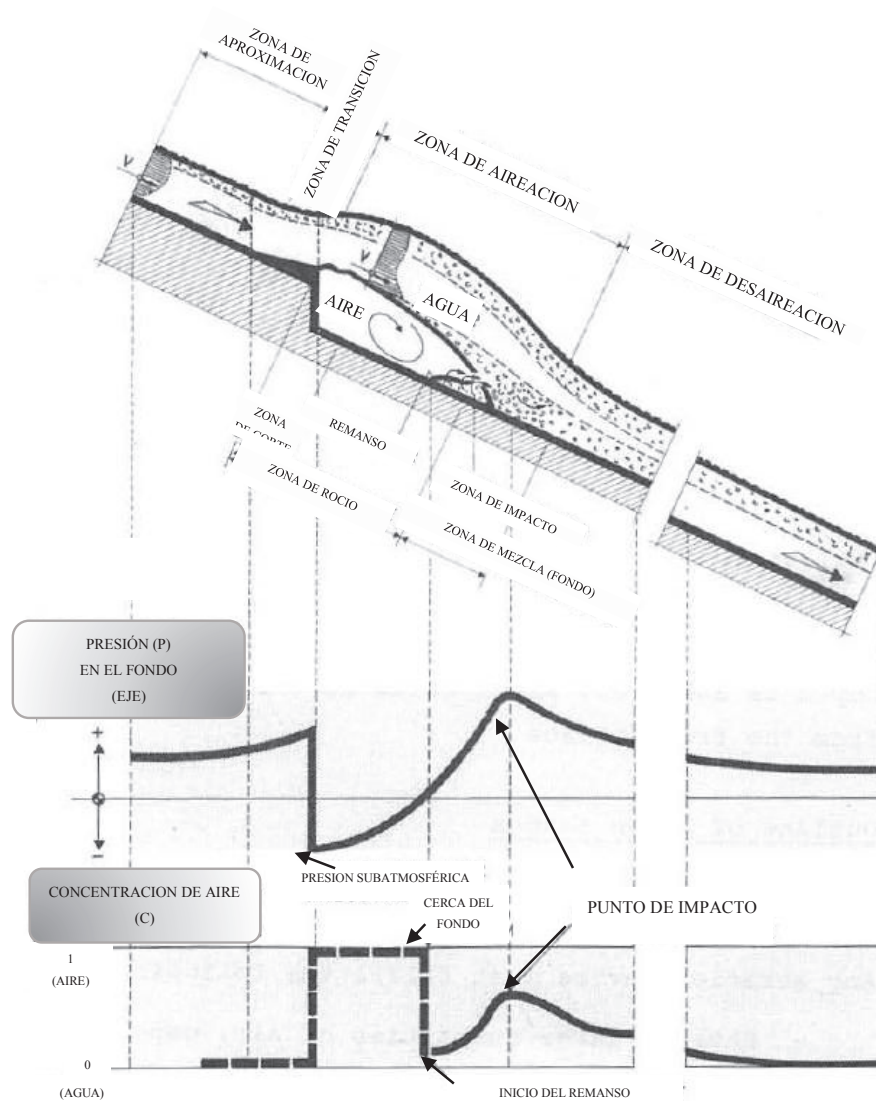
2.5 FUNCIONAMIENTO DEL AIREADOR

En una rápida, el flujo atrapa aire en su superficie libre, conocido como auto-aireación; en caso de no tener suficiente aireación en el flujo para evitar daños en la superficie de hormigón se requiere de dispositivos de aireación que permitan el ingreso de aire. La función de un aireador es proteger la solera de la rápida, consiste en despegar el flujo de la solera, para generar aireación bajo la cavidad formada por el flujo.

El modelo presentado por Volkart P. y Rutchmann P., en 1984, permite comprender el funcionamiento del aireador mediante la división del flujo en cuatro zonas: de aproximación, de transición, de aireación y de desaireación, como lo muestra la Figura 2.3.

La zona de aproximación depende de las condiciones aguas arriba del aireador. La zona de transición depende del tipo de aireador. La zona de aireación en una rápida se divide en las siguientes subzonas: de cortante, de spray y de mezcla; en la zona de cortante se inicia el movimiento de aire en la cavidad; en la zona de aireación en spray el flujo atrapa el aire debido a la superioridad de la energía de turbulencia respecto de la tensión.; y en la zona de aireación de mezcla corresponde al lugar donde el chorro choca con la solera de la rápida. En la zona de desaireación el aire empieza a salir por medio de las burbujas, hacia la superficie.

FIGURA 2.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE AIREADORES, VOLKART P., RUTCHMANN P., (1984)



FUENTE: Vischer D., 1984, pág. 9

MODIFICADO POR: Carrera J.

Echávez G.- Arreguín F., 1982, señalan que a causa de la bifurcación del chorro ocurre un retroceso del flujo hacia aguas arriba de la zona.

El funcionamiento del aireador depende de variables como: longitud del chorro, caudal de aire, subpresión de la cavidad y velocidad del flujo de aire en el ducto.

2.6 ANÁLISIS DE REPORTES TÉCNICOS

2.6.1 EJEMPLOS DE AIREADORES IMPLANTADOS EN LAS OBRAS HIDRÁULICAS

TABLA 2.2 RESUMEN DE AIREADORES IMPLANTADOS EN LAS OBRAS HIDRÁULICAS DE VARIOS PAÍSES. DATOS HIDRÁULICOS, PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS Y OBSERVACIONES (A)

OBRA	DATOS HIDRÁULICOS	CARACTERÍSTICAS Y OBSERVACIONES
Presa Alicura Argentina	V=45m/s q _w =77m ² /s α=19.3°	Cuatro aireadores combinados (rampa-ranura) en vertedero.
Presa Alicura Argentina	V=44,5m/s Q=600,0m ³ /s α=0,65°	Un aireador de salida
Presa Ullum Argentina	Q=2560,0m ³ /s α=14,0°	Aireador con deflector lateral de altura 0,5m
Vertedor de la presa Foz do Areia Brazil	Q=11000,0m ³ /s V=43m/s α=14,5°	Se implantaron 3 aireadores combinados (rampa, grada y ranura) Altura de presa de 160,0m
Presa Fengjjahan China	Q=1140,0 m ³ /s α ₁ =26,56° α ₂ =0,86°	Dos aireadores. El aireador 1 combinado con rampa y ranura y el aireador 2 con rampa.
Toma de la presa Calacuccia. Francia	Q= 100,0m ³ /s, α=4,17°	La conforman 4 aireadores con grada y ranura. No se han registrado daños en el hormigón.
Presa King Talal Jordania	q _w =62m ² /s	La aireación está dada por un deflector lateral con rampa y grada.
Presa M' Jara. Marruecos	Q=1400,0 m ³ /s V=35m/s	Aireación con rampa y grada lateral de 1m en túnel D=10m
Presa Clyde Nueva Zelanda	V=28m/s q _w =80m ² /s α=50.2°	Aireador combinado (rampa, grada, ranura)
Presa Tarbela Pakistán	Q=2690,0 m ³ /s V=49m/s	La conforman 2 túneles de vertido
Presa Mantaro Perú		Un aireador combinado (rampa, grada y ranura)
Toma de la presa Grand Coulee	61,0 a 76,0 m de carga	Registraba daños por cavitación, en 1960 se construyen aireadores dando como resultado cero daños.

FUENTE: Arreguín F., 1985, págs 55-63 y Pettersson K., 2012, págs. 17-18.

ELABORADO POR: Carrera J.

TABLA 2.3 RESUMEN DE AIREADORES IMPLANTADOS EN LAS OBRAS HIDRÁULICAS DE VARIOS PAÍSES. DATOS HIDRÁULICOS, PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS Y OBSERVACIONES (B)

OBRA	DATOS HIDRÁULICOS	CARACTERÍSTICAS Y OBSERVACIONES
Vertedor de la presa Yellow Tail	Q=2600,0m ³ /s, H=147,70m	Registraba velocidades de hasta 49,0m/s, con graves daños por cavitación, la solución fue la construcción de aireadores de 0,90m x 0,90m
Toma de la presa Mica	Q=1000,0m ³ /s, H=61m	Se construyeron dos aireadores por diferencias de nivel entre tramos. 1985
Vertedor de la presa Bratsk	Altura de presa 100m, pendiente de la rápida 1:0,80	El aireador se lo implantó en el vertedero a 30,0m aguas abajo de la cresta, tiene un deflector hueco.
Vertedor en túnel de la presa Nurek	Q=2400,0m ³ /s V=42m/s	Con velocidades de hasta 42,0m/s, se implantó la solución de 8 aireadores
Presa San Roque	Q=12800,0m ³ /s V=45m/s el canal de descarga tiene una pendiente de 1:4	En esta presa se construyeron 3 aireadores con deflector para evitar erosión por cavitación, puesto que se tenían velocidades de hasta 45m/s, 1982
Vertedor de la presa General Ramón Corona. México	Q=4000,0m ³ /s	El aireador construido en esta presa fue el primero diseñado en México en 1999
Vertedor de la presa Luis Donaldo Colosio México	Q=22,445 m ³ /s	En este canal se construyeron 3 aireadores, 2005
Vertedor del P.H. Aguamilpa. México	Q=14936,0 m ³ /s	Contiene dos canales de descarga con una línea de aireación a 48,0m del cimacio.
Vertedor de la presa Corral de Palmas México	Q=2660,0 m ³ /s	Tiene un aireador a 48,0m del cimacio.
P.H. El Cajón	Q=14864,0 m ³ /s	En este proyecto se construyó con 5 aireadores ubicados cada 100m entre ellos. Constituido por un escalón deflector y rampa. 2005

FUENTE: Arreguín F., 1985, págs 55-63 y Pettersson K., 2012, págs. 17-18.

ELABORADO POR: Carrera J.

2.6.1.1 Análisis comparativo de la información técnica existente

Criterios basados en reportes técnicos

- Pinto S., Neidert S.H., (1982), existen reportes de que se ha colocado solo un aireador que protege 100m de rápida.
- Según reportes de operación en la presa Nurek los espaciamientos entre aireadores de 10m, 12m, 14m y 15m, informan que el número de aireadores es excesivo.

El espaciamiento entre aireadores implementadas en cada proyecto desarrollado para los distintos aireadores colocados a lo largo de las rápidas, se establece una tabla de resumen que permite conocer un valor promedio de 76m de longitud de rápida para la ubicación de un aireador

TABLA 2.4 RESUMEN DE ESPACIAMIENTO ENTRE AIREADORES DE LOS DISTINTOS PROYECTOS, CON BASE EN LA INFORMACIÓN RECOPIADA.

ESPACIAMIENTO ENTRE AIREADORES					
PROYECTO	Distancia 1 (m)	Distancia 2 (m)	Distancia 3 (m)	Distancia 4 (m)	Promedio (m)
PROTOTIPO (recomendación)	90-130				110
FOZ DE AREIA	100				100
EMBARCACAO	100				100
EL CAJON	242	100			171
PRESA CALACUCCIA	10				10
PRESA BRATSK	41,4				41,4
PRESA NUREK	10	12	14	15	12,75
FOZ DE AREIA	72	90			81
GURI	5	150			77,5
AGUAMILPA	48				48
P.H. SAN ROQUE	50	60			55
VOLKART & RUTCHMANN	30 a 90				60

ELABORADO POR: Carrera J.

Escalas de modelos físicos en laboratorios hidráulicos

La información recopilada da a conocer las escalas utilizadas en los modelos físicos hidráulicos de varios proyectos y de experiencias de autores.

TABLA 2.5 ESCALAS DE MODELOS FÍSICOS IMPLEMENTADAS EN VARIOS PROYECTOS

PROYECTO / AUTOR	ESCALA	OBSERVACIONES
P. Guavío	1:50	Estudio de velocidades y presiones
P. Guavío	1:20	Estudio de la aireación
P. Reventazón	1:100	Escala geométrica $Le=100$
Koschitsky & Kobus	1:3,75	Estudio de 2 tipos de aireadores
Presa Holjes	1:50	Medición de calados y velocidades
VOLKART & RUTCHMANN	1:100	Estudio de trayectoria del chorro
VOLKART & RUTCHMANN	1:10 1:15	Diseño de aireador
PINTO	1:8 1:50	
PINTO	1:30 1:50	La demanda de aire fue correcta dolo para caudales grandes

ELABORADO POR: Carrera J.

Registros de longitud del chorro en laboratorio

Camargo, Baldi y Aquino (2014) realizaron un modelo físico con aireador combinado, las mediciones de longitud del chorro en laboratorio fueron las descritas a continuación en la Tabla 2.3, dando como promedio 16,73m para una altura de rampa de 0,40m y de 23,4m para una altura de rampa de 0,50m; la longitud calculada para una altura de rampa de 0,40m es de 24,74m, por lo tanto la longitud medida en laboratorio menor a la calculada.

TABLA 2.6 LONGITUD DEL CHORRO REGISTRADA EN EL MODELO FÍSICO DEL P.H. REVENTAZÓN EN COSTA RICA CON DESCARGAS LIBRE Y CONTROLADA PARA UNA GAMA DE CAUDALES Y ALTURA DE RAMPA DE 0,40M Y 0,50M.

Longitud del chorro registrada en el modelo fisico				
Descarga	Caudal (m3/s)	Nivel embalse (msnm)	Longitud chorro Tr=0,40m	Longitud chorro Tr=0,50m
Controlada	1900	265	16,7	22,9
Controlada	3100	265	18,6	
Controlada	4200	265	18,7	26
Controlada	5400	265	18,1	
Controlada	6400	265	17,5	24,3
Libre	7000	262,5	15,6	
Libre	8000	263,9	15,5	22,1
Libre	9000	265,1	15	
Libre	10000	266,3	14,9	21,7
		Promedio	16,73	23,4

ELABORADO POR: Carrera J.

2.6.2 FOTOGRAFÍAS DE AIREADORES IMPLEMENTADOS EN OBRAS HIDRÁULICAS EN MODELO Y PROTOTIPO

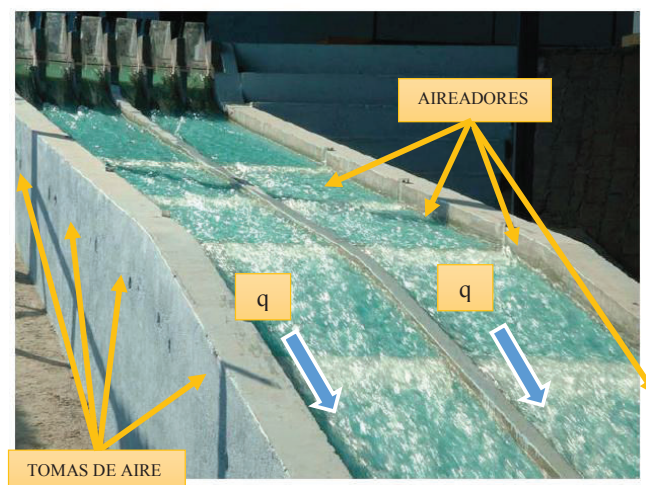
FOTOGRAFÍA 2.1 AIREADOR EN MODELO HIDRÁULICO DEL VERTEDERO DE LA PRESA ZAPOTILLO EN MÉXICO



FUENTE: Toapaxi, J., 2014

MODIFICADO POR: Carrera J.

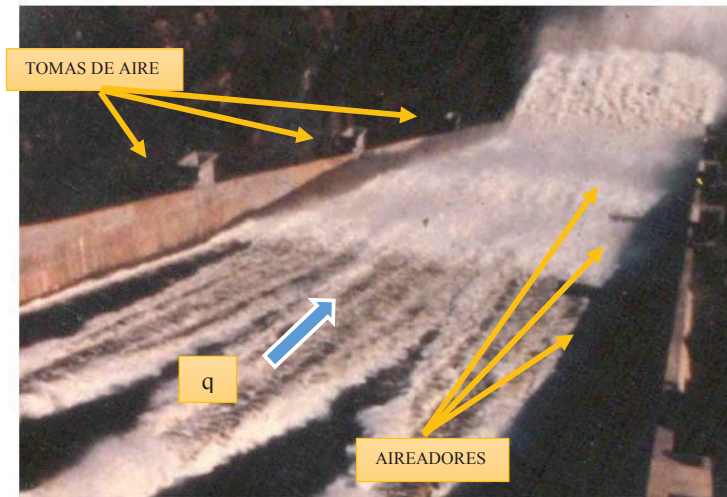
FOTOGRAFÍA 2.2 AIREADOR EN MODELO FÍSICO DE LA PRESA EL CAJÓN QUE CONSTA DE CUATRO AIREADORES INSTALADOS



FUENTE: Chanson H., Lubin, P., 2010

MODIFICADO POR: Carrera J.

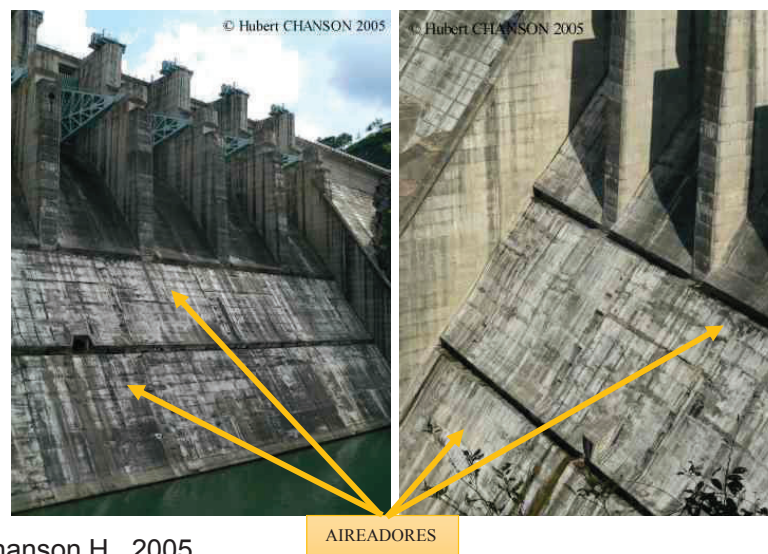
FOTOGRAFÍA 2.3 AIREADORES Y DUCTOS DE AIRE EN EL VERTEDERO DE LA PRESA FOZ DO AREIA



FUENTE: Chanson H., Lubin, P., 2010

MODIFICADO POR: Carrera J.

FOTOGRAFÍA 2.4 DISPOSITIVOS DE AIREACIÓN. PRESA CHUNGJU EN COREA.



FUENTE: Chanson H., 2005

MODIFICADO POR: Carrera J.

FOTOGRAFÍA 2.5 DETALLE DE LA PRIMERA RANURA DE AIREACIÓN. SITUADO AGUAS ABAJO DE COMPUERTAS. PRESA CHUNGJU EN COREA



FUENTE: Chanson H., 2005

MODIFICADO POR: Carrera J.

FOTOGRAFÍA 2.6 ÚLTIMA RÁPIDA DEL VERTEDERO AUXILIAR DE LA PRESA SAYANO SHUSHENSKAYA



FUENTE: <https://presasuba.files.wordpress.com/2013/11/2010-09-1.jpg>

MODIFICADO POR: Carrera J.

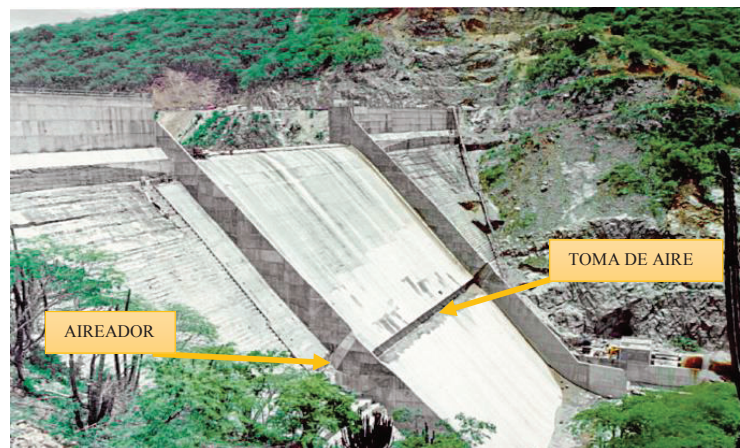
FOTOGRAFÍA 2.7 DISPOSITIVOS DE AIREACIÓN. PRESA CHUNGJU EN COREA



FUENTE: <https://presasuba.files.wordpress.com/2013/11/2012-03-28.jpg>

MODIFICADO POR: Carrera J.

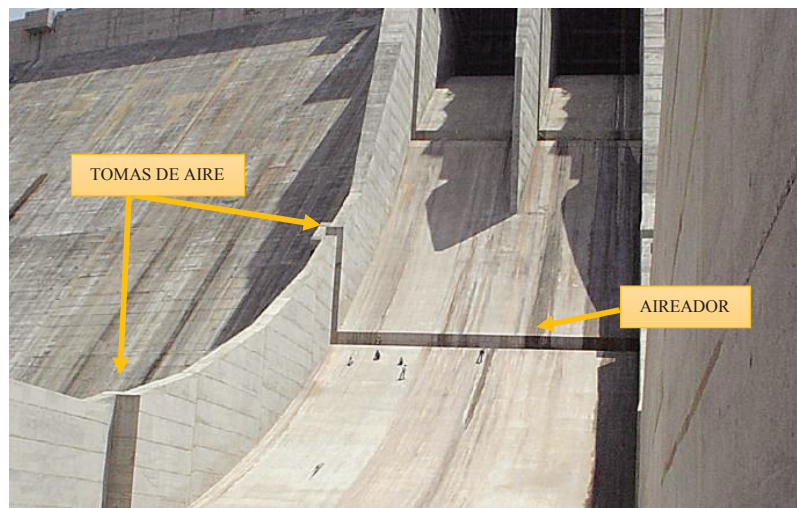
FOTOGRAFÍA 2.8 AIREADOR DE LA PRESA TRIGOMIL EN MÉXICO



FUENTE: Arreguín, F., & Alcocer, V., 2011, pág. 98

MODIFICADO POR: Carrera J.

FOTOGRAFÍA 2.9 AIREADOR DE LA PRESA HUITES



FUENTE: Arreguín, F., & Alcocer, V., 2011, pág. 100

MODIFICADO POR: Carrera J.

FOTOGRAFÍA 2.10 AIREADORES DE LA PRESA AGUAMILPA



FUENTE: Arreguín, F., & Alcocer, V., 2011, pág. 100

MODIFICADO POR: Carrera J.

FOTOGRAFÍA 2.11 AIREADOR DE LA PRESA CORRAL

FUENTE: Arreguín, F., & Alcocer, V., 2011, pág. 101

MODIFICADO POR: Carrera J.

FOTOGRAFÍA 2.12 AIREADORES DE LA P. H. EL CAJÓN

FUENTE: Arreguín, F., & Alcocer, V., 2011, pág. 102

MODIFICADO POR: Carrera J.

2.7 JUSTIFICACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN AIREADOR EN LA RÁPIDA

En una rápida, el flujo atrapa aire en su superficie libre, conocido como auto-aireación; en caso de no tener suficiente aireación en el flujo para evitar daños en la superficie de hormigón, se requiere de dispositivos de aireación, llamados aireadores, que permitan el ingreso de aire. La función de un aireador es proteger la solera de la rápida, consiste en despegar el flujo de la solera, mediante una rampa, para generar aireación bajo la cavidad formada por el flujo. En la literatura se encuentran varias formas de aireadores, entre la más utilizada está la combinada por: rampa, ranura y grada.

El desarrollo de este trabajo de investigación se centra en un aireador de fondo combinado situado en la solera de la rápida incorporado un sistema de suministro de aire, la selección de este tipo de aireador es debido a que se compone de tres aireadores simples, este aireador combinado es el seleccionado para la implementación de la hoja de cálculo.

2.8 CONCLUSIONES

- El análisis del requerimiento de aireación forzada permite conocer la vulnerabilidad de la rápida con flujo supercrítico e inestable ante el riesgo de que ocurra la cavitación.
- Entre los principales requerimientos para establecer aireación forzada está el índice de cavitación. Entre los criterios que se han seleccionado para el análisis del riesgo de cavitación son: Criterio de Thoma y Criterio de Echávez. En caso de aparecer el fenómeno de cavitación en una sección debe colocarse un aireador.
- La solución planteada ante el posible riesgo de cavitación es la implementación de un dispositivo que permita el ingreso de aire requerido al flujo, llamado aireador, como lo presenta la literatura técnica, este tipo de

solución hidráulica tiene un buen funcionamiento en proyectos hidroeléctricos que se encuentran operativos.

- La incorporación de aire en el flujo de canal abierto se lo realiza mediante el ingreso de aire, por medio de ductos, hacia la cavidad formada por la trayectoria del chorro, las presiones negativas admiten la absorción de este caudal de aire y su distribución en el flujo de agua, permitiendo airear el flujo aguas abajo del aireador, evitando la cavitación
- El análisis de la concentración de aire en el flujo ayuda a conocer si el flujo requiere de otro aireador aguas abajo del primero, para cuando las concentraciones de aire llegan hasta el 8%.
- La subpresión (Δp) se genera en la cavidad bajo el chorro y se relaciona con el caudal de aire. A mayor subpresión mayor caudal de aire.
- La longitud del salto depende de la magnitud de la subpresión en la cavidad. A mayor subpresión menor longitud de salto.

CAPÍTULO 3

CRITERIOS DE DISEÑO

Los criterios de diseño para aireadores son propuestos por varios investigadores, en el presente capítulo se expone algunos métodos para el diseño de un aireador, permitiendo la incorporación de aire al flujo y protegiendo a la superficie de hormigón de posibles daños por cavitación y erosión. Se inicia con una breve descripción de los tipos de aireadores, ubicación en la rápida, criterios para el diseño de los componentes de un aireador, metodologías (procedimientos de diseño) y funcionamiento del aireador.

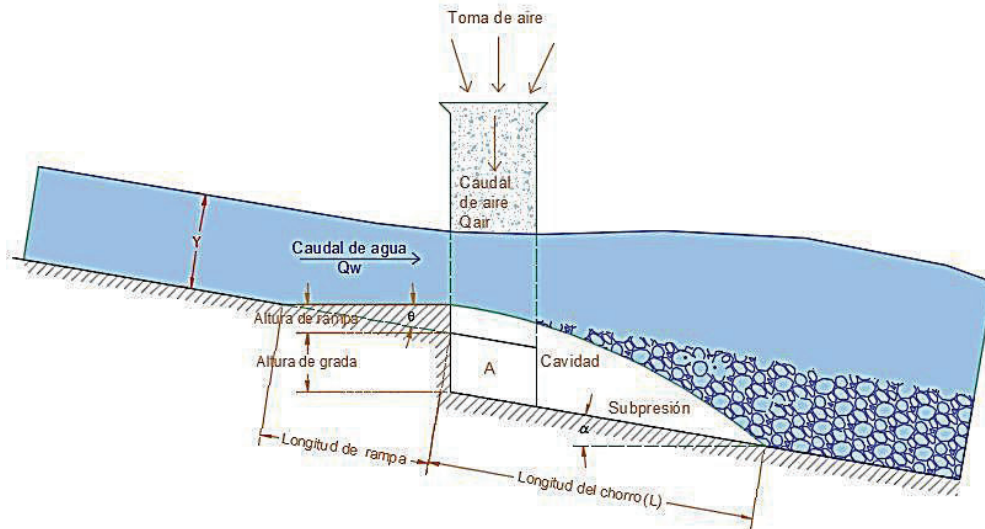
A continuación se exponen los criterios de diseño propuestos por Falvey, Hager & Rutschmann, y Kökpınar & Gögüs , a los que denominaremos “Métodos”, conforme a lo descrito en cada uno, se propone su aplicación en un ejemplo práctico en el siguiente capítulo.

3.1 ESTRUCTURA DE UN AIREADOR

El aireador es una solución física al fenómeno de cavitación que ocurre en las rápidas con flujos de alta velocidad, permitiendo el ingreso de aire al flujo, produciéndose una aireación forzada, necesaria para evitar daños en la estructura hidráulica.

El diseño de un aireador consiste en determinar el sitio de implantación del aireador, dimensionar los componentes del aireador (ranuras, deflectores, escalones, etc.), así como también el conducto de suministro de aire según el diseño geométrico y dependiendo de los requerimientos de la rápida.

FIGURA 3.1 PARÁMETROS PRINCIPALES QUE INTERVIENEN EN LA RÁPIDA, AIREADOR Y SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE.

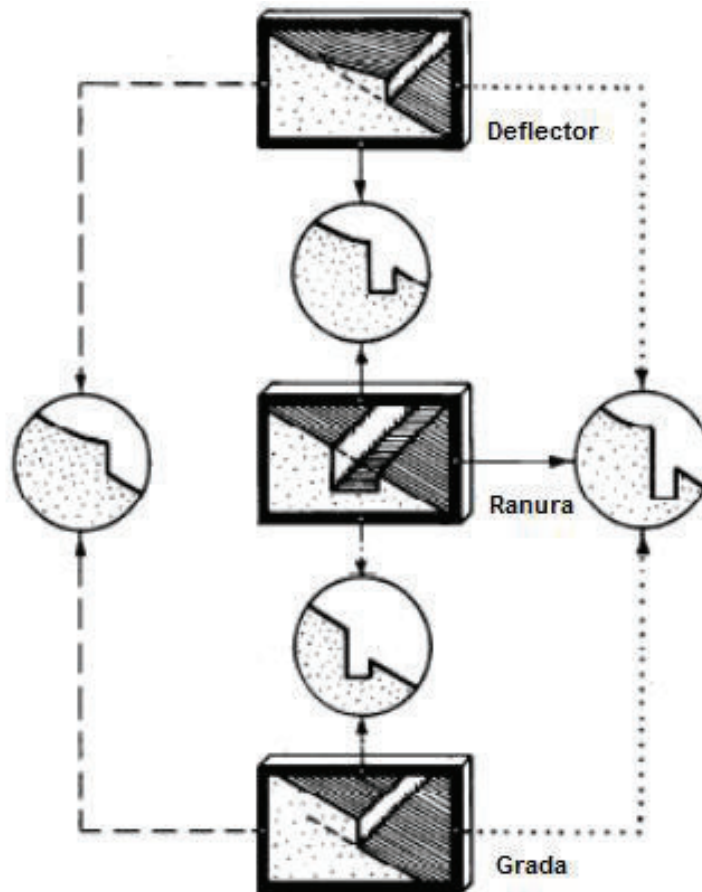


ELABORADO POR: Carrera J.

3.1.1 TIPOS DE AIREADORES

Existen diferentes tipos de aireadores, por lo general están compuestos de ranuras, deflectores, escalones o de sus combinaciones (Arreguín & Alcocer, 2011). En la Figura 3.2 se presenta los tipos de aireadores. La geometría del aireador varía según las necesidades de la obra con el fin de separar el agua de la superficie de la rápida, forma parte de un aireador la toma o ducto de aire.

FIGURA 3.2 TIPOS DE AIREADORES Y SUS COMBINACIONES. VISCHER



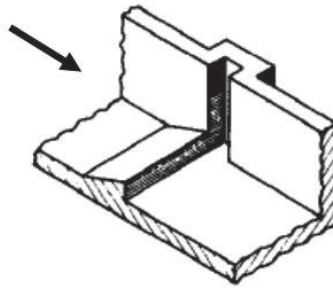
FUENTE: Falvey H., 1990, pág. 60.

MODIFICADO POR: Carrera J.

3.1.1.1 Ranuras

Su función es permitir el ingreso de aire a través de todo el ancho del aireador. La ventaja de este tipo de aireador es su fácil La operación de las ranuras tiene varias desventajas cuando trabajan con caudales bajos, su sección se ahoga, y presenta problemas con el drenaje, debido a la acumulación de agua.

Rampa con ranura en la pared lateral, permite el ingreso de aire por la ranura lateral

FIGURA 3.3 RAMPA DE FONDO Y RANURA EN LA PARED LATERAL

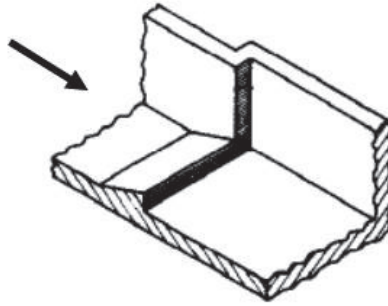
FUENTE: Falvey H., 1990, pág.63

3.1.1.2 Deflector o Rampa

La función del deflector o rampa es despegar la masa de agua de la superficie de contacto para que ingrese aire bajo el flujo debido a su disposición en la rápida. La trayectoria que realiza el flujo depende de la geometría de la rampa. Aguas abajo, a cierta distancia de la rampa se impactará el chorro aireado, permitiendo la protección de la superficie de contacto y evitando daños por cavitación.

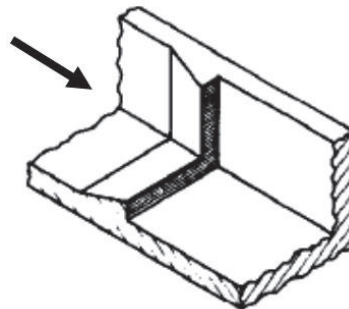
Las rampas presentan ciertas desventajas como: la limitación en la gama de caudales ya que no proporciona el suficiente aire para todo caudal, en un flujo rápido como el que se desarrolla existe presencia de ondas de choque y además existe el riesgo de sumergencia del aireador para la gama de caudales altos, por lo que el dispositivo dejaría de funcionar.

Rampa con desplazamiento lateral, el ancho de la rápida aumenta aguas abajo de la rampa

FIGURA 3.4 RAMPA DE FONDO DESPLAZAMIENTO LATERAL

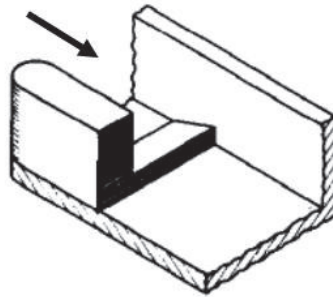
FUENTE: Falvey H., 1990, pág.63

Rampa en solera y pared lateral, cambios en el área transversal.

FIGURA 3.5 RAMPA EN FONDO Y LATERAL

FUENTE: Falvey H., 1990, pág.63

Pila y rampa, la pila permite separar al flujo y consta además de una rampa en la superficie de la solera con el fin de airear el chorro.

FIGURA 3.6 RAMPA EN SOLERA JUNTO A PILA

FUENTE: Falvey H., 1990, pág.63

3.1.1.3 Escalones

Los escalones son utilizados en aireadores, ubicados en superficies de pendiente plana con el objeto de evitar la sumergencia del aireador, a causa del golpe del chorro aguas abajo. Los escalones en el fondo de la rápida generan menos perturbaciones que una rampa y permite el manejo de altas descargas; en pequeñas descargas puede no ser suficiente el aire introducido. La función del escalón es permitir que la aireación no se ahogue, cuando el chorro impacta aguas abajo sobre la superficie inclinada, una parte del flujo tiende a regresar, disminuyendo el volumen de aire necesario para la aireación.

3.1.1.4 Aireadores combinados

Los aireadores de tipo combinados, juntan dos o más tipos de aireadores simples señalados anteriormente, su función es abarcar un mayor rango de caudales para los cuales su funcionamiento sea óptimo y permita además proteger la superficie de la rápida ante el riesgo de cavitación. Constructivamente pueden llegar a ser complejos pero depende de los requerimientos de cada proyecto. Este tipo de aireador es el seleccionado para ser analizado mediante una hoja de cálculo en esta Tesis.

TABLA 3.1 RESUMEN DE VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS TIPOS DE AIREADORES.

	DEFLECTOR O RAMPA	RANURA	ESCALON
V E N T A J A S	<ul style="list-style-type: none"> *Permite introducir grandes cantidades de aire *De fácil construcción *Utilizado en canales abiertos *Buen funcionamiento para caudales bajos 	<ul style="list-style-type: none"> *De fácil construcción *Implementado en túneles *Dispone de espacio para el volumen de aire 	<ul style="list-style-type: none"> *Producen menos perturbaciones en el flujo. *Maneja grandes descargas. *Evita que la aireación se ahogue al impactarse en el fondo. *Permite acrecentar la trayectoria del chorro para grandes descargas.
D E S V E N T A J A S	<ul style="list-style-type: none"> *Producen ondas en el flujo 	<ul style="list-style-type: none"> *Para caudales bajos: la sección se ahoga. *Problemas de drenaje. 	<ul style="list-style-type: none"> *Ubicados en superficies de pendientes planas. *Para descargas pequeñas el aire introducido puede no ser suficiente.

FUENTE: Arreguín & Alcocer, 2011, Medina & Soriano, 1992

ELABORADO POR: Carrera J.

3.1.2 UBICACIÓN DEL AIREADOR⁹

La ubicación del primer aireador depende de la evaluación de la cavitación, para lo cual se han tomado en cuenta el Criterio de Echávez y el Criterio de Thoma, descritos en el numeral 1.2.6 del Capítulo 1, cada sección estudiada debe ser analizada ante el riesgo de la cavitación.

El sitio en el que se va a ubicar el primer aireador es aquel donde se pronostica que ocurra el fenómeno mediante el análisis de los índices de cavitación, la solución que se plantea es la aireación del flujo mediante un aireador en esta sección. En el caso de un cambio de la pendiente de fondo también debe implantarse un aireador. Con el índice de cavitación se estima que el primer aireador debe ubicarse cuando una sección presente valores de cavitación iguales a 1.33 ó 1,6 para el Criterio de

⁹ Camargo J., Baldi R. y Aquino C., “Diseño de Aireadores en Estructuras Vertedoras, Aplicación al PH Reventazón Costa Rica”, México, 2014.

Echávez y de 0,20 para el Criterio de Thoma. Y con velocidades del rango entre 30 y 32 m/s (Camargo, Baldi & Aquino, 2014).

Dependiendo de la concentración de aire aguas abajo del aireador, se debe colocar el número de aireadores requeridos a lo largo de la rápida para garantizar la aireación del flujo.

3.1.3 CONDICIONES PARA LA SUMERGENCIA DEL AIREADOR

Chanson (1995 citado en Pettersson, 2012), sintetiza la investigación realizada a la sumergencia del aireador en la Tabla 3.1, detallando condiciones de llenado o sumergencia del aireador expuesto por varios autores; si el aireador se sumerge o se llena de agua, en lugar de evitar la cavitación puede provocarla.

TABLA 3.2 CONDICIONES PARA LA SUMERGENCIA DE AIREADOR CON RAMPA, AIREADOR SIN RAMPA, RANURA HORIZONTAL Y CAVIDAD BAJO UN CUERPO ROMO (CHANSON, 1995)

Autores	Condiciones de llenado	Observaciones
Aireadores con rampa		
SHI et al. (1983)	$\frac{t_r}{(R_H)_0} < 23,5 \left(\frac{\cos \alpha \cos \theta}{\frac{V_0}{\sqrt{g(R_H)_0}}} \right)^3$	Para un ancho de canal, debe cumplir: $Fr_0 < 2,86 \cos \alpha \cos \theta \sqrt[3]{\frac{y}{t_r}}$
Chanson (1988)	$Fr_0 < 2,77 + 0,94 \frac{y}{t_s}$	
Aireadores sin rampa		
TAN (1984)	$\frac{t_s}{y} < 0,60$	Experimentos realizados en 1983
Chanson (1988)	$\frac{t_s}{y} < 0,62$	Experimentos realizados en 1986-1987
Ranura horizontal		
Bretschneider (1986)	$Fr_0 < 5,8$	
Cavidad bajo el cuerpo romo		
Robertson (1965)	$\sigma < 0,5$	Nota: $\sigma = 2 \frac{\cos \alpha + \frac{p_{atm}}{(\rho_w g y)}}{Fr_0^2}$

FUENTE: Pettersson, K., (2012), pág. 18

MODIFICADO POR: Carrera, J.

Donde,

- tr: Altura de la rampa
- ts: Altura del escalón
- Rh, R: Radio hidráulico de la sección transversal
- V: Velocidad del flujo
- α : Ángulo entre la rápida y la horizontal, en ($^{\circ}$).
- θ : Ángulo de inclinación de la rampa, en ($^{\circ}$).
- g: Constante de aceleración de gravedad
- Fr: Número adimensional Froude
- y: Calado
- σ : Coeficiente de tensión en la superficie de agua
- ρ_w : Densidad del agua
- Patm: Presión atmosférica

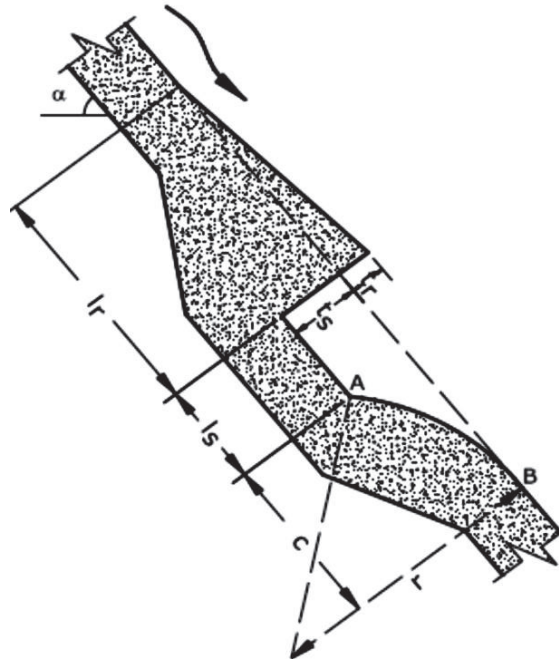
El número de Froude determina si el riesgo de cavitación aumenta o disminuye, debiendo ser un número de Froude alto cuando se trata de una rampa. Para el caso en el que el aireador no tenga rampa, se establece una relación entre la altura del escalón y el calado del flujo. La Tabla 3.2 muestra las condiciones a las que estaría expuesto el aireador a la sumergencia

3.1.4 DISEÑO GEOMÉTRICO DE UN AIREADOR

Los parámetros principales que intervienen en el diseño de un aireador son: el caudal unitario, el calado, la pendiente de la rápida, la subpresión en la cavidad, la longitud de la trayectoria del chorro, el caudal unitario de aire incorporado, y dependiendo del tipo de aireador los términos de longitud de rampa, ángulo de rampa, altura de rampa, altura de escalón, entre otros.

- Altura de la ranura, t_s , valores entre $1,50\text{m} < t_s < 2,00\text{m}$
- Longitud de la ranura, l_s , valores entre $1,50\text{m} < l_s < 2,00\text{m}$
- Altura de la rampa, t_r , valores entre $0,20\text{m} < t_r < 0,30\text{m}$
- Longitud de la rampa, l_r , valores entre $2,00\text{m} < l_r < 4,00\text{m}$

FIGURA 3.8 GEOMETRÍA DE LA RANURA Y NOMENCLATURA



FUENTE: Camargo J., Baldi R. y Aquino C., 2014, pág.2

3.2 GEOMETRÍA E IMPLANTACIÓN DE LOS DUCTOS DE AIRE

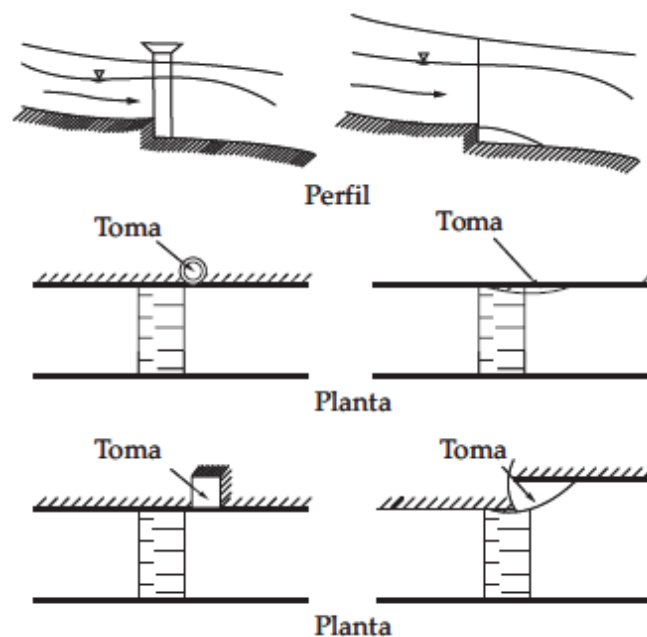
El suministro de aire que se requiere para el funcionamiento del aireador, consiste en el ingreso de aire por medio de un ducto que se conecta de la atmósfera al aireador, el flujo de aire se distribuye bajo la lámina inferior de agua y depende de la diferencia de presiones. La subpresión está ligada a la velocidad de arrastre de aire y a las pérdidas en el sistema de suministro de aire.

3.2.1 TIPOS DE DUCTOS DE AIRE

Las tomas de aire pueden ser elevadas, sobresaliendo de la estructura hidráulica. Está ubicada en una pared lateral de la rápida, son llamados también ductos de aire. Su función es facilitar y garantizar el ingreso de aire en la lámina inferior de agua y su distribución a lo largo de la sección transversal del flujo.

Para el diseño se han propuesto varios tipos de ductos de aire como: deflectores en paredes laterales, escalón en paredes, pilas, ranuras y ductos en paredes o torres, sistemas de ductos bajo la rampa y aguas abajo de la rampa conectados a galerías y pilas.

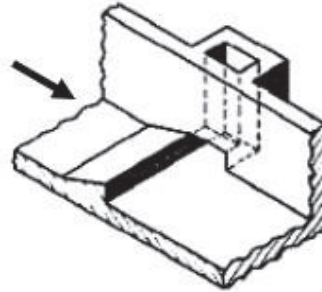
FIGURA 3.9 SOLUCIONES PARA EL SUMINISTRO DE AIRE, UBICACIÓN DE LA TOMA DE AIRE, IMPLEMENTADO INMEDIATAMENTE AGUAS ABAJO DEL AIREADOR. PINTO N. L.



FUENTE: Arreguín, F., & Alcocer, V., 2011, pág. 90

Ducto en pared lateral, los ductos son implantados necesariamente dentro de una pared lateral para rápidas anchas. Su geometría transversal puede ser rectangular o circular.

FIGURA 3.10 IMPLANTACIÓN DEL DUCTO EN PARED LATERAL

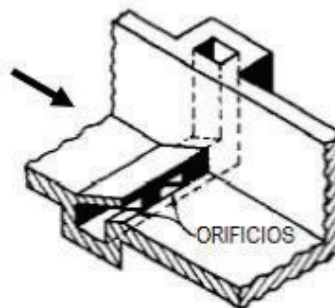


FUENTE: Falvey H., 1990, pág.63

MODIFICADO POR: Carrera, J.

Ducto con orificios bajo el deflector, en los casos en los que se produzca un salto hidráulico que cubra la rampa o para rápidas anchas se recomienda un ducto bajo la rampa con orificios o rejillas de ventilación que permitan el ingreso de aire bajo el chorro.

FIGURA 3.11 IMPLANTACIÓN DEL DUCTO CON ORIFICIOS BAJO LA RAMPA

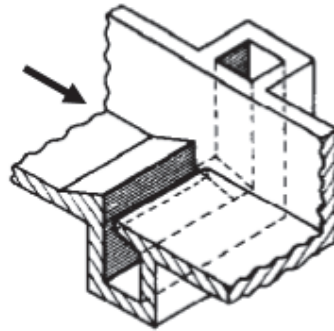


FUENTE: Falvey H., 1990, pág.63

MODIFICADO POR: Carrera, J.

Ducto aguas abajo de la rampa, se implanta un ducto con un desplazamiento bajo el nivel de la solera de la rápida, el mismo que se conecta a otro ducto implantado en la pared lateral para el contacto con la atmósfera. Esta disposición es factible cuando el valor de la altura del deflector es muy pequeña, permitiendo el ingreso de flujo de aire necesario para la aireación del chorro. En este caso se debe incorporar un sistema de drenaje para evacuar el agua que ingrese al ducto.

FIGURA 3.12 AIREADOR CON DUCTO AGUAS ABAJO DE LA RAMPA Y CONECTADO A UNA TOMA DE AIRE.



FUENTE: Falvey H., 1990, pág.63

MODIFICADO POR: Carrera, J.

El ducto de aire, puede ser de dos formas: un ducto cerrado ubicado tras una pared o una prolongación de la ranura de sección abierta. Camargo, Baldi & Aquino (2014) señalan que para evitar pérdidas de carga grandes en el ducto, recomiendan limitar la velocidad media de aire a 80m/s.

TABLA 3.3 COMPARACIÓN ENTRE DUCTO ABIERTO Y DUCTO CERRADO

Ducto abierto	Ducto cerrado
<ul style="list-style-type: none"> • Tiende a producir ondas cruzadas. • Mantiene el área para suministrar aire. • No tiene zonas muertas si la relación de sus lados es menor a 1,5 veces su ancho. 	<ul style="list-style-type: none"> • Evita ondas cruzadas. • Disminuye el área para suministrar aire.

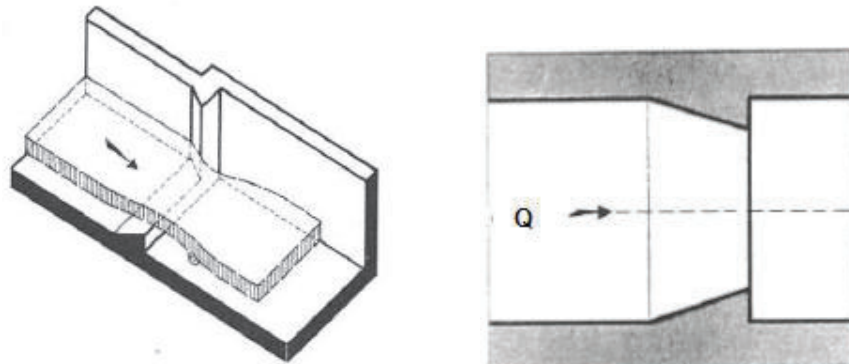
FUENTE: Camargo J., Baldi R. y Aquino C., (2014), México 2014.

ELABORADO POR: Carrera J.

3.2.1.1.1 Ejemplos de sistemas de suministros de aire

Vischer, 1984, propone varias soluciones para la implementación del sistema de suministro de aire que forma parte del aireador en la rápida. Los Tipos A y B presentan desplazamientos laterales, el Tipo C consta de una pila que aguas arriba separa al flujo y aguas abajo la pila permite el ingreso de aire, el Tipo D son ranuras laterales que se conectan a otra ranura bajo el flujo, el Tipo E es un ducto embebido en la pared lateral de geometría cerrada que introduce aire bajo el flujo y el Tipo F es un ducto de geometría cerrada, disposición especial ubicada dentro del muro y conectada a una galería bajo la solera del aireador.

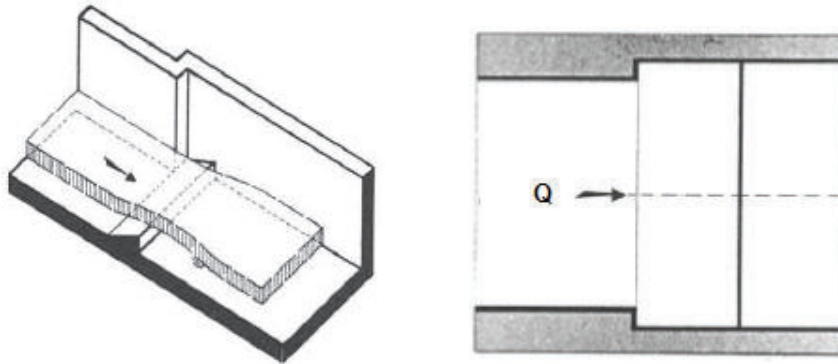
FIGURA 3.13 SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE CON DEFLECTOR LATERAL. VISTA LATERAL Y VISTA SUPERIOR EN DIRECCIÓN DEL FLUJO. (“TIPO A”)



FUENTE: Vischer D., 1984, pág.20

MODIFICADO POR: Carrera, J.

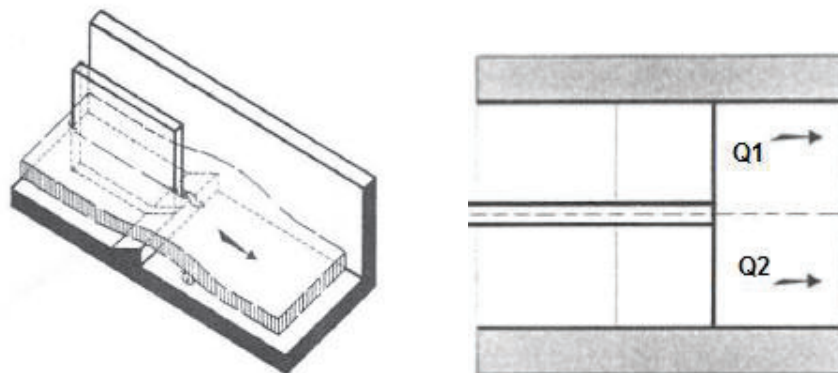
FIGURA 3.14 SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE CON DESPLAZAMIENTO DE PARED LATERAL. VISTA LATERAL Y VISTA SUPERIOR EN DIRECCIÓN DEL FLUJO. (“TIPO B”)



FUENTE: Vischer D., 1984, pág.20

MODIFICADO POR: Carrera, J.

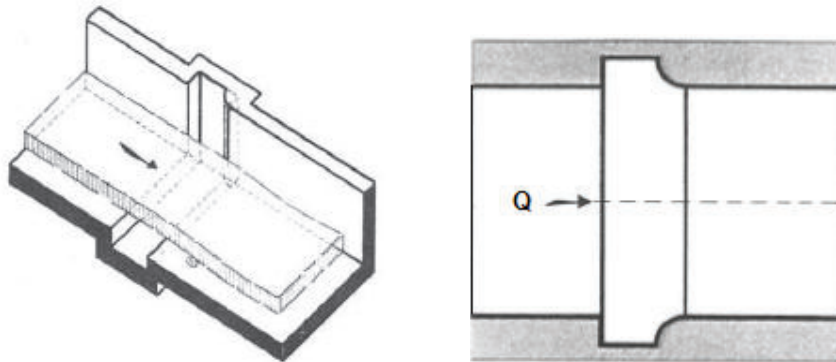
FIGURA 3.15 SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE DETRÁS DE UNA PILA. VISTA LATERAL Y VISTA SUPERIOR EN DIRECCIÓN DEL FLUJO. (“TIPO C”)



FUENTE: Vischer D., 1984, pág.21

MODIFICADO POR: Carrera, J.

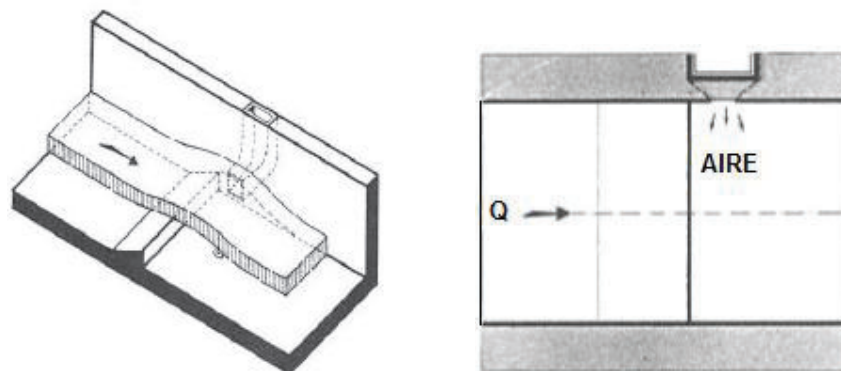
FIGURA 3.16 SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE POR RANURAS LATERALES. VISTA LATERAL Y VISTA SUPERIOR EN DIRECCIÓN DEL FLUJO. (“TIPO D”)



FUENTE: Vischer D., 1984, pág.21

MODIFICADO POR: Carrera, J.

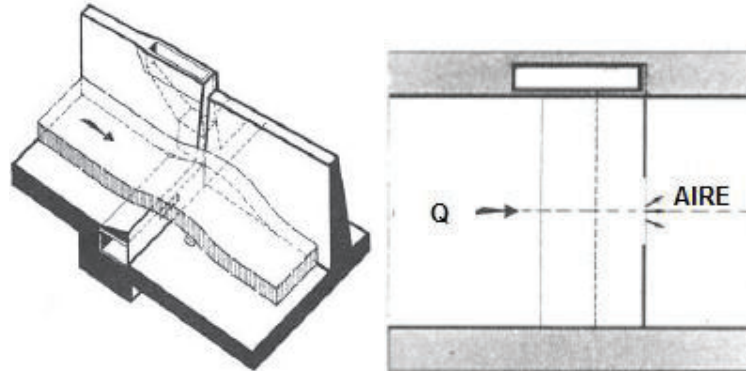
FIGURA 3.17 SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE POR DUCTOS ESPECIALES QUE INTRODUCEN AIRE BAJO EL FLUJO. VISTA LATERAL Y VISTA SUPERIOR EN DIRECCIÓN DEL FLUJO. (“TIPO E”)



FUENTE: Vischer D., 1984, pág.22

MODIFICADO POR: Carrera, J.

FIGURA 3.18 SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE DE GEOMETRÍA ESPECIAL. VISTA LATERAL Y VISTA SUPERIOR EN DIRECCIÓN DEL FLUJO. (“TIPO F”)



FUENTE: Vischer D., 1984, pág.22

MODIFICADO POR: Carrera, J.

3.2.2 ARRASTRE DE AIRE SEGÚN KOSCHITZKY Y KOBUS (1988)

El método propuesto por Koschitzky y Kobus (1988) para el arrastre de aire, es mediante funciones empíricas aplicadas para ciertas geometrías del aireador, se emplea un método iterativo para determinar la distribución de la presión subatmosférica en el aireador.

3.2.2.1 Factores de control para el ingreso de aire

Se debe considerar que el ingreso de aire excesivo al flujo de agua produce efectos inesperados como una aceleración del flujo, debiéndose tomar en cuenta este efecto para el diseño de las obras hidráulicas aguas abajo del aireador/es.

Koschitzky y Kobus (1988) señalan cuatro condiciones limitantes para el control del arrastre de aire: límite de inyección, límite de arrastre, límite de suministro de aire y límite de transporte.

- Límite de inyección es el inicio del arrastre de aire que ocurre cuando la superficie libre del flujo de agua es interrumpido por el flujo de aire. Las reacciones inerciales y gravitacionales son tan grandes que superan a la viscosidad y a la tensión superficial.
- El límite de arrastre está condicionado por el flujo de aproximación y la geometría transversal. Para un flujo de alta velocidad, el valor de Froude excede al Froude crítico provocando el ingreso del aire.
- Límite de suministro de aire, el aire desde la atmósfera es conducido a través de un ducto cerrado hasta el punto de arrastre bajo el flujo de agua. La diferencia de presiones entre la atmósfera y la cavidad bajo el flujo de agua da la pauta para el arrastre de aire necesario. En la cavidad bajo el flujo de agua se produce una presión inferior a la atmosférica, misma que depende de la velocidad de arrastre de aire y las pérdidas en el suministro de aire.
- La limitante del transporte del flujo depende de las condiciones aguas abajo, como la longitud de la rápida, longitud entre aireadores, excepto cuando hay exceso de aire en el flujo o cuando el calado del flujo de agua es pequeño respecto a la longitud del chorro.

3.2.2.2 Características del arrastre de aire

Koschitzky y Kobus (1988) señalan que el arrastre de aire se produce en toda la longitud del chorro. Depende de la geometría del aireador, variación de presiones, distribución de la velocidad, efectos en el flujo aguas arriba.

Sin embargo no está definido que efecto domina este fenómeno, pero el número de Froude del flujo relaciona la geometría del aireador y la longitud de la cavidad para determinar el arrastre de aire, según sus investigaciones realizadas en modelo.

3.2.2.3 Coeficientes en función de arrastre de aire para varias geometrías de un aireador¹⁰

Koschitzky y Kobus (1988) proponen una función empírica específica de arrastre de aire de la forma:

$$\beta = C1(Fr - Fr_{crit})^{1,5} \left(1 - C2 \frac{\Delta p}{\rho_w g y_w} \right) \quad (3.1)$$

Donde,

β : Caudal de aire o relación de arrastre de aire.

C1, C2: Constantes

g: Constante de aceleración de gravedad

Fr: Número adimensional Froude

Fr_{crit}: Número adimensional Froude crítico

y: Calado del agua

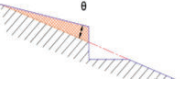
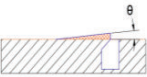
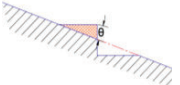
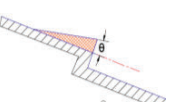
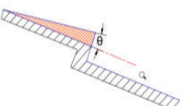
Δp : Subpresión bajo la lámina de agua (cavidad)

ρ_w : Densidad del agua

Para varios tipos de aireadores y con datos obtenidos de investigaciones realizadas por Koschitzky, Tan y Rutschmann, se presenta la siguiente tabla de coeficientes para ciertas geometrías, en las que se detalla los rangos de valores de los coeficientes C1 y C2 y el Froude crítico obtenido según sus datos experimentales.

¹⁰ Koschitzky, H., Kobus, H., The International Symposium on Hydraulics For High Dams. Hydraulics and Design of Spillway Aerators for Cavitation Prevention in High Speed Flows, Bijing 1988.

TABLA 3.4 COEFICIENTES EN FUNCIÓN DEL ARRASTRE DE AIRE PARA VARIAS GEOMETRÍAS DE UN AIREADOR, QUE INTERVIENEN EN LA FUNCIÓN ESPECÍFICA DE ARRASTRE SEGÚN KOSCHITZKY Y KOBUS (1988)

TIPO DE AIREADOR	α (grad)	θ (grad)		Figura	C1		C2		$Fr_{critico}$		OBSERVACIONES
RAMPA (Tipo I ABC)	20.3	5.2	7.9		0.02 2	\pm 0,00 2	0.0 3	\pm 0,00 2	3.5	\pm 0,7	Koschitzky (1987)
RAMPA Y RANURA (Tipo II DEF)	1.71	5.71			0.02	\pm 0,00 5	1.2 5	\pm 0,25	3.7	\pm 0,2	Koschitzky (1987)
RAMPA	14.5	7.1			0.04	\pm 0,01 5	1.0 5	\pm 0,02	3	\pm 0,5	Tan (1984)
RAMPA (Series 1 ADE)	34.52	4	7.6		0.03 5	\pm 0,01	1.0 5	\pm 0,15	4	-	Rutschmann (1988)
RAMPA CON ESCALÓN (Series1 BC)	34.52	5.71			0.04 5	\pm 0,00 5	2.2 5	\pm 0,15	4	-	Rutschmann (1988)
RAMPA CON ESCALÓN (Series2 ABC)	51.34	7.4069			0.1	\pm 0,04	5	\pm 1	3	\pm 1	Rutschmann (1988)
RAMPA CON ESCALÓN (Series2 DEF)	51.34	5.71			0.07 5	\pm 0,01 5	3.6	\pm 0,7	3	-	Rutschmann (1988)
RAMPA CON ESCALÓN (Series2 GHI)	51.34	4.38			0.05 6	\pm 0,00 5	2.6 5	\pm 0,45	2.5	-	Rutschmann (1988)

FUENTE: Koschitzky H. y Kobus H., 1988, pág 729

ELABORADO POR: Carrera J.

3.2.2.4 Arrastre total de aire

Koschitzky y Kobus (1988), establecen que el flujo de aire en el aireador puede provenir de dos abastecimientos: del conducto que se conecta con la atmósfera y del flujo bajo la cavidad.

La diferencia de presiones entre el conducto de aire y el ingreso por la pared se calcula basado en las pérdidas de energía en el sistema de aire, se desprecian las pérdidas por fricción, y las pérdidas locales son representadas por un coeficiente ξ .

$$\Delta p_0 = (\xi_0 + 1) \frac{\rho_{air} V_{air,0}^2}{2} \quad (3.2)$$

$$\Delta p_B = \xi_0 \frac{\rho_{air} V_{air,0}^2}{2} = \Delta p_0 - \frac{\rho_{air} V_{air,0}^2}{2} \quad (3.3)$$

Donde,

Δp_0 : Subpresión bajo la lámina de agua (cavidad) inicial

Δp_B : Subpresión bajo la lámina de agua (cavidad) centro de la solera

ξ : Coeficientes de pérdida de la carga total en el sistema de suministro de aire

ρ_{air} : Densidad del aire

V_{air} : Velocidad del aire

La relación del esfuerzo cortante para la mezcla agua-aire determina que cuando la concentración de aire aumenta, disminuye la fricción en el fondo y por ende aumenta la velocidad de flujo.

$$\frac{\tau_{s,aire,agua}}{\tau_s} = (1 - C_s) \quad (3.4)$$

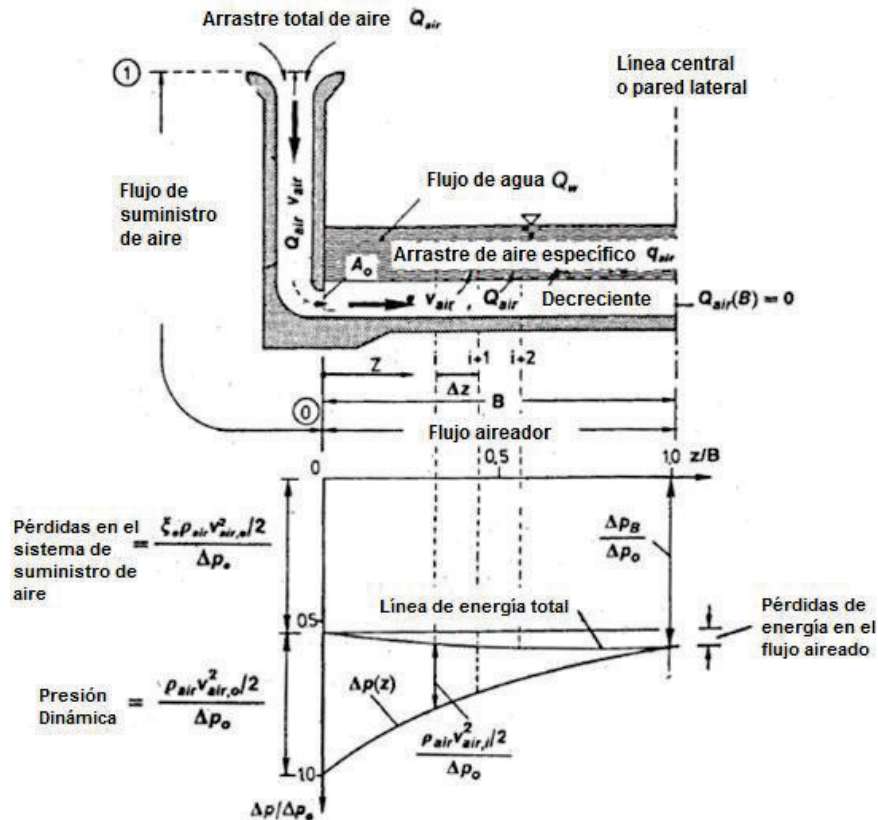
Donde,

$\tau_{s,aire,agua}$: Esfuerzo cortante mezcla agua – aire en el fondo de la rápida

C_s : Concentración del aire

τ_s : Esfuerzo cortante en el fondo de la rápida

FIGURA 3.19 FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO AIREADOR DE INGRESO TOTAL DE AIRE, FLUJO DE SUMINISTRO DE AIRE Y FLUJO AIREADOR



FUENTE: Koschitzky H., Kobus H.,(1988), pág. 730

MODIFICADO POR: Carrera, J.

3.3 MÉTODOS PROPUESTOS PARA EL DISEÑO DEL AIREADOR Y SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE

3.3.1 MÉTODO FALVEY¹¹

Según las experiencias en daños en vertederos, citadas por Falvey en 1982 y como criterio de diseño plantea que cuando el índice de cavitación es menor de 0,20 se produce un daño y cuando el índice de cavitación es mayor a 0,20 no hay daño, al

¹¹ Falvey H., "Cavitation in Chutes and Spillways", EM42, Bureau of Reclamation, 1990.

mismo tiempo, se debe tomar en cuenta la resistencia del hormigón y las tolerancias constructivas, además de las condiciones aguas arriba del aireador. Establece una racionalización entre caudal e índice de cavitación, basado en que el caudal máximo no necesariamente presenta valores bajos en el índice de cavitación.

TABLA 3.5 RACIONALIZACIÓN ENTRE CAUDALES E ÍNDICES DE CAVITACIÓN

Caudal	Fricción	Calado	Velocidad	Índice de cavitación
Bajo	Domina	Pequeño	Pequeño	Puede ser grande
Intermedio	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Disminuye
Alto	Disminuye	Aumenta	Pequeños incrementos	Aumenta
Máximo	Disminuye	Aumenta	Alta	No necesariamente valores bajos

ELABORADO POR: Carrera J.

3.3.1.1 Diseño de la rampa y Trayectoria del chorro

Para determinar la trayectoria del chorro se combinan los dos métodos propuestos por Pan et al. y Glazov, por lo que se plantean ecuaciones paramétricas de la lámina de agua:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + C_n^2 x = -C_n (g * t + U_o \sin \theta_e) \quad (3.5)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} + C_n^2 y = C_n * U_o \sin \theta_e + g \quad (3.6)$$

Donde:

$$C_n: (P_a - P_j) / \rho * q$$

$$\frac{d^2x}{dt^2}: \text{Segunda derivada de } x \text{ en relación al tiempo}$$

$$\frac{d^2y}{dt^2}: \text{Segunda derivada de } y \text{ en relación al tiempo}$$

C_n : Factor de presión
 P_a : Presión atmosférica
 P_j : Presión bajo el chorro (jet)
 q : Caudal unitario
 ρ : Densidad del agua.
 g : Constante de aceleración de gravedad
 t : Tiempo
 U_o : Velocidad media de flujo en el labio de la rampa.
 θ_e : Ángulo entre la tangente de la lámina de agua en la rampa y la horizontal

El ángulo θ_e entre la tangente de la lámina de agua en la rampa y la horizontal, se lo determina mediante el ábaco de la Figura 3.18, obteniendo el valor del factor A_r , que será reemplazado en la siguiente ecuación:

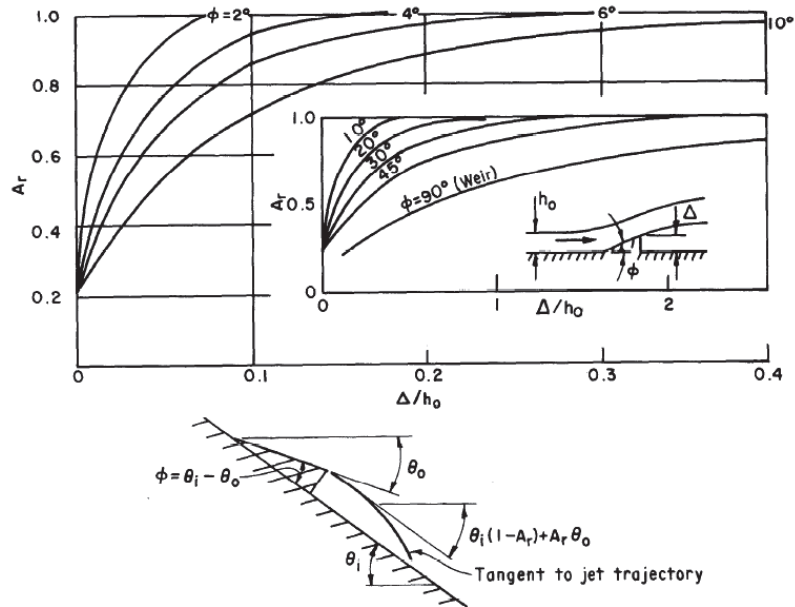
$$\theta_e = \theta_i(1 - A_r) + A_r * \theta_o \quad (3.7)$$

Donde,

- θ_e : Ángulo entre la tangente de la lámina de agua en la rampa y la horizontal.
- θ_i : Ángulo aguas abajo de la rampa entre el fondo de la rápida y la horizontal.
- θ_o : Ángulo entre el deflector y la horizontal
- A_r : Coeficiente de la trayectoria del chorro.

Este ángulo permitirá direccionar la trayectoria del chorro hasta su punto de impacto.

FIGURA 3.20 ÁBACO PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE DE LA TRAYECTORIA DEL CHORRO



FUENTE: Falvey H., 1990, pág. 62

MODIFICADO POR: Carrera, J.

Para tener una representación de la trayectoria del chorro, se establece una primera aproximación, con la siguiente ecuación:

$$\cos^2 \theta_o (\tan \theta_i - \tan \theta_o) = \frac{g * X_i}{2 * U_o^2} \quad (3.8)$$

Donde,

θ_i : Ángulo aguas abajo de la rampa entre el fondo de la rápida y la horizontal.

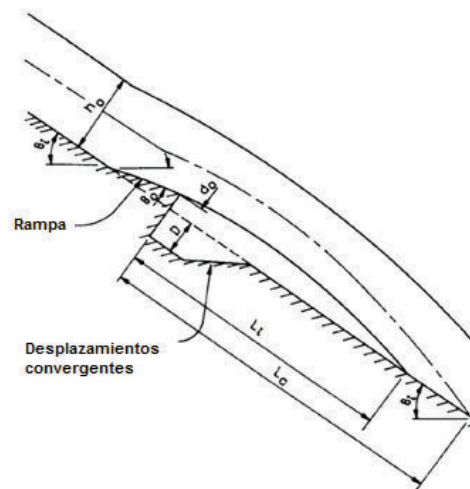
θ_o : Ángulo entre el deflector y la horizontal

g : Constante de aceleración de gravedad

U_o : Velocidad media de flujo en el labio de la rampa.

X_i : Distancia horizontal desde el final de la rampa hasta el punto de impacto del chorro.

FIGURA 3.21 LONGITUD DE LA TRAYECTORIA DEL CHORRO.



FUENTE: Falvey H., 1990, pág 61

MODIFICADO POR: Carrera, J.

3.3.1.2 Diseño del orificio de aire

3.3.1.2.1 Relaciones de flujo de aire en los ductos de aire

Falvey, plantea que el área transversal del ducto sea suficientemente grande como para que el aire introducido sea distribuido de tal forma que no haya una considerable disminución de presión bajo la lámina de agua, por lo que, se establece una ecuación acerca de la variación de presión entre la atmosférica y la presión de la parte inferior en la lámina de agua.¹²

$$\Delta P = \frac{\rho_a (1 + C_1) Q_a^2}{2A_v^2} \quad (3.9)$$

Donde,

ΔP : Variación de Presión

A_v : Área de la sección transversal del ducto de aire

¹² Falvey H., "Cavitation in Chutes and Spillways", EM42, Bureau of Reclamation, 1990.

C_1 : Sumatoria de coeficientes de pérdida a través del ducto de aire

Q_a : Caudal de aire en el ducto de aire

ρ_a : Densidad del aire

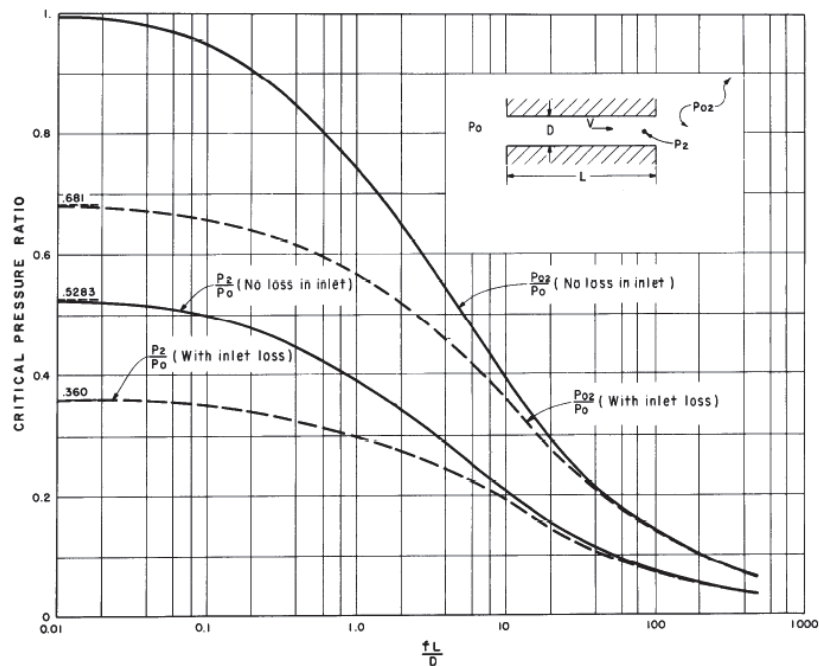
El criterio que aplica es limitar la disminución de presión, Falvey plantea como ejemplo la caída de presión limitada a la décima parte de la relación de la presión crítica, con el fin de evitar flujos de aire inestables y alto ruido en el ducto, en base a lo señalado, la velocidad máxima admisible en el ducto y la disminución de presión en el ducto es una función de las pérdidas, teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- Coeficiente de pérdida por entrada
- Presión atmosférica, $P_a = 101,3 \text{ kPa}$
- Disminución de presión = $0,1 \text{ Relación de Presión crítica} * P_a$
- Densidad del aire = $1,23 \text{ kg/m}^3$

Para los ductos de aire, con sección no circular, se sugiere reemplazar en la ecuación de pérdidas por fricción, al término diámetro con cuatro veces el radio hidráulico.

En el siguiente ábaco se destaca que la relación de presión cuando produce ahogo es función de las pérdidas por fricción en el ducto que va al aireador.

FIGURA 3.22 RELACIÓN DE PRESIÓN CRÍTICA EN LA SALIDA DEL AIRE



FUENTE: Falvey H., 1990, pág. 65

3.3.1.2.2 Criterio de la capacidad de arrastre de aire bajo el chorro¹³

El método propuesto por Glazov (1985 citado en Falvey 1990), es el más confiable puesto que incluye los efectos de la reducción de presión y la acción de la turbulencia mediante el desplazamiento de un volumen de agua bajo la lámina inferior y el ingreso de un volumen de aire al cuerpo de agua.

$$q_a = U_i \left\{ [(X_i - X_n)^2 (Y_i - Y_n)^2]^{1/2} - \frac{q}{2U_i} \right\} \quad (3.10)$$

Donde,

- q_a : Caudal unitario del aire
- q : Caudal unitario del agua

¹³ Falvey H., "Cavitation in Chutes and Spillways", EM42, Bureau of Reclamation, 1990.

- U_i : Velocidad media del chorro en el punto de impacto
 X_i : Distancia horizontal desde el extremo de la rampa hasta el punto de impacto del chorro
 X_n : Distancia horizontal desde el extremo de la rampa al centro del punto de impacto del chorro
 Y_i : Distancia vertical del punto del impacto
 Y_n : Distancia vertical de la línea central del chorro al punto de impacto.

La velocidad media del chorro, U_i , en el punto de impacto está dada por la siguiente ecuación:

$$U_i = U_o^2 + 2g * [Y_o - Y_n + 0,5 * (h_o \cos \theta_o)] \quad (3.11)$$

Donde,

- U_i : Velocidad media del chorro en el punto de impacto
 U_o : Velocidad media de flujo en el labio de la rampa.
 g : Constante de aceleración de gravedad
 h_o : Calado del flujo al extremo de la rampa
 Y_o : Distancia vertical del labio de la rampa
 Y_n : Elevación de la línea central del chorro al punto de impacto.
 θ_o : Ángulo entre el deflector y la horizontal

La modificación de la tangente de la trayectoria del chorro, definido por la siguiente ecuación:

$$\theta'_o = \theta_o + \tan^{-1} \left(\frac{v'}{U_o} \right) \quad (3.12)$$

Donde,

- v' : Valor cuadrático medio de la componente de la velocidad transversal turbulenta, siendo aproximadamente la mitad del valor de la velocidad longitudinal turbulenta.
 θ_o : Ángulo entre el deflector y la horizontal
 U_o : Velocidad media de flujo en el labio de la rampa.

La componente de la velocidad transversal turbulenta está dada por la siguiente ecuación, donde es aproximadamente:

$$v' = 0,5 * u' \quad (3.13)$$

Donde,

v' : Valor cuadrático medio de la componente de la velocidad transversal turbulenta, siendo aproximadamente la mitad del valor de la velocidad longitudinal turbulenta.

u' : Velocidad longitudinal turbulenta

La velocidad longitudinal turbulenta está dada por la siguiente ecuación:

$$u' = 0,5 * U_o * f^{1/2} \quad (3.14)$$

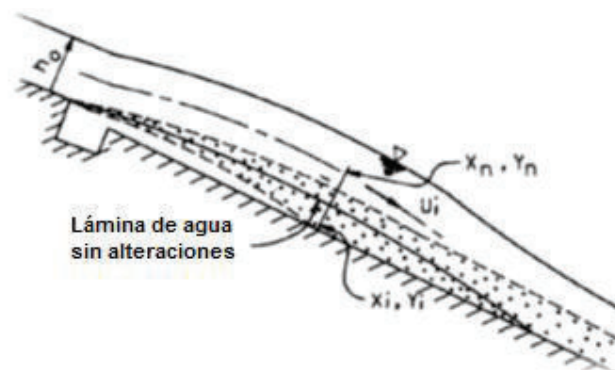
Donde,

u' : Velocidad longitudinal turbulenta

f : Coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach.

U_o : Velocidad media de flujo en el labio de la rampa.

FIGURA 3.23 ARRASTRE DE AIRE BAJO LA LÁMINA DE AGUA.



FUENTE: Falvey H., 1990, pág 66.

MODIFICADO POR: Carrera, J.

3.3.1.3 Diseño del escalón

En este método de Falvey, considera la altura de la piscina formada entre el punto de impacto del chorro y el nivel superior de la piscina, ver Figura 3.24. Los términos son expresados en la siguiente ecuación:

$$\frac{h_p^2}{h_o^2} = \frac{2F_o^2}{h_i/h_o} \left[1 - \left(h_i/h_o \right)^2 \right] + \cos \theta_i \left[\left(h_i/h_o \right)^2 - 1 \right] \quad (3.15)$$

Donde:

- F_o : Número de Froude del flujo en el deflector o rampa
- h_o : Calado del flujo al final del deflector o rampa
- h_p : Calado de la piscina formada
- h_i : Calado del flujo aguas abajo del punto de impacto.
- θ_i : Ángulo aguas abajo entre el fondo de la rápida y la horizontal.

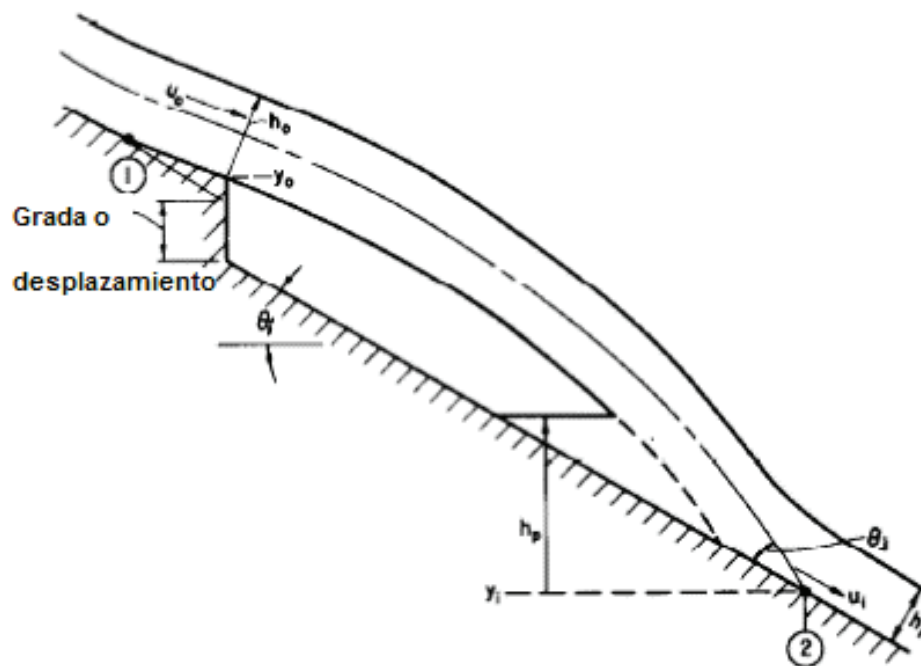
El número de Froude del flujo en la rampa está dado por:

$$F_o = U_o / [g(h_o \cos \theta_i)]^{1/2} \quad (3.16)$$

Donde:

- F_o : Número de Froude del flujo en el deflector o rampa
- h_o : Calado del flujo al final del deflector o rampa
- g : Gravedad
- θ_i : Ángulo aguas abajo del deflector entre el fondo de la rápida y la horizontal.
- U_o : Velocidad media de flujo en el labio de la rampa.

FIGURA 3.24 PISCINA FORMADA BAJO LA LÁMINA DE AGUA.



FUENTE: Falvey H., 1990, pág 66

MODIFICADO POR: Carrera, J.

Para determinar la relación entre el calado en la rampa y el calado aguas abajo del punto de impacto del chorro, utiliza las hipótesis de White (1971) y propone la siguiente ecuación:

$$h_i/h_o = \frac{2}{(U_i/U_o)(1 + \cos \theta_j)} \quad (3.17)$$

Donde,

h_o : Calado del flujo al final del deflector o rampa

h_i : Calado del flujo aguas abajo del punto de impacto.

U_i : Velocidad media del chorro en el punto de impacto.

U_o : Velocidad media en el labio del deflector o rampa

θ_j : Ángulo entre la línea central de impacto del chorro y el fondo de la rápida.

Por tanto, establece que un escalón es requerido cuando cumpla la siguiente condición:

$$h_p > (Y_o - Y_i) \quad (3.18)$$

Donde,

h_p : Calado de la piscina formada

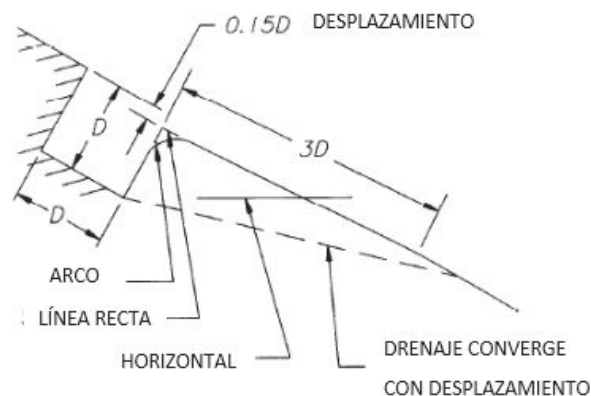
Y_i : Elevación del punto del impacto

Y_o : Elevación del labio de la rampa

Según Falvey (1990), estos criterios de diseño no han sido comprobados en modelos de rápidas y vertederos, cabe la oportunidad de proponer el estudio a escala reducida para aplicar este método de Falvey y realizar una evaluación teórico-práctico de las ecuaciones presentadas en el numeral 3.3.1.

Para un drenaje libre el escalón debe ser igual tanto en largo como en profundidad. Para mínimo 0,15 veces la distancia D como se muestra en la Figura 3.25. La diferencia de niveles es pequeña formándose un canal de aire en todo el ancho de la solera de la rápida, dependiendo del diseño se establecerá la pendiente de fondo aguas abajo. La figura se muestra a continuación.

FIGURA 3.25 CONVERGENCIA DE DRENAJE CON EL DESPLAZAMIENTO AGUAS ABAJO DEL AIREADOR



FUENTE: Falvey H., 1990, pág 67.

MODIFICADO POR: Carrera, J.

3.3.1.4 Espaciamiento entre aireadores

La concentración de aire va disminuyendo a lo largo de la rápida, con la posibilidad de requerir otro aireador. May (1987), propone que la disminución de la concentración de aire está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{C_x}{C_o} = e^{-0,017(L_x-L_i)} \quad (3.19)$$

Donde,

C_x : Concentración media de aire a una distancia X

C_o : Concentración media de aire al inicio de la aireación

L_x : Distancia inclinada aguas abajo del aireador

L_i : Distancia inclinada aguas abajo del aireador al inicio de la aireación

0,017: Constante dimensional por metro, $0,017\text{m}^{-1}$

La concentración de aire en la zona de equilibrio depende: de la rugosidad de la superficie, efectos de tensión superficial, velocidad del flujo, energía turbulenta entre aire y agua, y de la gravedad. Yevdjevich y Levin (1953), propusieron una correlación dada por:

$$\frac{C_a}{1 - C_a} = \beta = 0,062 * B^2 * \alpha_o * f^{1/2} \quad (3.20)$$

Donde,

B: Número de Boussinesq del flujo

C_a : Concentración media de aire en la aireación desarrollada.

α_o : Coeficiente de distribución de velocidad (coeficiente de energía cinética=1,1)

β : Q_e/Q_w

f: Factor de fricción de Darcy- Weisbach

Q_e : Caudal de aire arrastrado

Q_w : Caudal de agua

Para el número de Boussinesq se tiene la siguiente expresión:

$$B = \frac{U}{g * R_h} \quad (3.21)$$

Donde,

B: Número de Boussinesq del flujo

g: Constante de gravedad

R_h: Radio hidráulico

U: Velocidad media del flujo

Volkart (1985), ignoró la fricción límite y propuso una ecuación dada por:

$$C_a = \frac{\beta}{1 + \beta} = 1 - \frac{1}{0,02 * (B - 6,0)^{1,5} + 1} \quad (3.22)$$

Donde,

C_a: Concentración media de aire en la aireación desarrollada.

β: Q_e/Q_w

Q_e: Caudal de aire arrastrado

Q_w: Caudal de agua

B: Número de Boussinesq del flujo

Falvey (1980), propuso una ecuación que toma en cuenta la tensión superficial

$$C_a = \frac{\beta}{1 + \beta} = 0,05 * B - \frac{(E * \sin \theta)^{0,5}}{63} \quad (3.23)$$

Donde,

β: Q_e/Q_w

E: Número de Eötvös

C_a: Concentración media de aire en la aireación desarrollada.

B: Número de Boussinesq del flujo

θ: Ángulo de inclinación de la rampa, en (°)

El número adimensional de Eötvös está definido por la relación entre las fuerzas de flotación y las fuerzas debidas a la tensión superficial. El valor del número de Eötvös, está dado por:

$$E = \frac{g * R_h^2}{\rho * \epsilon} \quad (3.24)$$

Donde,

E: Número de Eötvös

g: Constante de gravedad

Rh: Radio hidráulico

ρ : densidad

ϵ : tensión superficial o tensión interfacial de superficie

Las ecuaciones propuestas por Volkart y Falvey generan valores semejantes de concentración de aire, y con la ecuación propuesta por Yevdjovich y Levin (1953) los valores son elevados para flujos de alta velocidad¹⁴.

Con el concepto de flujo auto-aireado, la concentración media de aire cambia en función de la distancia,

$$C_x = (C_o - C_a)e^{-0,017(L_x - L_i)} \quad (3.25)$$

Donde,

C_a: Concentración media de aire en la aireación desarrollada.

C_o: Concentración media de aire al inicio de la aireación

C_x: Concentración media de aire a una distancia X

¹⁴ Falvey H., "Cavitation in Chutes and Spillways", EM42, Bureau of Reclamation, 1990.

3.3.2 MÉTODO ICOLD^{15 16}

Los criterios propuestos en el ICOLD, son desarrollados por los investigadores Hager y Rutschmann en el año de 1990. También se agregan criterios complementarios citados por Vischer D. y Hager W. en su publicación de 1999. Este método propone la solución cuantitativa de la trayectoria del chorro para aireadores con rampa y sin rampa, determina la relación de arrastre de aire para conocer el caudal de aire, velocidad del aire y área del ducto de aire.

3.3.2.1 Trayectoria del chorro

La longitud relativa máxima del chorro está en relación de la longitud del chorro y el calado.

$$\lambda_j = \frac{L_j}{y} \quad (3.26)$$

Donde,

λ_j : Longitud relativa del chorro

L_j : Longitud del chorro (jet)

y : Calado

Hager y Rutschmann (1990) y Pinto et al. (1982), como resultado de sus investigaciones concluyeron que un aireador se sumergirá cuando la relación de la longitud del chorro y el calado sean menores a 5, Además la subpresión en la cavidad bajo el chorro será de $\Delta p = 0$, cuando el número de Euler sea mayor a 50².

Para un aireador con rampa se tiene la siguiente ecuación:

$$\lambda_j = \frac{\bar{\theta} F^2}{\cos \alpha} \left\{ 1 + \left[1 + \frac{2T \cos \alpha}{(\bar{\theta} F)^2} \right]^{1/2} \right\} \quad (3.27)$$

¹⁵ Pettersson Kristoffer, "Design of Aerators for prevention of cavitation–The Höljes Dam", Stockholm, 2012.

¹⁶ Vicher D., Hager W., " Dam Hydraulics", Gran Bretaña, 1999.

Donde,

λ_j : Longitud relativa del chorro

$\bar{\theta}$: Angulo efectivo

θ : Angulo de la rampa

α : Ángulo entre la rápida y la horizontal, en ($^{\circ}$).

T: Altura relativa del aireador

F: Número adimensional Froude

Donde el ángulo efectivo $\bar{\theta}$ y el ángulo de inclinación de la rampa θ están en radianes:

$$\frac{\bar{\theta}}{\theta} = \left[\tanh \frac{T_r}{\theta} \right]^{1/2} \quad (3.28)$$

Donde,

$\bar{\theta}$: Angulo efectivo

θ : Angulo de la rampa

Tr: Altura relativa del aireador

Para un aireador sin rampa se presentan la siguiente expresión, para la longitud relativa del chorro.

$$\lambda_j = F \left(\frac{2T_s}{\cos \alpha} \right)^{1/2} \quad (3.29)$$

Donde,

λ_j : Longitud relativa del chorro

Ts: Altura relativa del aireador

α : Ángulo entre la rápida y la horizontal, en ($^{\circ}$).

F: Número adimensional Froude

Donde la altura relativa del aireador está en función de la suma de alturas de la rampa y del escalón, y del calado.

$$T = \frac{t_r + t_s}{y} \quad (3.30)$$

$$T_r = \frac{t_r}{y} \quad (3.31)$$

$$T_s = \frac{t_s}{y} \quad (3.32)$$

Donde,

T: Altura relativa del aireador

T_r: Altura relativa de la rampa

T_s: Altura relativa del escalón

t_r: Altura de la rampa

t_s: Altura del escalón

y: Calado

3.3.2.2 Arrastre de aire

Relación entre caudal de aire y caudal de agua

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} \quad (3.33)$$

Donde,

β: Caudal de aire o relación de arrastre de aire.

Q_a: Caudal de aire en el ducto de aire, caudal de aire.

Q_w: Caudal de agua

Arrastre máximo de aire para $\lambda_{m\acute{a}x}$ menor a 6

$$\beta_{m\acute{a}x} = 0,030(\lambda_j) \quad (3.34)$$

Donde,

β_{\max} : Arrastre máximo de aire.

λ_j : Longitud relativa del chorro

Arrastre máximo de aire para $\lambda_{m\acute{a}x}$ mayor a 6

$$\beta_{m\acute{a}x} = 0,030(\lambda_j - 5) \quad (3.35)$$

Donde,

β_{\max} : Arrastre máximo de aire.

λ_j : Longitud relativa del chorro

Número de Euler mínimo, donde el último término de la expresión depende de la geometría del aireador.

$$E_{\min} = \frac{10^3}{2,3} (\tan \theta)^{1,15} \exp[1,15(\tan \alpha)^2] + (1/3)T_s^2 \quad (3.36)$$

Donde,

E_{\min} : Numero de Euler mínimo

α : Ángulo entre la rápida y la horizontal, en (°).

θ : Ángulo de inclinación de la rampa, en (°).

T_s : Altura relativa del escalón

Relación del ingreso de aire

$$\beta = 0,015 + 0,46 \exp(-31,58F_p) \quad (3.37)$$

$$F_p = \frac{q_w}{\sqrt{gH_1^3}} \quad (3.38)$$

Donde,

β : Caudal de aire o relación de arrastre de aire.

H: Carga sobre el aireador

qw: Caudal unitario del agua

g: Constante de aceleración de gravedad

$$\frac{\beta}{\beta_{\max}} = \left[\frac{2}{\pi} \arctan(3 \times 10^{-3} \Delta Eu) \right]^{0,7} \quad (3.39)$$

$$Eu = Eu_{\min} + \Delta Eu \quad (3.40)$$

Donde,

β : Arrastre de aire.

β_{\max} : Arrastre máximo de aire.

ΔEu : Variación del número de Euler

Eu: Número de Euler

Eu_{\min} : Número mínimo de Euler

El número de Euler está dado por:

$$Eu = \frac{V^2}{\left(\frac{\Delta p}{\rho}\right)} \quad (3.41)$$

Donde,

Eu: Número de Euler

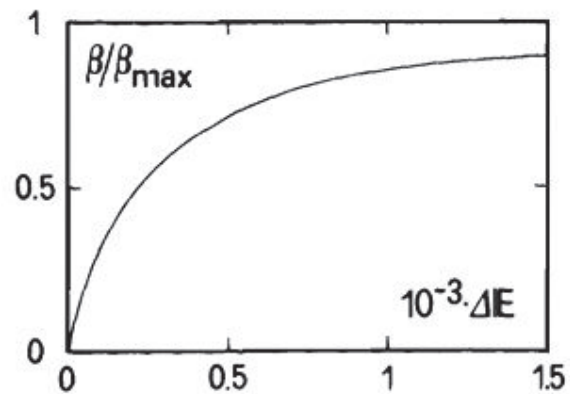
V: Velocidad del flujo

Δp : Subpresión bajo la lámina de agua (cavidad)

ρ : Densidad del agua

Al determinar el Número de Euler mínimo, para cualquier geometría de aireador, se utiliza la Figura 3.26 para obtener ΔE con distintos valores de Euler y posteriormente calcular el valor de la relación β/β_{\max} .

FIGURA 3.26 RELACIÓN $B/B_{\text{MÁX}}$ Y ΔE

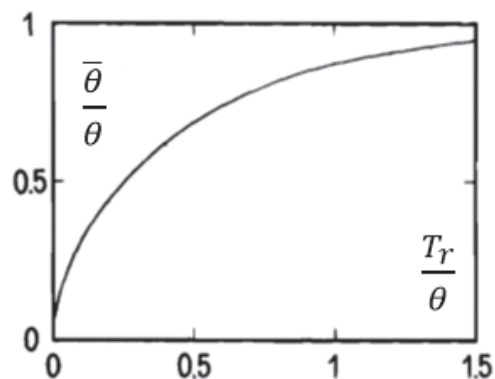


FUENTE: Vischer D., Hager W., 1999, pág. 126

MODIFICADO POR: Carrera, J.

Así también la Figura 3.25 permite corregir el ángulo de la rampa para una distribución de presión no hidrostática en función de $\frac{\bar{\theta}}{\theta}$ y $\frac{T_r}{\theta}$. Considerar que en la literatura al ángulo de la rampa lo denominan α y en esta tesis lo llamamos θ .

FIGURA 3.27 RELACIÓN ENTRE $\frac{\bar{\theta}}{\theta}$ Y $\frac{T_r}{\theta}$ PARA LA CORRECCIÓN DEL ÁNGULO DE LA RAMPA.



FUENTE: Vischer D., Hager W., 1999, pág. 126

MODIFICADO POR: Carrera, J.

Donde,

$\bar{\theta}$: Angulo efectivo

θ : Angulo de la rampa

T_r : Altura relativa de la rampa

3.3.2.3 Subpresión de la cavidad, velocidad de aire en el sistema de ingreso y área del ingreso de aire

- Presión inferior a la atmosférica o subpresión

$$\Delta\bar{p} = \rho_w \frac{V_a^2}{Eu} \quad (3.42)$$

Donde,

$\Delta\bar{p}$: Presión inferior a la atmosfera

ρ_w : Densidad del agua

Eu : Número de Euler

V_a : Velocidad del aire

- Velocidad de aire en ducto en m/s

$$V_a = \sqrt{\frac{2\Delta\bar{p}}{0,43(1 + 2\xi_{tot})\rho_a}} \quad (3.43)$$

Donde,

ξ_{tot} : Coeficiente correspondiente al total de pérdidas del suministro de aire.

V_a : Velocidad del aire

$\Delta\bar{p}$: Presión inferior a la atmosfera

ρ_a : Densidad del aire

- Área del ducto de aire

$$A_a = \frac{Q_a}{V_a} \quad (3.44)$$

Donde,

A_a : Área del ducto para el ingreso de aire

Q_a : Caudal de aire en el ducto de aire, caudal de aire.

V_a : Velocidad del aire

- El caudal de aire está dado por:

$$Q_a = \beta Q_w \quad (3.45)$$

Donde,

Q_a : Caudal de aire en el ducto de aire, caudal de aire.

β : Arrastre de aire.

Q_w : Caudal de agua

Condiciones o limitaciones, para determinar la descarga del suministro de aire Q_a

$$T < 1$$

$$\tan \theta < 0,15$$

$$\tan \alpha < 1,5$$

$$6 < F < 12$$

Donde,

T: Altura relativa del aireador

α : Ángulo entre la rápida y la horizontal

F: Número adimensional Froude

θ : Angulo de la rampa

Cabe recalcar que las ecuaciones mencionadas en el método, corresponden a ensayos realizados por los autores; por lo que se recomienda corroborar dicha información en base a nuevos experimentos con modelos hidráulicos en laboratorio.

3.3.2.4 Sistema de suministro de aire según Vischer y Hager

Para el diseño del sistema de suministro de aire se aplica la relación del área del ducto de aire y el área de flujo. Con velocidades de aire de máximo 50m/s¹⁷

$$\Phi = \frac{A_a}{bh} \left[0,43(1 + 2\xi_{tot}) \frac{\rho_a}{\rho_w} \right]^{-1/2} \quad (3.46)$$

Donde,

Φ : Eficiencia

A_a : Area del ducto del aire

b : ancho de la rápida

h : Calado del agua

ξ_{tot} : Coeficiente correspondiente al total de pérdidas del suministro de aire.

ρ_a : Densidad del aire

ρ_w : Densidad del agua

- Relación de aire β

$$\beta = \frac{0,03(\lambda_j - 5)}{1 + 0,0085 \frac{F \lambda_{m\acute{a}x}}{\Phi}} \quad (3.47)$$

Donde,

β : Arrastre de aire.

λ_j : Longitud relativa del chorro

F : Número adimensional Froude

$\lambda_{m\acute{a}x}$: Longitud relativa máxima del chorro

Φ : Eficiencia

¹⁷ Vicher D., Hager W., "Dam Hydraulics", Gran Bretaña, 1999.

Para obtener una eficiencia óptima, según Vischer y Hager (1999), la relación de la sección es:

$$\Phi_{opt} = \frac{1}{2}(0,0085F\lambda_{m\acute{a}x}) \quad (3.48)$$

Donde,

F: Número adimensional Froude

$\lambda_{m\acute{a}x}$: Longitud relativa máxima del chorro

Φ_{opt} : Eficiencia optima

Y, la relación de arrastre óptimo es:

$$\beta_{opt} = (1/3)\beta_{m\acute{a}x} \quad (3.49)$$

Donde,

β_{opt} : Arrastre de aire optimo

β_{max} : Arrastre de aire máximo

Por lo tanto, la altura óptima del aireador es:

$$T_{\acute{o}pt} = \left[\frac{(t_r + t_s)}{h} \right]_{\acute{o}pt} \quad (3.50)$$

Donde,

T_{opt} : Altura optima relativa del aireador

t_r : Altura de la rampa

t_s : Altura del escalón

h: Calado del agua

Y para mantener un bordo libre debe estar dentro del rango $0,4 < F/\Phi < 120$, se tiene:

$$T_{\acute{o}pt} = \frac{22\cos^2\alpha}{\theta F^4} (\Phi/F)^{0,11} \quad (3.51)$$

Donde,

T_{opt} : Altura óptima relativa del aireador

F: Número adimensional Froude

Φ : Eficiencia

α : Ángulo entre la rápida y la horizontal

Es decir que la altura óptima depende del número de Froude, así como de los ángulos de inclinación de la rampa y del canal de vertido.

$$T_{opt}^* = \frac{15\cos^2\alpha}{\theta F^4} \quad (3.52)$$

Donde,

T_{opt} : Altura optima relativa del aireador

F: Número adimensional Froude

α : Ángulo entre la rápida y la horizontal

3.3.3 MÉTODO KÖKPINAR & GÖGÜS ¹⁸

Los criterios de diseño que se desarrollan a continuación fueron presentados en el año 2002 por Kökpinar & Gögüs, permite determinar la trayectoria del chorro, la relación de arrastre de aire, la subpresión en la cavidad bajo el chorro, la velocidad del aire en el ducto y el área del ducto de aire.

3.3.3.1 Trayectoria del chorro

La trayectoria del chorro está definida en función de la geometría del aireador y del ducto así como también del calado.

¹⁸ Pettersson Kristoffer, "Design of Aerators for prevention of cavitation–The Höljes Dam", Stockholm, 2012

$$\frac{L_{jet}}{h} = 0,28F^{1,75}(1 + \theta)^{0,22} \left(\frac{t_r + t_s}{y} \right)^{0,44} \left(1 + \tan \alpha \frac{A_a}{A_w} \right)^{-0,087} \quad (3.53)$$

Condiciones o limitaciones

$$5,56 \leq F \leq 10,0$$

$$0,198 \leq \frac{(t_r + t_s)}{h} \leq 1,985$$

$$0^\circ \leq \theta \leq 9,45^\circ$$

$$0 \leq \tan \alpha \leq 1,25$$

$$0,00684 \leq \frac{A_a}{A_w} \leq 1$$

Donde,

L_{jet} : Longitud del chorro

h: Calado del agua

α : Ángulo entre la rápida y la horizontal

F: Número adimensional Froude

θ : Angulo de la rampa

t_r : Altura de la rampa

t_s : Altura del escalón

y: Calado

A_a : Área del ducto para el ingreso de aire

A_w : Área del flujo de agua aguas arriba del aireador

3.3.3.2 Arrastre de aire

Arrastre de aire a través de la lámina superior de agua

$$\beta_{sup} = 0,0278F^{0,6} \left(1 + \frac{t_r}{y} \right)^{2,13} (1 + \tan \alpha)^{0,48} \quad (3.54)$$

Limitaciones

$$3,4 \leq F \leq 12,36$$

$$0 \leq \frac{(t_r)}{h} \leq 0,4$$

$$0^\circ \leq \theta \leq 5,71^\circ$$

$$0 \leq \tan \alpha \leq 0,57$$

Donde,

β_{sup} : Arrastre del aire superior

α : Ángulo entre la rápida y la horizontal

F: Número adimensional Froude

t_r : Altura de la rampa

h: Calado

Arrastre de aire a través de la lámina inferior del chorro

$$\beta_{inf} = 0,0189 \left(\frac{L_{jet}}{y} \right)^{0,83} \left[\left(\frac{A_a}{A_w} \right) (1 + \tan \alpha) \right]^{0,24} \quad (3.55)$$

Limitaciones

$$0^\circ \leq \theta \leq 9,45^\circ$$

$$0 \leq \tan \alpha \leq 1,25$$

$$5,56 \leq F \leq 10,0$$

$$0 \leq \theta \frac{T_r}{T_s} \leq 0,8$$

$$0 \leq \frac{t_r}{h} \leq 0,4$$

$$0,02 < \frac{A_a}{A_w} < 1$$

$$109 \leq W_e \leq 182$$

$$W_e = \frac{u_w}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho_w h}}} \quad (3.56)$$

Donde,

β_{inf} : Arrastre del aire inferior

L_{jet} : Longitud del chorro

y: Calado del agua
 α : Ángulo entre la rápida y la horizontal
 A_a : Área del ducto para el ingreso de aire
 A_w : Área del flujo de agua aguas arriba del aireador
 We : Número adimensional Weber
 u_w : Velocidad del agua
 σ : Coeficiente de tensión en la superficie de agua
 ρ_w : Densidad del agua
 h: Calado
 α : Ángulo entre la rápida y la horizontal
 θ : Angulo de la rampa
 A_a : Área del ducto para el ingreso de aire
 A_w : Área del flujo de agua aguas arriba del aireador
 F: Número adimensional Froude
 t_r : Altura de la rampa
 T_r : Altura relativa de la rampa
 T_s : Altura relativa del escalón

3.3.3.3 Subpresión de la cavidad, velocidad de aire en el sistema de ingreso y área del ingreso de aire

$$(P_N)_e^{1/4} = \phi' \left[\left(\frac{L_{jet}}{h} \right)^2 (1 + \tan \alpha)^{3,5} \left(\frac{A}{A_w} \right)^{-0,9} \right] + \phi'' \quad (3.57)$$

$$\phi' = 0,0733$$

$$\phi'' = -0,1033$$

$$(P_N)_P = 10,402(P_N)_e \quad (3.58)$$

Limitaciones

$$\begin{aligned}
 1,095 &\leq \frac{L_{jet}}{h} \leq 30,06 \\
 0,03 &\leq \tan \alpha \leq 1,25 \\
 0,00684 &< \frac{A_a}{A_w} < 0,447 \\
 4,31 &\leq F \leq 8,73 \\
 (P_N)_p &= \frac{\Delta \bar{p}}{\rho_w g h} \quad (3.59)
 \end{aligned}$$

Donde,

P_N : Subpresión de la cavidad. Presión negativa

L_{jet} : Longitud del chorro

h : Calado

α : Ángulo entre la rápida y la horizontal

A_w : Área del flujo de agua aguas arriba del aireador

A : Área del flujo de agua en una sección transversal

F : Número adimensional Froude

$\Delta \bar{p}$: Presión inferior a la atmosfera

ρ_w : Densidad del agua

g : gravedad

Velocidad de aire en ducto en m/s

$$U_a = \sqrt{\frac{2\Delta \bar{p}}{0,43(1 + 2\xi_{tot})\rho_a}} \quad (3.60)$$

Donde,

U_a : Velocidad del aire en el ducto

$\Delta \bar{p}$: Presión inferior a la atmosfera

ρ_a : Densidad del aire

ξ_{tot} : Coeficiente correspondiente al total de pérdidas del suministro de aire.

3.3.4 MÉTODO GUTIERREZ ORELLANO Y VEGA¹⁹

El criterio propuesto en este método para determinar la demanda de aire corresponde a una ecuación con base en el número de Froude obtenida mediante la tabulación de datos de laboratorio y registros de varios autores.

$$\beta = 0,0055e^{0,52F} \quad (3.61)$$

Donde, β : Demanda de aire, relación entre el caudal de aire y el caudal de agua.
F: Número de Froude

3.4 CAMBIOS DEL FLUJO DE AGUA DEBIDO A LOS DISPOSITIVOS DE AIREACIÓN IMPLANTADOS

Koschitzky & Kobus (1988), establecen que:

La aireación del flujo de alta velocidad cerca de la parte inferior lleva a los cambios del flujo aguas abajo de los aireadores, que tienen que ser considerados en el diseño. Estos efectos son:

- Fuerzas hidrodinámicas en la región de la punta del chorro de impacto,
- Desaireación superficial (autoaireación) en la ubicación del aireador,
- Aumento de la profundidad del agua debido al aire arrastrado,
- Agua pulverizada en la superficie,
- Pérdidas de energía debido al proceso de arrastre y el transporte aéreo,

¹⁹ Camargo, Baldi y Aquino, “Diseño de aireadores en estructuras vertedoras aplicación al P.H. Reventazón Costa Rica”, XIII Congreso Nacional de Hidráulica, Jalisco, México, 2014

- Aumento de la velocidad de flujo a lo largo de la longitud del chorro,
- Aumento de la velocidad de flujo aguas abajo del aireador como consecuencia de la reducción del esfuerzo cortante en la parte inferior debido a la presencia de aire. (p. 731)

3.5 CONCLUSIONES

- En el diseño es necesario tener en cuenta que las paredes laterales de la rápida deben ser lo suficientemente altas para evitar desbordamientos por la aireación, trayectoria del chorro y oleaje (en caso de haberlo) a la salida de la rápida debe considerarse la longitud del chorro y si es necesario incluir el salto de esquí, un colchón de agua o elementos de disipación. En el ducto se debe garantizar un buen drenaje y evitar su sumergencia.
- Para el espaciamiento del aireador no hay un valor fijo sino más bien depende de la necesidad que muestren los cálculos de cavitación a lo largo de la rápida, tentativamente existen espaciamientos de entre 20m a 100m
- La selección de la geometría del aireador más acertada es la que evite cambios bruscos en la sección transversal de flujo descartando ondas de choque aguas abajo.
- El arrastre de aire depende de las propiedades del fluido y de las fuerzas de inercia.
- La incorporación de aire en el flujo de agua de régimen supercrítico desarrollado en la rápida evita que las presiones negativas producidas bajo la lámina de agua del chorro produzcan cavitación en la superficie de hormigón.

- En canales abiertos como es el caso de las rápidas, aguas abajo del aireador, el flujo de la mezcla agua - aire tiende a aumentar su profundidad por lo que es necesario tener en cuenta para que las paredes mantengan un bordo libre suficiente de evitar desbordamientos del agua.
- El arrastre de aire puede afectar el comportamiento hidráulico de la rápida cuando: el caudal de aire sea excesivo aumentando las fluctuaciones del flujo y alteraciones de las propiedades de la mezcla agua-aire.

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN DE UNA HOJA DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO DEL AIREADOR

Para establecer como solución la aireación forzada, es necesario analizar el fenómeno de cavitación a lo largo de rápida, la pendiente, rango de caudales, presiones negativas, condiciones en la entrada de la rápida.

El tipo de aireador seleccionado para desarrollar el ejemplo práctico utilizando los diferentes métodos propuestos es un aireador combinado

4.1 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO DEL AIREADOR SELECCIONADO

El procedimiento que se realiza en el presente trabajo para el cálculo del diseño del aireador combinado es el siguiente:

- Chequeo del requerimiento de aireación forzada mediante la evaluación de la cavitación.
- Selección del criterio para análisis del riesgo de cavitación.
- Ingresar el número de secciones a evaluar
- Ingreso de Datos según el criterio seleccionado (Thoma o Echávez). Cálculo de índices de cavitación

- Dimensionamiento del aireador y cálculo de parámetros según el método seleccionado con base en los métodos propuestos Kokpinar y Gogus, Hager y Rutschmann, Koschitsky y Kobus, Gutierrez, Arrellano y Vega.

4.1.1 DATOS

Los datos iniciales para el dimensionamiento del aireador son los ya conseguidos previamente en la sección aguas arriba del sitio de implantación del aireador.

Además se debe considerar que los datos requeridos dependen del método seleccionado.

4.1.2 CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE CAVITACIÓN EN CADA SECCIÓN INGRESADA AL PROGRAMA A LO LARGO DE LA RÁPIDA

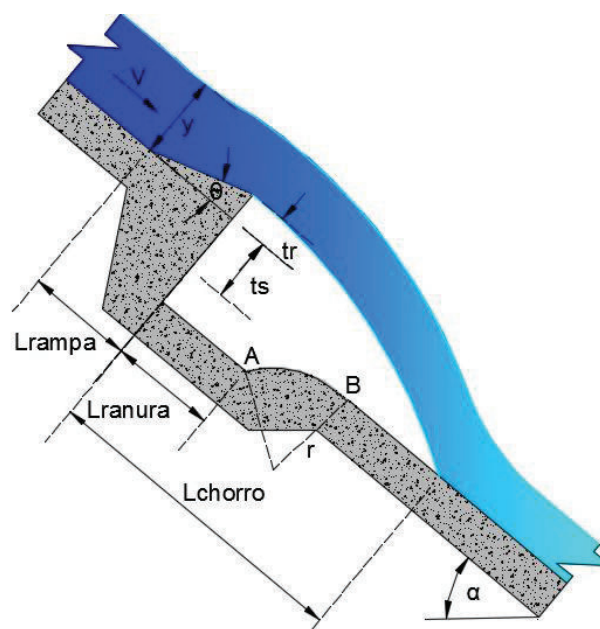
Se calcula la presión en la sección de interés para establecer los criterios de Thoma y Echávez, los índices de cavitación determinan la existencia o no del fenómeno cavitante, el cálculo puede ser realizado hasta para 20 secciones ingresadas según la necesidad del diseñador.

4.1.3 CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA GEOMETRÍA DEL AIREADOR COMBINADO

Como se menciona en el Capítulo 3, existen varios tipos de aireadores y se selecciona el que se ajuste a las necesidades del proyecto.

En esta Tesis se ha seleccionado un aireador combinado por rampa, escalón y ranura, para dimensionarlo con base a los cuatro métodos planteados en el Capítulo 3, este aireador incluye a la salida una curvatura para facilitar la evacuación del flujo y evitar su acumulación en la ranura; su funcionamiento es óptimo frente a caudales variados.

FIGURA 4.1 ESQUEMA DE AIREADOR SELECCIONADO Y NOMENCLATURA DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS



ELABORADO POR: Carrera J.

Los parámetros que intervienen en el dimensionamiento del aireador son:

- Caudal de diseño
- Ancho de la rápida
- Calado del flujo de agua
- Velocidad del flujo de agua
- Número de Froude
- Densidad de agua y densidad de aire

- Constante de gravedad
- Coeficiente de pérdidas totales en el arrastre de aire
- Dimensiones preliminares del aireador: altura de la rampa, altura del escalón, ángulo de la rampa y ángulo de la rápida

Dependiendo del método se debe ingresar valores de ciertos parámetros, conforme la tabla de DATOS.

4.2 HOJA DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO DEL AIREADOR SELECCIONADO

La hoja de cálculo que se propone para el diseño del aireador seleccionado y del sistema de suministro de aire está conformada por:

- Datos
- Índice de cavitación
- Geometría
- Funcionamiento

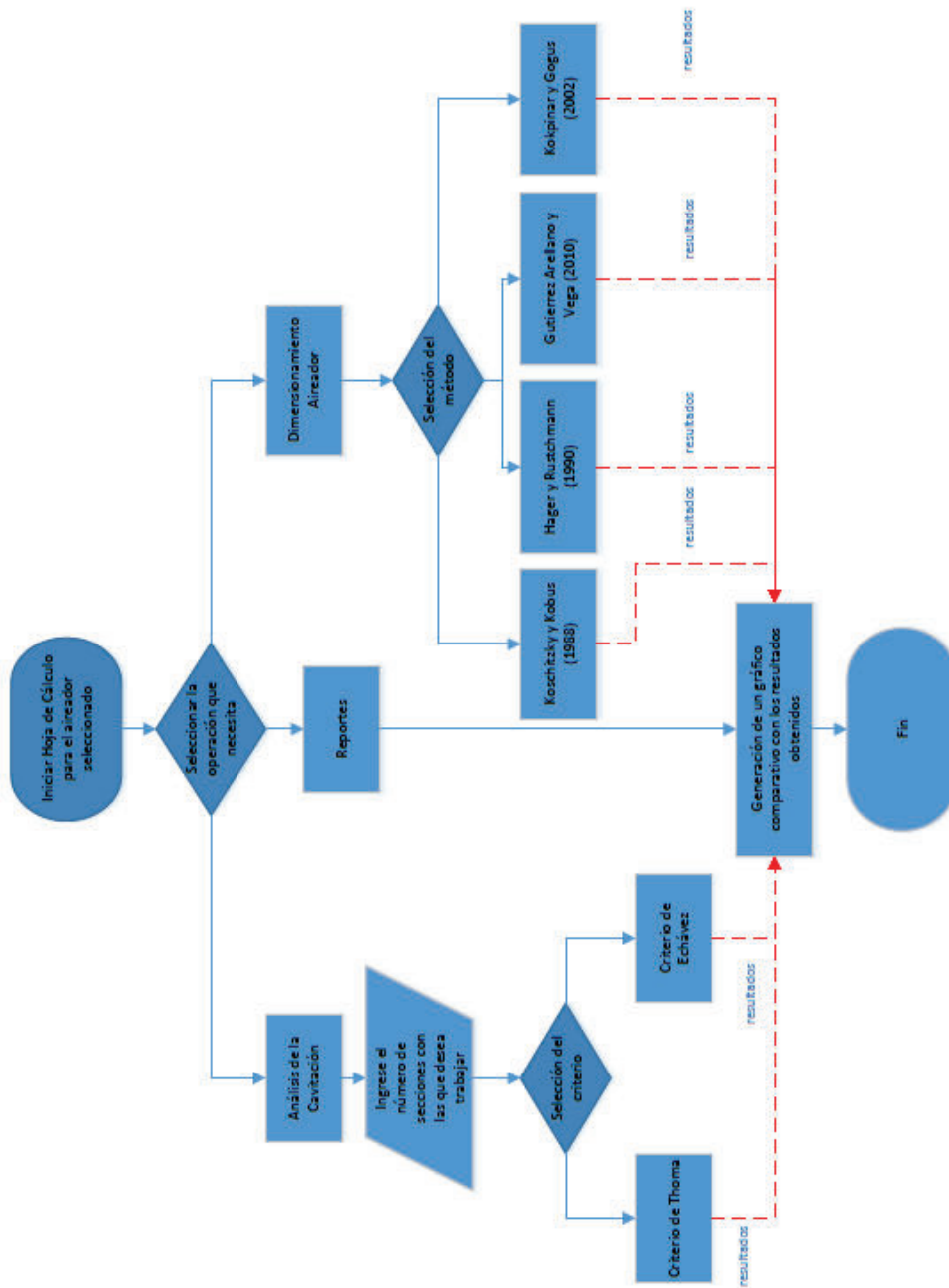
La hoja de cálculo permite seleccionar el criterio de diseño y valorar los resultados obtenidos, es realmente importante realizar la comprobación mediante un modelo físico hidráulico de la obra para comprobar los resultados y realizar optimizaciones del dispositivo de aireación.

Las limitaciones que tiene la hoja de cálculo son las siguientes:

- Versión Excel 2013
- Los cálculos realizados arrojan resultados específicamente para el aireador seleccionado (combinación de rampa, escalón y ranura) con ducto de aire.

4.3 DIAGRAMA DE FLUJO

FIGURA 4.2 DIAGRAMA DE FLUJO



ELABORADO POR: Carrera J.

4.4 MANUAL DE USO

A continuación se describe el manual de uso de la hoja de cálculo elaborada para el diseño de aireador seleccionado.

4.4.1 INGRESO A LA HOJA DE CÁLCULO

Al iniciar la hoja de cálculo tenemos una ventana la cual nos indica si queremos ingresar para hacer uso de las opciones de cálculo de la hoja para lo cual hacemos clic sobre el botón Ingresar.

FIGURA 4.3 INGRESO HOJA DE CÁLCULO



ELABORADO POR: Carrera J.

En el caso de no desearlo solo hacemos clic sobre el botón cerrar ubicado en la parte superior derecha, y podemos acceder directamente a los datos que se encuentren guardados en nuestra hoja de cálculo.

FIGURA 4.4 HOJA DE CÁLCULO CON DATOS GUARDADOS

ANÁLISIS DEL RIESGO DE CAVITACIÓN

DATOS

Caudal de diseño	Qd=	150	m ³ /s	
Ancho de rápida	B=	6	m	
Temperatura del agua	Ta=	15	grad	
Altitud	Alt=	2800	msnm	Lugar del proyecto
Presión atmosférica	ha=	7,339	m	
Carga de presión de vapor	hv=	0,142	m	
Índice de cavitación	dv=	0,2		Valor fijo de 0,2
Aceleración de Gravedad	g=	9,81	m/s ²	

INDICES DE CAVITACIÓN UTILIZANDO EL CRITERIO DE THOMA

Sección	x (m)	y (m)	V (m/s)	oc (Thoma)	RIESGO
1	6	4,17	14,91	NO	SI
2	5,5	4,55	12,06	NO	SI
3	3,5	7,14	4,11	NO	SI
4	3,2	7,81	3,34	NO	SI
5	3	8,33	2,88	NO	SI
6	2,8	8,93	2,46	NO	SI
7	2,6	9,62	2,08	NO	SI
8	2,4	10,42	1,74	NO	SI
9	2,2	11,36	1,43	NO	SI
10	2	12,50	1,15	NO	SI
11	1,8	13,89	0,92	NO	SI
12	1,7	14,71	0,81	NO	SI
13	1,6	15,63	0,71	NO	SI
14	1,5	16,67	0,61	NO	SI
15	1,4	17,84	0,52	NO	SI

CRITERIO DE THOMA | CRITERIO DE ECHAVEZ | CRITERIO KK1988 | CRITERIO HR1990 | CRITERIO KG2002 | CRITERIO GV2010 | REPORTES

ELABORADO POR: Carrera J.

4.4.2 OPCIONES DISPONIBLES

Una vez que hemos ingresado a la hoja de cálculo a través de la pantalla de inicio se despliega una nueva ventana con cada una de las opciones o acciones disponibles para que el usuario las seleccione en base a sus necesidades.

FIGURA 4.5 ACCIONES QUE SE PUEDEN SELECCIONAR



ELABORADO POR: Carrera J.

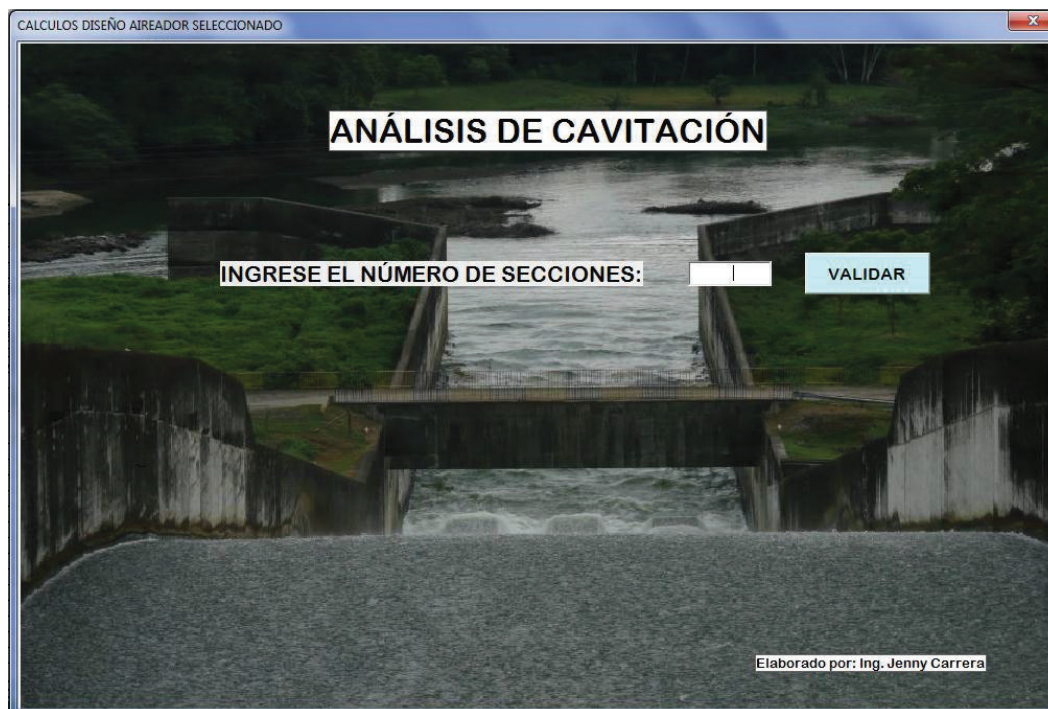
Como se muestra en la figura 4.5 las opciones de las cuales se dispone son:

- ✓ Análisis de Cavitación
- ✓ Dimensionamiento Aireador
- ✓ Reportes

4.4.3 ANÁLISIS DE CAVITACIÓN

La hacer clic sobre el botón que corresponde al Análisis de Cavitación se obtiene la siguiente pantalla.

FIGURA 4.6 ANÁLISIS DE CAVITACIÓN



ELABORADO POR: Carrera J.

En la figura 4.6, primero nos solicita que ingresemos el número de secciones con la cuales se va a trabajar en los cálculos, para cual existe una validación numérica además que las secciones deben estar entre el rango de 1 a 20.

Si se ingresan los valores correctamente al hacer clic sobre el botón validar se habilitarán los criterios que se pueden usar para el análisis de la cavitación, caso contrario nos saldrá un mensaje de error indicando la razón por que el dato ingresado es incorrecto.

FIGURA 4.7 CRITERIOS DISPONIBLES



The image shows a software window titled "CALCULOS DISEÑO AIREADOR SELECCIONADO". The main content area features a background image of a dam with water flowing through its spillways. Overlaid on this image is a form for "ANÁLISIS DE CAVITACIÓN". The form includes a text input field labeled "INGRESE EL NÚMERO DE SECCIONES:" with the value "20" entered, and a "VALIDAR" button. Below this, a message states: "Dato ingresado correctamente haga clic sobre el criterio a utilizar para el análisis de la cavitación." At the bottom of the form, there are two buttons: "CRITERIO DE THOMA" and "CRITERIO DE ECHAVEZ". In the bottom right corner of the window, there is a small text credit: "Elaborado por: Ing. Jenny Carrera".

ELABORADO POR: Carrera J.

Como se puede ver en la figura 4.7 tenemos dos opciones de criterios que se pueden utilizar para el análisis de la cavitación estos son:

- ✓ Criterio de Thoma
- ✓ Criterio de Echavez

FIGURA 4.8 CRITERIO DE THOMA

ANÁLISIS DEL RIESGO DE CAVITACIÓN					
DATOS					
Caudal de diseño	Q=		m ³ /s		
Ancho de rápida	B=		m		
Temperatura del agua	T=		grad		
Altitud	Alt=		msnm	Lugar del proyecto	
Presión atmosférica	ha=	10,139	m		
Carga de presión de vapor	hv=	0,003	m		
Índice de cavitación	σ =	0,2		Valor fijo de 0,2	
Aceleración de Gravedad	g=		m/s ²		
INDICES DE CAVITACIÓN UTILIZANDO EL CRITERIO DE THOMA					
Sección	x (m)	y (m)	V (m/s)	σ_c (Thoma)	RIESGO
1			#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!
2			#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!
3			#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!
4			#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!
5			#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!
6			#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!
7			#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!
8			#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!
9			#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!
10			#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!
11			#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!
12			#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!
13			#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!
14			#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!
15			#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!
16			#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!
17			#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!
18			#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!
19			#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!
20			#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!

ELABORADO POR: Carrera J.

En la figura 4.8 se despliega la hoja de cálculo con el número de secciones que hemos ingresado y con los campos listos para poder ingresar los valores que se necesitan para identificar si existe o no cavitación.

Desde esta hoja se puede regresar a las pantallas haciendo clic sobre los botones disponibles y al lugar que se desee regresar.

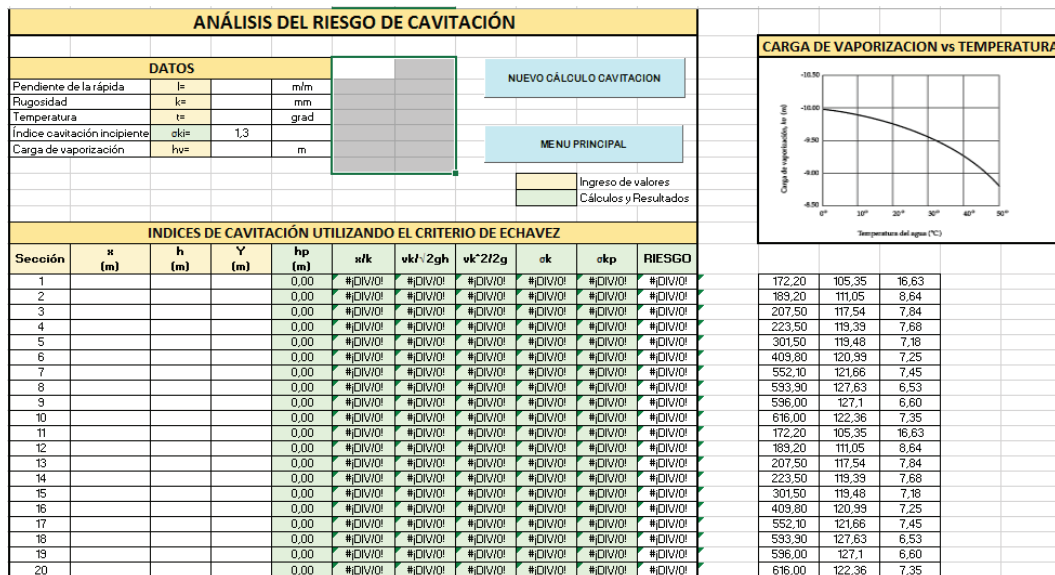
Los botones disponibles son:

- ✓ Menú principal.- Permite que el usuario regrese a la pantalla de selección de las opciones disponibles para seleccionar Análisis de Cavitación, Dimensionamiento Aireador o Reportes.

- ✓ Nuevo Cálculo de Cavitación.- Este botón nos dirige directamente a la ventana de Análisis de Cavitación para ingresar el número de secciones con las que deseamos trabajar y poder seleccionar el criterio.

Es importante considerar que cada vez que se ingresa el número de secciones y se selecciona el criterio la hoja de cálculo automáticamente limpia cualquier valor existente.

FIGURA 4.9 CRITERIO ECHÁVEZ



ELABORADO POR: Carrera J.

En la figura 4.9 se despliega la hoja de cálculo con el número de secciones que hemos ingresado y con los campos listos para poder ingresar los valores que se necesitan para identificar si existe o no cavitación.

Desde esta hoja se puede regresar a las pantallas haciendo clic sobre los botones disponibles y al lugar que se desee regresar.

Los botones disponibles son:

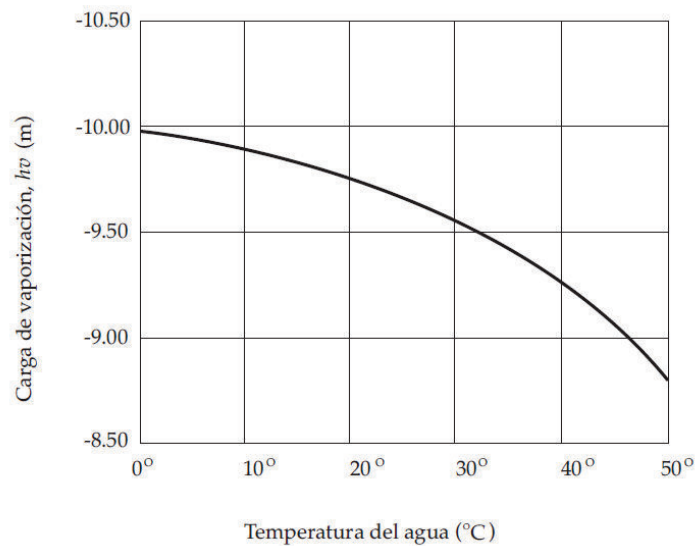
- Menú principal.- Permite que el usuario regrese a la pantalla de selección de las opciones disponibles para seleccionar Análisis de Cavitación, Dimensionamiento Aireador o Reportes
- Nuevo Cálculo de Cavitación.- Este botón nos dirige directamente a la ventana de Análisis de Cavitación para ingresar el número de secciones con las que deseamos trabajar y poder seleccionar el criterio.

Es importante considerar que cada vez que se ingresa el número de secciones y se selecciona el criterio la hoja de cálculo automáticamente limpia cualquier valor existente.

- El ingreso y cambio de datos que involucren en el dimensionamiento deberá registrarse en la tabla de DATOS.
- Los valores deben ser ingresados según las unidades descritas en la celda contigua para evitar factores de conversión en las fórmulas dispuestas en la hoja de cálculo y así evitar errores en el resultado.
- Los cambios requeridos solamente se los realizará en esta hoja, luego del ingreso de datos, automáticamente se calculan las variables.
- Es importante tener en cuenta las observaciones, notas y limitaciones de cada fórmula.
- Para el cálculo de la cavitación es necesario seleccionar el criterio para evaluar el riesgo de cavitación.
- El Criterio de Echávez y el Criterio de Thoma dependen de distintos datos por lo que según el requerimiento se establece dos tablas distintas que evalúan el riesgo.

- Para el Criterio de Echávez, el valor de la carga de presión de vapor es obtenida del gráfico Temperatura del agua (°) vs. Carga de vaporización (m). Es importante introducir el valor con el signo negativo en los datos. Ver Figura 4.3.
- El índice de cavitación incipiente depende de la rugosidad equivalente, seleccionar su valor según la superficie. Ver Tabla 2.1.

FIGURA 4.10 CARGA DE VAPORIZACIÓN DEL AGUA. ECHÁVEZ G. 1971



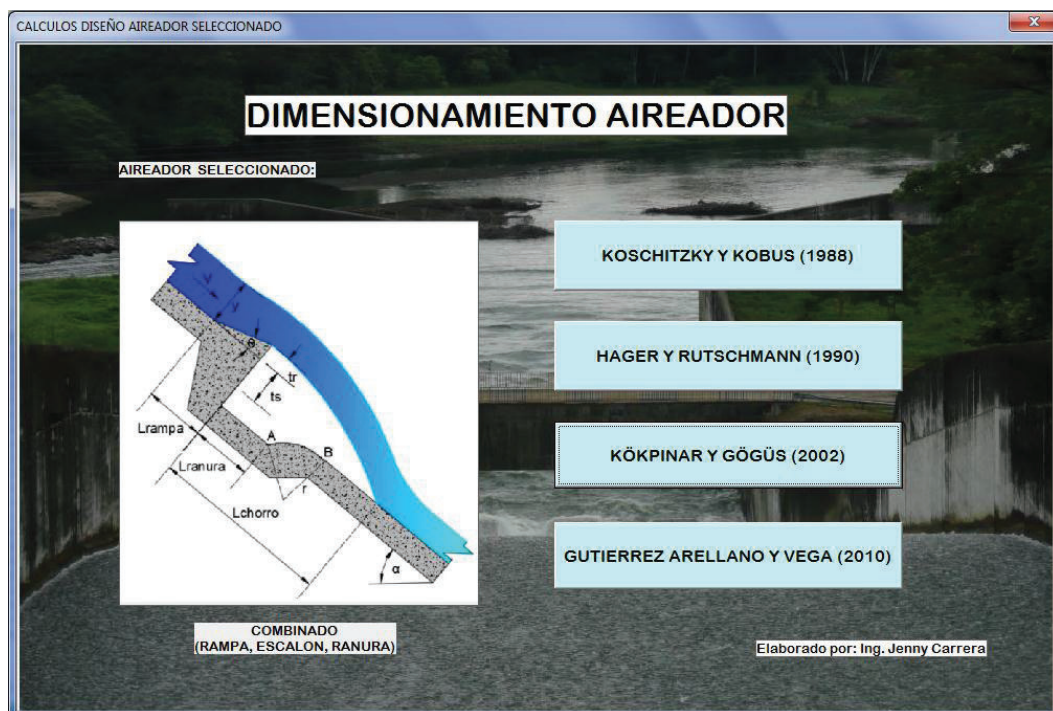
FUENTE: Echávez G., 1971

- Para el Criterio de Thoma, se ingresa como dato la altitud (m.s.n.m) a la que se encuentra el sitio donde se implanta el proyecto hidráulico.
- El resultado obtenido es una evaluación del riesgo de cavitación según las condiciones del método

4.4.4 DIMENSIONAMIENTO AIREADOR

A continuación en la figura 4.10 se observa la ventana que se despliega una vez que hemos dado clic sobre el botón Dimensionamiento Aireador, en la ventana tenemos una gráfica del aireador seleccionado y un botón para los métodos disponibles en la hoja de cálculo los cuales nos ayudaran a obtener valores importantes relacionados al dimensionamiento del aireador.

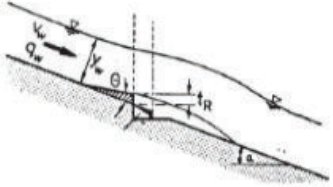
FIGURA 4.11 DIMENSIONAMIENTO AIREADOR



ELABORADO POR: Carrera J.

Si se hace clic sobre cada uno de los botones disponibles en la ventana de dimensionamiento aireador cada uno de ellos nos llevara a su respectiva hoja de cálculo donde se solicitan algunos datos para obtener los resultados en cada método y que posteriormente pueden ser analizados en la opción de Reporte.

FIGURA 4.12 MÉTODO KOSCHITZKY Y KOBUS (1988)

DIMENSIONAMIENTO DE AIREADOR									
SELECCIONAR CRITERIO		MENUPRINCIPAL							
DATOS									
Criterio: Koschitzky y Kobus (1988)									
Parámetros	omenclatul	Valor	Unidad	Observaciones					
Caudal	Q		m ³ /s						
Ancho de la rápida	B		m						
Caudal unitario	qw	#DIV/0!	m ³ /s/m						
Velocidad	Vw		m/s						
Aceleración de Gravedad	g		m/s ²						
Ángulo de la rápida	α		-						
Ángulo de la rampa	β		-						
Altura de la rampa	tr		m						
Densidad del agua	ρ _w		kg/m ³						
Densidad del aire	ρ _a		kg/m ³						
Subpresión	Δp		kPa	en la cavidad bajo la lámina de agua					
Constante	C1		-						
	C2		-						
	C3		-	Recomendación Flutchmann					
Coefficiente de pérdidas totales	ξ0		-	Sistema de aire (ducto)					
MÉTODO: Koschitzky y Kobus (1988)									
FUNCIONAMIENTO DEL AIREADOR CON RAMPA									
Parámetros	omenclatul	Valor	Unidad	Observaciones					
Calado del flujo	y _w	#DIV/0!	m						
Calado crítico	Y _{cr}	#DIV/0!	m						
Número Froude	Fr	#DIV/0!	-						
Número Froude crítico	Fr _{cr}	#DIV/0!	-	Condición de flujo aireado					
Demanda relativa de aire	β	#DIV/0!	-						
Velocidad del aire	V _{air}	#DIV/0!	m/s						
Subpresión en la entrada	Δp0	#DIV/0!	Pa						
Subpresión en la entrada	Δp0	#DIV/0!	m						
Subpresión al final	ΔpB	#DIV/0!	Pa						
Subpresión en pared lateral	ΔpB	#DIV/0!	m	o en el centro					
Caudal de arrastre total de aire	Q _{air}	#DIV/0!	m ³ /s						
Área del ducto de aire	A _{air}	#DIV/0!	m ²						
REFERENCIA GRÁFICA DE PARÁMETROS									
									
<table border="1"> <tr> <td style="background-color: #ffffcc;"></td> <td>Ingreso de valores</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #c6efce;"></td> <td>Cálculos y Resultados</td> </tr> </table>						Ingreso de valores		Cálculos y Resultados	
	Ingreso de valores								
	Cálculos y Resultados								
<table border="1"> <tr> <td>CRITERIO DE THOMA</td> <td>CRITERIO DE ECHAVEZ</td> <td style="background-color: #c6efce;">CRITERIO KK1988</td> <td>CRITERIO HR1990</td> <td>CRITERIO</td> </tr> </table>					CRITERIO DE THOMA	CRITERIO DE ECHAVEZ	CRITERIO KK1988	CRITERIO HR1990	CRITERIO
CRITERIO DE THOMA	CRITERIO DE ECHAVEZ	CRITERIO KK1988	CRITERIO HR1990	CRITERIO					

ELABORADO POR: Carrera J.

En la figura 4.12 se despliega la hoja de cálculo con los campos listos para poder ingresar los valores que se necesitan para el dimensionamiento del aireador

Desde esta hoja se puede regresar a las pantallas haciendo clic sobre los botones disponibles y al lugar que se desee regresar.

Los botones disponibles son:

- Menú principal.- Permite que el usuario regrese a la pantalla de selección de las opciones disponibles para seleccionar Análisis de Cavitación, Dimensionamiento Aireador o Reportes

En la figura 4.13 se despliega la hoja de cálculo con los campos listos para poder ingresar los valores que se necesitan para el dimensionamiento del aireador

Desde esta hoja se puede regresar a las pantallas haciendo clic sobre los botones disponibles y al lugar que se desee regresar.

Los botones disponibles son:

- Menú principal.- Permite que el usuario regrese a la pantalla de selección de las opciones disponibles para seleccionar Análisis de Cavitación, Dimensionamiento Aireador o Reportes
- Seleccionar Criterio.- Este botón nos dirige directamente a la ventana de Dimensionamiento Aireador para poder seleccionar el mismo criterio u otro.

Es importante considerar que cada vez que se selecciona el mismo criterio u otro la hoja de cálculo automáticamente limpia cualquier valor existente.

FIGURA 4.14 MÉTODO KÖKPINAR Y GÖGÜS (2002)

DIMENSIONAMIENTO DE AIREADOR				
SELECCIONAR CRITERIO		MENU PRINCIPAL		
DATOS				
Criterio Kökpınar y Gögüs (2002)				
Parámetros	Nomenclatura	Valor	Unidad	Observaciones
Caudal de diseño	Qd		m ³ /s	
Ancho de la rápida	Br		m	
Velocidad del flujo	V		m/s	
Calado del flujo en la rampa	y _r		m	
Número de Froude	Fr	#!DIV/0!	-	
Ángulo de la rampa	θ		grad	
Ángulo de la rampa	θ	0,00	rad	
Ángulo de la rápida	α		grad	
Ángulo de la rápida	α	0,00	rad	
Altura de la rampa	tr		m	Recomendación
Altura del escalón	ts		m	Recomendación
Longitud de la rampa	lr		m	Recomendación
Longitud del escalón	ls		m	Recomendación
Radio de curvatura	r		m	Para pendientes fuertes y para drenaje en la ranura
Longitud de ducto de aire	bd		m	
Ancho de ducto de aire	ad		m	Recomendación bd/ad=1,5
Área de entrada de aire	Aa		m ²	
Área de entrada de aire	Aw	0,00	m ²	
Densidad del agua	pw		Kg/m ³	
Densidad del aire	pa		Kg/m ³	
Tensión superficial	σw		N/m	
Gravedad	g		m/s ²	
Constante 1	φ'		-	
Constante 2	φ''		-	
Coefficiente de pérdidas totales	ΣC _{pw}		-	
MÉTODO: Kökpınar y Gögüs (2002)				
Longitud del chorro "Ljet"				
Parámetros	Nomenclatura	Valor	Unidad	Observaciones
LIMITACIONES	Fr	#!DIV/0!	-	5,6<=Fr<=10
	(tr+ts)/y	#!DIV/0!	-	0,198<=(tr+ts)/y<=1,985
	tan α	0,00	rad	0<tan α<=1,25
	Aa/Aw	#!DIV/0!	-	0,00684<=Aa/Aw<=1
Longitud del chorro	Ljet	#!DIV/0!	m	
Demanda de aire "β"				
Parámetros	Nomenclatura	Valor	Unidad	Observaciones
LIMITACIONES	Fr	#!DIV/0!	-	3,4 ≤ Fr ≤ 12,36
	tr/y	#!DIV/0!	-	0 ≤ tr/h ≤ 0,4
	θ	OK	°	0° ≤ θ ≤ 5,71°
	tan α	OK	rad	0 ≤ tan α ≤ 0,57
Demanda de aire superior	β _{sup}	#!DIV/0!	-	
LIMITACIONES	θ	OK	°	0° ≤ θ ≤ 9,45°
	tan α	OK	rad	0 ≤ tan α ≤ 1,25
	Fr	#!DIV/0!	-	5,56 ≤ Fr ≤ 10,00
	θ Tr/Ts	#!DIV/0!	-	0 ≤ θ Tr/Ts ≤ 0,8
	tr/y	#!DIV/0!	-	0 ≤ tr/h ≤ 0,4
	Aa/Aw	#!DIV/0!	-	0,02 ≤ A/Aw ≤ 1
	We	#!DIV/0!	-	109 ≤ We ≤ 182
Número de Weber	We	#!DIV/0!	-	
Demanda de aire inferior	β _{inf}	#!DIV/0!	-	
Subpresión de la cavidad, velocidad del aire en el sistema				
Parámetros	Nomenclatura	Valor	Unidad	Observaciones
LIMITACIONES	Ljet/y	#!DIV/0!	-	1,095 ≤ Ljet/y ≤ 30,06
	tan α	0,42	-	0,03 ≤ tan α ≤ 1,25
	Aa/Aw	#!DIV/0!	-	0,00684 ≤ A/Aw ≤ 0,447
	Fr	6,19	-	4,31 ≤ Fr ≤ 8,73
Parámetros	(P _a) _e	#!DIV/0!	-	
	(P _a) _p	#!DIV/0!	-	
	Δp ⁺	#!DIV/0!	KPa	
	Δp ⁻	#!DIV/0!	m	
	Velocidad del aire	Va	#!DIV/0!	m/s
Caudal de aire	Qa	#!DIV/0!	m ³ /s	con β _{sup}
Caudal de aire	Qa	#!DIV/0!	m ³ /s	con β _{inf}

Ingreso de valores

Cálculos y Resultados

ELABORADO POR: Carrera J.

CRITERIO DE THOMA

CRITERIO DE ECHAVEZ

CRITERIO KK1988

CRITERIO HR1990

CRITERIO KG2002

CRITERIO GV2010

RE

En la figura 4.14 se despliega la hoja de cálculo con los campos listos para poder ingresar los valores que se necesitan para el dimensionamiento del aireador

Desde esta hoja se puede regresar a las pantallas haciendo clic sobre los botones disponibles y al lugar que se desee regresar.

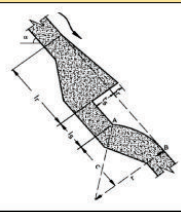
Los botones disponibles son:

- Menú principal.- Permite que el usuario regrese a la pantalla de selección de las opciones disponibles para seleccionar Análisis de Cavitación, Dimensionamiento Aireador o Reportes
- Seleccionar Criterio.- Este botón nos dirige directamente a la ventana de Dimensionamiento Aireador para poder seleccionar el mismo criterio u otro.

Es importante considerar que cada vez que se selecciona el mismo criterio u otro la hoja de cálculo automáticamente limpia cualquier valor existente.

FIGURA 4.15 MÉTODO GUTIERREZ ARELLANO Y VEGA (2010)

DIMENSIONAMIENTO DE AIREADOR				
SELECCIONAR CRITERIO		MENU PRINCIPAL		
FUNCIONAMIENTO DEL AIREADOR: DEMANDA DE AIRE " β "				
Criterio: Gutierrez Arellano y Vega (2010)				REFERENCIA GRÁFICA DE PARÁMETROS
Item	Nomenclatura	Valor	Unidad	Observaciones
Caudal de agua	Q		m ³ /s	
Calado de agua	y		m	
Velocidad del flujo	V		m/s	
Gravedad	g		m/s ²	
Densidad del aire	ρ_a		kg/m ³	
Subpresión en la cavidad	Δp		kPa	
Coefficiente de pérdidas totales	ξ_0		-	
Velocidad del aire	Va	# DIV/0!	m/s	
Número de Froude	Fr	# DIV/0!	-	
Demanda de aire	β	# DIV/0!	#	Relación entre Qa y Qw
Caudal de aire	Qa	# DIV/0!	m ³ /s	
Área del ducto de aire	Aair	# DIV/0!	m ²	



Ingreso de valores
Cálculos y Resultados

CRITERIO DE THOMA	CRITERIO DE ECHAVEZ	CRITERIO KK1988	CRITERIO HR1990	CRITERIO KG2002	CRITERIO GV2010
-------------------	---------------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------

ELABORADO POR: Carrera J.

En la figura 4.15 se despliega la hoja de cálculo con los campos listos para poder ingresar los valores que se necesitan para el dimensionamiento del aireador

Desde esta hoja se puede regresar a las pantallas haciendo clic sobre los botones disponibles y al lugar que se desee regresar.

Los botones disponibles son:

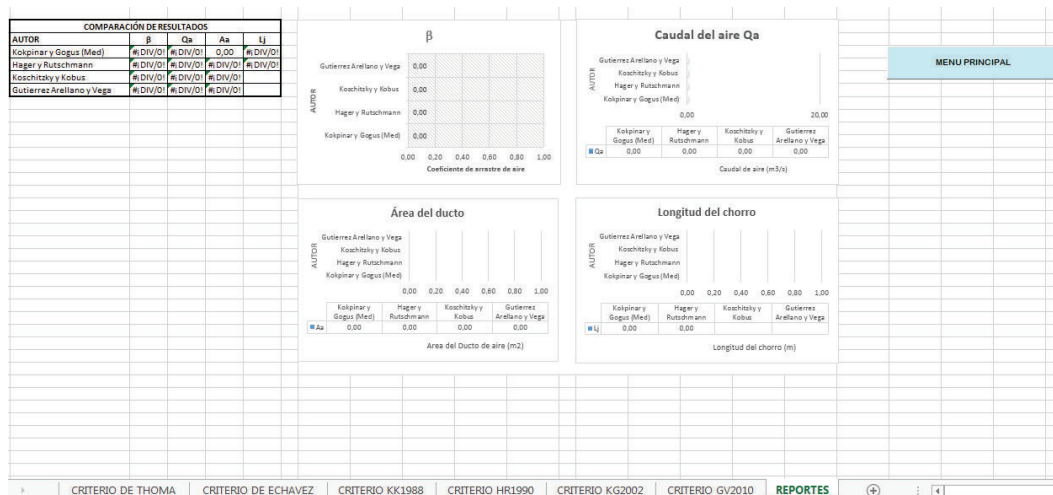
- Menú principal.- Permite que el usuario regrese a la pantalla de selección de las opciones disponibles para seleccionar Análisis de Cavitación, Dimensionamiento Aireador o Reportes
- Seleccionar Criterio.- Este botón nos dirige directamente a la ventana de Dimensionamiento Aireador para poder seleccionar el mismo criterio u otro.

Es importante considerar que cada vez que se selecciona el mismo criterio u otro la hoja de cálculo automáticamente limpia cualquier valor existente.

- Los cálculos que se realizan en cada método tienen una etiqueta superior que nombra la variable a ser calculada.
- Los parámetros que se involucran en el método son expresados con su simbología correspondiente, valor, unidades según el sistema internacional y en la celda de observaciones se especifica los alcances, referencias o notas según corresponda.
- Se identifican datos y cálculos en sus respectivas tablas, obteniendo resultados según el método seleccionado.
- Los resultados que muestra cada método son resaltados al final en cada tabla permitiendo identificar puntualmente el valor de la incógnita ya resuelta.

- Existen valores que requieren iteraciones por lo que es necesario identificar la celda con la fórmula, igualar con el valor cero para cambiar la celda que intervenga en el cálculo. Esta celda está identificada con la palabra ITERACION en el campo Observaciones.
- Cada método tiene identificado las limitaciones de sus ecuaciones y están establecidas claramente en los cálculos, por lo que es necesario tener especial cuidado en la selección del método para cumplir con las condiciones y verificar si cumple o no el valor dentro del rango.

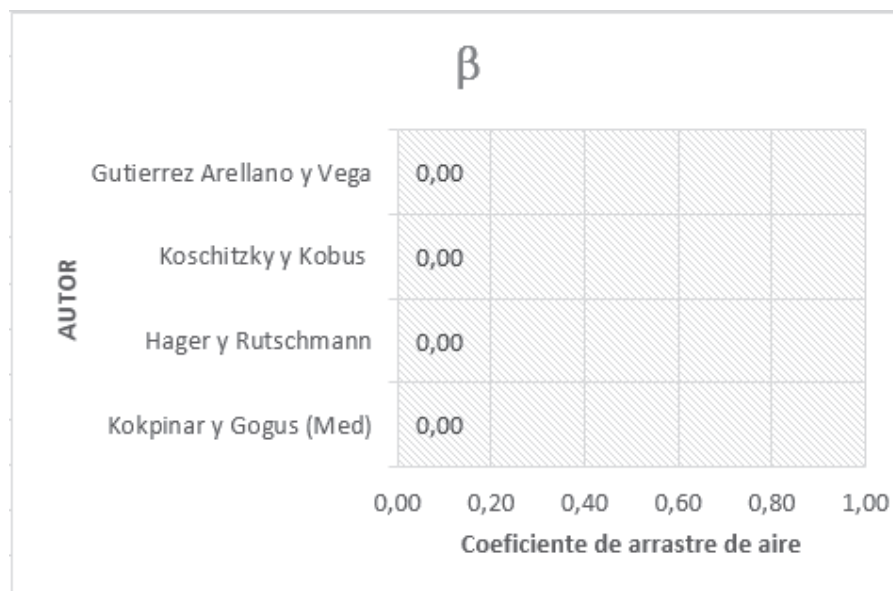
FIGURA 4.16 REPORTE



ELABORADO POR: Carrera J.

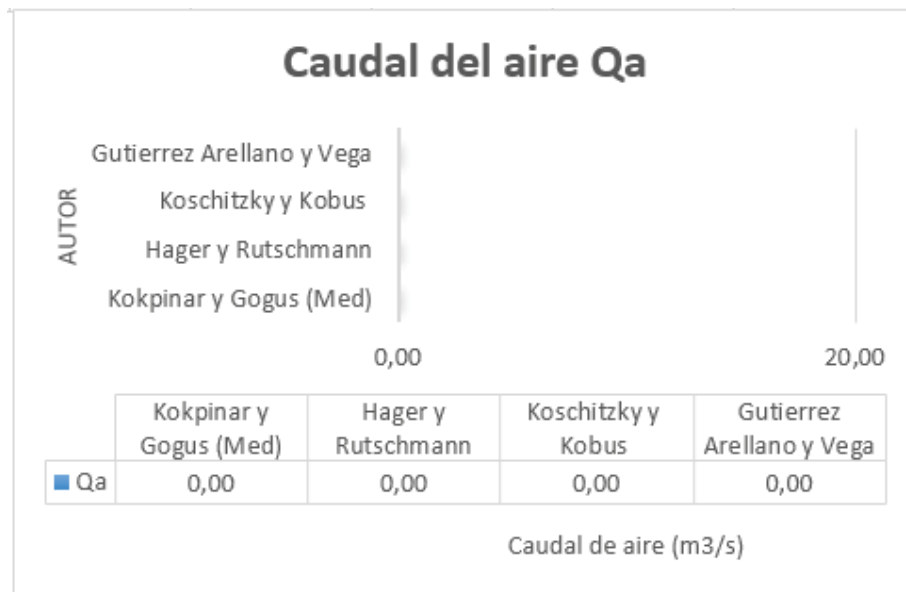
A continuación en las figuras 4.17, 4.18, 4.19, 4.20 se pueden observar cada uno de los gráficos comparativos que forman parte de los reportes en base a los resultados que se obtengan.

FIGURA 4.17 COEFICIENTE DE ARRASTRE DE AIRE



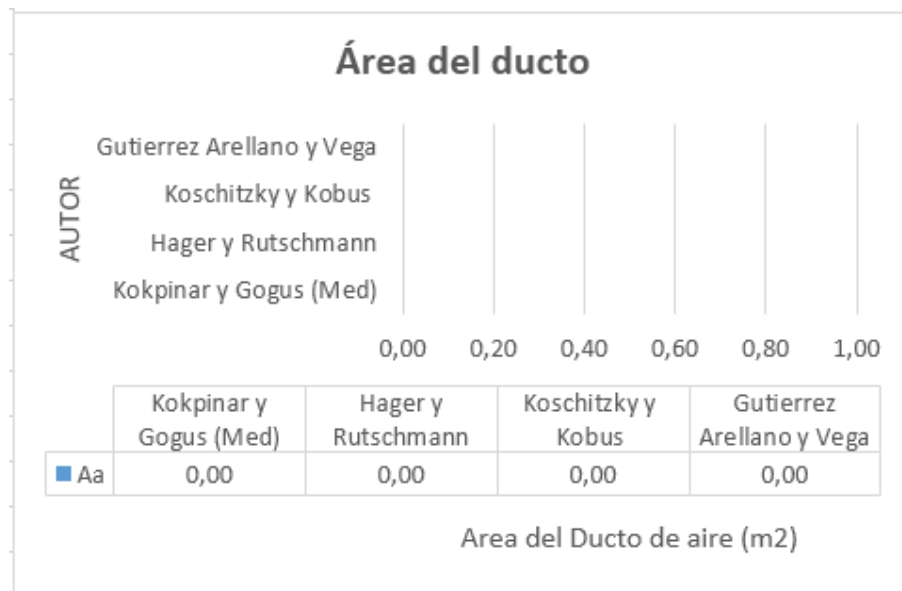
ELABORADO POR: Carrera J.

FIGURA 4.18 CAUDAL DEL AIRE



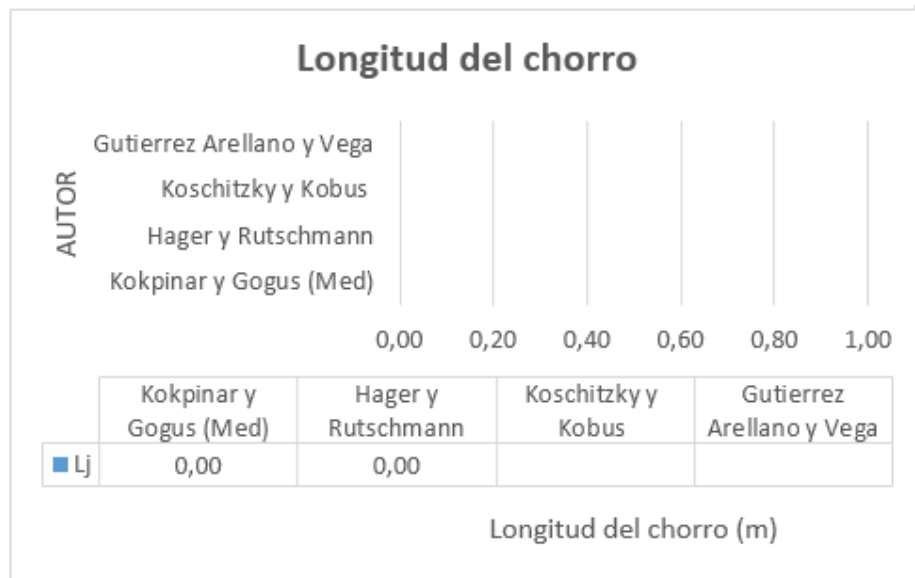
ELABORADO POR: Carrera J.

FIGURA 4.19 ÁREA DEL DUCTO



ELABORADO POR: Carrera J.

FIGURA 4.20 LONGITUD DEL CHORRO



ELABORADO POR: Carrera J.

4.5 EJEMPLO DE CÁLCULO EN BASE AL AIREADOR SELECCIONADO USANDO LA HOJA DE CÁLCULO CREADA

Analizar la cavitación para una sección de interés, según el criterio de Echávez y el criterio de Thoma, para un flujo de agua de temperatura 20°C, la rugosidad equivalente $k=10\text{mm}$ y presión de agua en el fondo de la rápida de 1,5m, la velocidad del flujo es de 30m/s.

El sitio de implantación está ubicado a una altitud de 2850msnm Para una rápida empinada compuesta por un aireador, el caudal de diseño es de $622,22\text{m}^3/\text{s}$, el ancho de la rápida es de 15,30m.

El aireador consta de una rampa con una inclinación de $10,16^\circ$ y un escalón con inclinación de 23° . Los datos hidráulicos se ingresan previamente calculados.

Determinar la longitud del chorro, el caudal de aire, velocidad de aire y dimensionamiento del ducto de aire empleando los métodos propuestos en la hoja de cálculo y con base a la teoría y fórmulas descritas en el contenido de este estudio.

4.5.1 ANÁLISIS DE LA CAVITACIÓN

FIGURA 4.21 INGRESO DE DATOS CRITERIO DE THOMA

ANÁLISIS DEL RIESGO DE CAVITACIÓN						
DATOS						
Caudal de diseño	Q=	1000	m3/s			
Ancho de rápida	B=	15,3	m			
Temperatura del agua	T=	20	grad			
Altitud	Alt=	2850	msnm	Lugar del proyecto		
Presi3n atmosférica	ha=	7,289	m			
Carga de presi3n de vapor	hv=	0,288	m			
ndice de cavitaci3n	σ=	0,2		Valor fijo de 0,2		
Aceleraci3n de Gravedad	g=	9,81	m/s2			
INDICES DE CAVITACI3N UTILIZANDO EL CRITERIO DE THOMA						
Secci3n	x (m)	y (m)	V (m/s)	σc (Thoma)	RIESGO	
1	20	1,6	40,85	0,10	SI	⊗
2	40	1,56	41,90	0,10	SI	⊗
3	60	1,52	43,00	0,09	SI	⊗
4	80	1,5	43,57	0,09	SI	⊗
5	100	1,48	44,16	0,09	SI	⊗
6	120	1,44	45,39	0,08	SI	⊗
7	140	1,3	50,28	0,06	SI	⊗
8	160	1,26	51,87	0,06	SI	⊗
9	180	1,23	53,14	0,06	SI	⊗
10	200	1,2	54,47	0,05	SI	⊗

ELABORADO POR: Carrera J.

FIGURA 4.22 INGRESO DE DATOS CRITERIO DE ECHAVEZ

ANÁLISIS DEL RIESGO DE CAVITACIÓN											
DATOS											
Pendiente de la rápida	lv=	0,14	m/m								
Rugosidad	ka=	7	mm								
Temperatura	tw=	20	grad								
ndice cavitaci3n incipiente	oki=	1,6									
Carga de vaporizaci3n	hw=	-9,75	m								
INDICES DE CAVITACI3N UTILIZANDO EL CRITERIO DE ECHAVEZ											
Secci3n	x (m)	h (m)	Y (m)	hp (m)	x/k	vk/√2gh	vk²/2g	ok	okp	RIESGO	
1	20	30	1,6	1,58	2857	0,44	5,91	1,92	1,92	NO	⊗
2	40	32	1,56	1,54	5714	0,41	5,41	2,09	2,09	NO	⊗
3	60	34	1,52	1,50	8571	0,39	5,28	2,13	2,13	NO	⊗
4	80	36	1,5	1,49	11429	0,38	5,28	2,13	2,13	NO	⊗
5	100	38	1,48	1,47	14286	0,37	5,33	2,10	2,10	NO	⊗
6	120	40	1,44	1,43	17143	0,37	5,42	2,06	2,06	NO	⊗
7	140	42	1,3	1,29	20000	0,36	5,53	2,00	2,00	NO	⊗
8	160	44	1,26	1,25	22857	0,36	5,65	1,95	1,95	NO	⊗
9	180	46	1,23	1,22	25714	0,35	5,78	1,90	1,44	SI	⊗
10	200	48	1,2	1,19	28571	0,35	5,91	1,85	1,41	SI	⊗

Temperatura del agua (°C)	Carga de vaporizaci3n (m)
172,20	105,35
189,20	111,05
207,50	117,54
223,50	119,39
301,50	119,48
409,80	120,99
552,10	121,66
593,90	127,63
596,00	127,1
616,00	122,36

ELABORADO POR: Carrera J.

Conclusiones:

- Los datos ingresados para el cálculo de los criterios de Echávez y Thoma permiten evaluar el riesgo de cavitación a partir del resultado obtenido de índice de cavitación incipiente e índice de cavitación crítico respectivamente .
- Para el caso planteado se observa que en la sección de interés escogida, el riesgo de cavitación es inminente.
- Estos criterios de cavitación determinan que en esta sección es el lugar indicado para implantar el aireador seleccionado.
- El aireador es la solución recomendada para evitar el fenómeno cavitante en la rápida, permitiendo la incorporación de aire en el flujo de agua.

4.5.2 GEOMETRÍA DEL AIREADOR SELECCIONADO


El caso de estudio que se recomienda es un aireador combinado por una rampa, un escalón y una ranura, adicionalmente como solución constructiva se plantea redondear la pared de la ranura a la salida, permitiendo el desfogue de flujo para caudales pequeños.

El ducto de aire seleccionado es de sección rectangular cerrada impidiendo la formación de ondas a causa de una sección abierta. El ducto está implantado en las paredes laterales de la rápida para el ingreso de aire. Los lados de la sección del ducto están en una relación de 1,5.

4.5.3 DIMENSIONAMIENTO AIREADOR

FIGURA 4.23 MÉTODO KOSCHITZKY Y KOBUS (1988)

DIMENSIONAMIENTO DE AIREADOR				
SELECCIONAR CRITERIO		MENU PRINCIPAL		
DATOS				
Criterio: Koschitzky y Kobus (1988)				
Parámetros	omenclatura	Valor	Unidad	Observaciones
Caudal	Q	622,22	m ³ /s	
Ancho de la rápida	B	15,30	m	
Caudal unitario	qw	40,67	m ³ /s/m	
Velocidad	Vw	24,52	m/s	
Aceleración de Gravedad	g	9,81	m/s ²	
Ángulo de la rápida	α	20,30	-	
Ángulo de la rampa	θ	5,20	-	
Altura de la rampa	tr	0,00	m	
Densidad del agua	ρ_w	1000,00	kg/m ³	
Densidad del aire	ρ_{air}	1,20	kg/m ³	
Subpresión	Δp	2,21	kPa	en la cavidad bajo la lámina de agua
Constante	C1	0,007	-	
	C2	0,002	-	
	C3	1,50	-	Recomendación Futchmann
Coefficiente de pérdidas totales	ξ_0	2,00	-	Sistema de aire (ducto)
MÉTODO: Koschitzky y Kobus (1988)				
FUNCIONAMIENTO DEL AIREADOR CON RAMPA				
Parámetros	omenclatura	Valor	Unidad	Observaciones
Calado del flujo	y _w	1,66	m	
Calado crítico	Y _{cr}	5,52	m	
Número Froude	Fr	6,09	-	
Número Froude crítico	Fr _{cr}	0,60	-	Condición de flujo aireado
Demanda relativa de aire	β	0,09	-	
Velocidad del aire	V _{air}	41,30	m/s	
Subpresión en la entrada	Δp_0	3080,93	Pa	
Subpresión en la entrada	Δp_0	0,31	m	
Subpresión al final	Δp_B	2053,95	Pa	
Subpresión en pared lateral	Δp_B	0,21	m	o en el centro
Caudal de arrastre total de aire	Q _{air}	56,03	m ³ /s	
Área del ducto de aire	A _{air}	1,40	m ²	



REFERENCIA GRÁFICA DE PARÁMETROS

Ingreso de valores

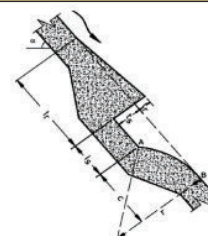
Cálculos y Resultados

ELABORADO POR: Carrera J.

FIGURA 4.24 MÉTODO HAGER Y RUTSCHMANN (1990)

DIMENSIONAMIENTO DE AIREADOR				
SELECCIONAR CRITERIO		MENU PRINCIPAL		
DATOS				
Criterio: Hager y Rutschmann (1990)				
Parámetros	Nomenclatura	Valor	Unidad	Observaciones
Caudal de diseño	Qd	622,22	m ³ /s	
Ancho de la rápida	Br	15,30	m	
Velocidad del flujo	V	24,52	m/s	
Calado del flujo en la rampa	y _r	1,60	m	
Carga sobre aireador	H	36,30	m	
Altura de la rampa	tr	0,20	m	
Altura del escalón	ts	0,80	m	
Ángulo de la rápida	α	23,00	grad	
Ángulo de la rampa	θ	10,16	grad	
Densidad del agua	ρ _w	1000,00	Kg/m ³	
Densidad del aire	ρ _a	1,20	Kg/m ³	
Gravedad	g	9,81	m/s ²	
Coefficiente de pérdidas totales	ξ _{tot}	2,00	-	
Gradiente de presión	Pn	0,14	m	
MÉTODO: Hager y Rutschmann (1990)				
FUNCIONAMIENTO DEL AIREADOR CON RAMPA: Longitud del chorro				
Parámetros	Nomenclatura	Valor	Unidad	Observaciones
Número de Froude	Fr	6,19	-	
Altura relativa del aireador	T	0,63	-	
Altura relativa de la rampa	Tr	0,13	-	
Ángulo efectivo	θ _e	0,14	rad	
Longitud relativa del chorro	λ _j	12,97	-	Para aireador con rampa
Longitud del chorro	L _{jet}	20,75	m	Para aireador con rampa
FUNCIONAMIENTO DEL AIREADOR SIN RAMPA: Longitud del chorro				
Parámetros	Nomenclatura	Valor	Unidad	Observaciones
Número de Froude	Fr	6,192	-	
Altura relativa del aireador	T	0,50	-	
Longitud relativa del chorro	λ _j	6,46	-	Para aireador sin rampa
Longitud del chorro	L _{jet}	10,32	m	Para aireador sin rampa
Relación de Arrastre de aire β=Qa/Qw				
Parámetros	Nomenclatura	Valor	Unidad	Observaciones
Relación máxima de arrastre de aire	β _{max}	0,24	-	
Número de Euler mínimo	Eu _{min}	74,02	-	
Froude en el punto de impacto	Fp	0,06	-	
Relación de Arrastre de aire	β	0,09	-	
Relación de Arrastre de aire	β/β _{max}	0,36	-	
Variación	Ec	0,00	-	valor igual a cero. Iteración
Variación	ΔEu	127,54	-	
Número de Euler	Eu	201,57	-	
Subpresión en cavidad, velocidad del aire en el sistema				
Parámetros	Nomenclatura	Valor	Unidad	Observaciones
Subpresión en cavidad	Δp ⁻	2208,62	Pa	
Subpresión en cavidad	Δp ⁻	0,23	m	
Velocidad del aire	Va	41,31	m/s	
Caudal de aire	Qa	53,61	m ³ /s	
Area del ducto de aire	Aa	1,30	m ²	

REFERENCIA GRÁFICA DE PARÁMETROS



Ingreso de valores
Cálculos y Resultados

ELABORADO POR: Carrera J.

FIGURA 4.25 MÉTODO KÖKPINAR Y GÖGÜS (2002)

DIMENSIONAMIENTO DE AIREADOR				
SELECCIONAR CRITERIO		MENU PRINCIPAL		
DATOS				
Criterio Kökpinar y Gögüs (2002)				
Parámetros	lomenclatur	Valor	Unidad	Observaciones
Caudal de diseño	Qd	622,22	m ³ /s	
Ancho de la rápida	Br	15,30	m	
Velocidad del flujo	V	24,52	m/s	
Calado del flujo en la rampa	y _r	1,60	m	
Número de Froude	Fr	6,19	-	
Ángulo de la rampa	θ	10,16	grad	
Ángulo de la rampa	θ	0,18	rad	
Ángulo de la rápida	α	23,00	grad	
Ángulo de la rápida	α	0,40	rad	
Altura de la rampa	tr	0,20	m	Recomendación
Altura del escalón	ts	0,80	m	Recomendación
Longitud de la rampa	lr	4,00	m	Recomendación
Longitud del escalón	ls	2,00	m	Recomendación
Radio de curvatura	r	3,50	m	Para pendientes fuertes y para drenaje en la ranura
Longitud de ducto de aire	bd	4	m	
Ancho de ducto de aire	ad	3	m	Recomendación bd/ad=1,5
Área de entrada de aire	Aa	1,32	m ²	
Área de entrada de aire	Aw	24,47	m ²	
Densidad del agua	ρ _w	1000	Kg/m ³	
Densidad del aire	ρ _a	1,204	Kg/m ³	
Tensión superficial	σ _w	0,074	N/m	
Gravedad	g	9,81	m/s ²	
Constante 1	φ'	0,0733	-	
Constante 2	φ''	-0,1033	-	
Coefficiente de pérdidas totales	ξ _{total}	2	-	

REFERENCIA GRÁFICA DE PARÁMETROS

Ingreso de valores
 Cálculos y Resultados

ELABORADO POR: Carrera J.

FIGURA 4.26 MÉTODO GUTIERREZ ARELLANO Y VEGA (2010)

DIMENSIONAMIENTO DE AIREADOR				
SELECCIONAR CRITERIO		MENU PRINCIPAL		
FUNCIONAMIENTO DEL AIREADOR: DEMANDA DE AIRE " β "				
Criterio: Gutierrez Arellano y Vega (2010)				REFERENCIA GRÁFICA DE PARÁMETROS
Item	Nomenclatura	Valor	Unidad	Observaciones
Caudal de agua	Q	622,22	m ³ /s	
Calado de agua	y	1,60	m	
Velocidad del flujo	V	24,52	m/s	
Gravedad	g	9,81	m/s ²	
Densidad del aire	ρ_a	1,20	kg/m ³	
Subpresión en la cavidad	Δp	2,21	kPa	
Coefficiente de pérdidas totales	ξ_0	2,00	-	
Velocidad del aire	V _a	41,30	m/s	
Número de Froude	Fr	6,19	-	
Demanda de aire	β	0,138	#	Relación entre Q _a y Q _w
Caudal de aire	Q _a	85,65	m ³ /s	
Área del ducto de aire	A _{air}	2,10	m ²	

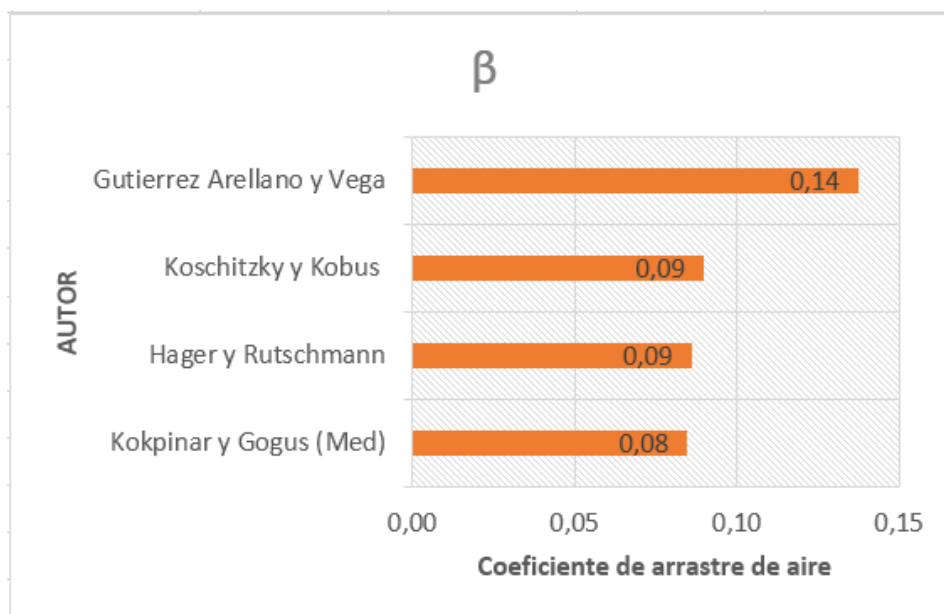


Ingreso de valores
Cálculos y Resultados

ELABORADO POR: Carrera J.

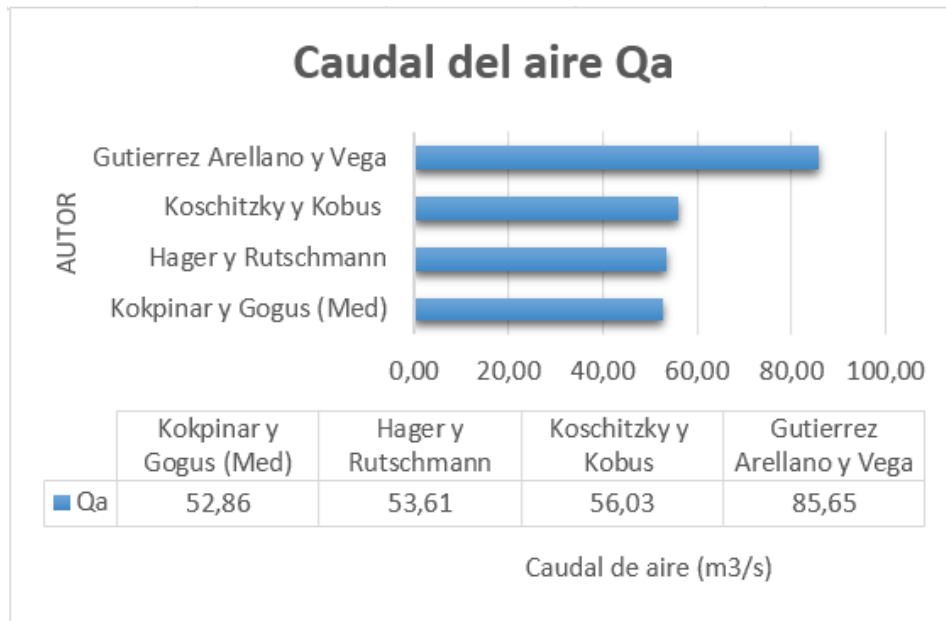
4.5.4 ANALISIS COMPARATIVO

FIGURA 4.27 GRÁFICO COMPARATIVO DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE DE AIRE OBTENIDO EN CADA MÉTODO, PARA DETERMINAR EL CAUDAL DE AIRE.



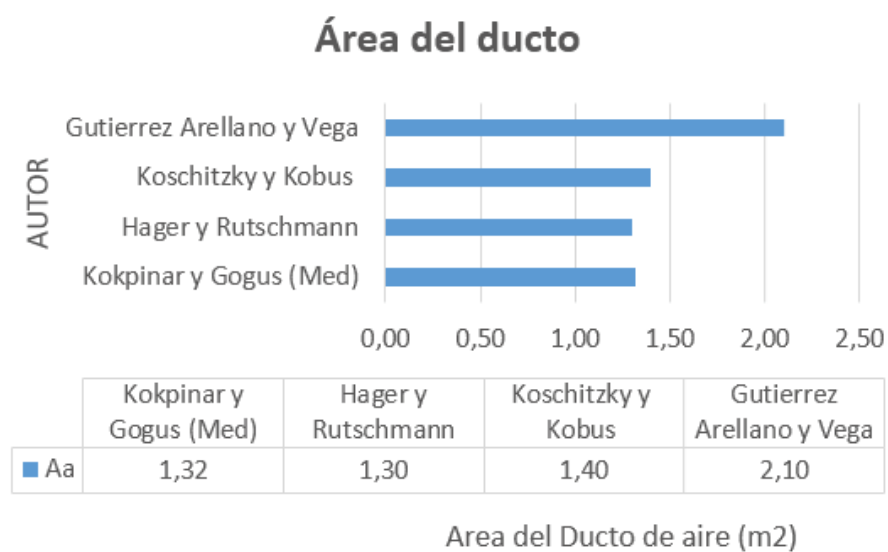
ELABORADO POR: Carrera J.

FIGURA 4.28 GRÁFICO COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL CAUDAL DE AIRE SEGÚN CADA MÉTODO PROPUESTO.



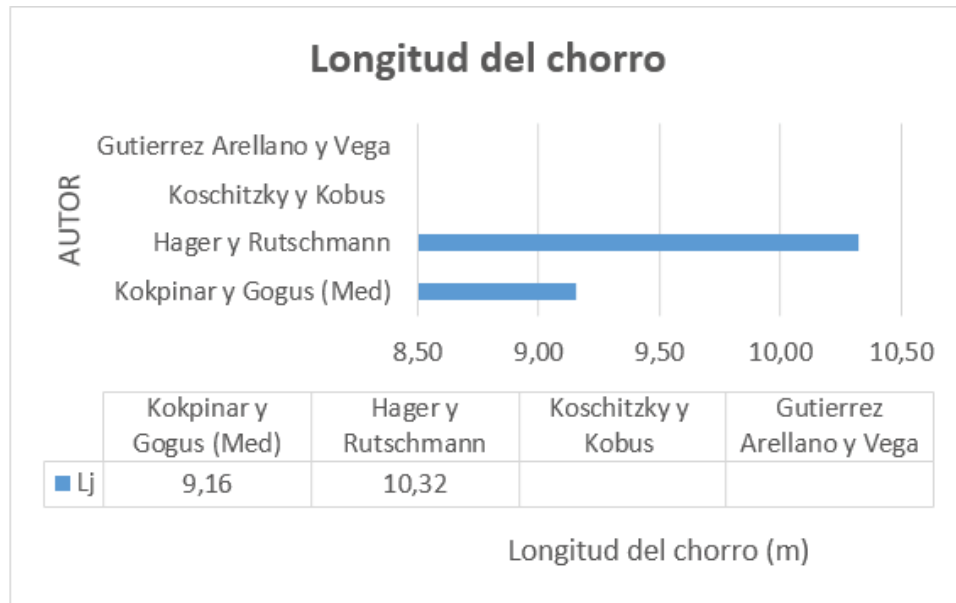
ELABORADO POR: Carrera J.

FIGURA 4.29 GRÁFICO COMPARATIVO DEL VALOR OBTENIDO PARA EL ÁREA DEL DUCTO DE AIRE



ELABORADO POR: Carrera J.

FIGURA 4.30 GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE EL MÉTODO DE HAGER Y RUTCHMANN CON KOKPINAR Y GOGUS, CON RESULTADOS DE LA LONGITUD DE CHORRO



ELABORADO POR: Carrera J.

Conclusiones:

- Los valores obtenidos de la relación de arrastre de aire β en cada método son muy cercanos entre ellos por lo que se puede optar por un valor medio entre ellos para una propuesta preliminar de diseño.
- La propuesta de Gutiérrez Arellano y Vega sobrepasan al valor medio obtenido en los tres métodos anteriores por lo que se descarta este resultado.
- Los parámetros que intervienen en el cálculo de cada método propuesto, permite que se consideren variables importantes que intervienen en el caso de estudio.

- La longitud del chorro para este caso se encuentra en un rango de entre 9,00m y 10,5m. Para un predimensionamiento se puede optar por un valor medio de longitud de chorro.
- Los valores de rampa y escalón se pueden ir variando para obtener distintos resultados que permitan ajustar sus valores al proyecto.
- Los resultados obtenidos son ejemplo para el cálculo de los métodos que puede ser intervenidos según el ingreso de datos y según las necesidades de la obra hidráulica.
- La comparación de resultados entre métodos permite el análisis de cada uno para adoptar un valor que permita el dimensionamiento y análisis del flujo hacia aguas abajo a lo largo de todo el proyecto.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Inicialmente se identifica una sección de control para aplicar las ecuaciones hidráulicas básicas. En el caso del canal con flujo supercrítico como la rápida, la sección de control se ubica aguas arriba y con caudal crítico en la sección inicial.
- Los valores de Froude son superiores al Froude crítico, estableciéndose un flujo inestable debido a las altas velocidades generadas en la rápida.
- Los estudios realizados en modelos físicos a escala, permiten comprender el fenómeno de arrastre de aire.
- Es importante considerar el incremento del calado del flujo, debido a la aireación artificial y al chorro deflectado, por lo que se requiere de un bordo libre para evitar que el flujo salga de las paredes de la rápida.
- Un buen diseño de aireador provocará valores elevados de concentración de aire en comparación con los del estado de equilibrio de la aireación. Aguas abajo del aireador la concentración de aire será menor al del estado de equilibrio pero no con valores de cero.
- El impacto del chorro hacia aguas abajo del aireador, no causa daños al hormigón, basado en reportes hidráulicos de presas.
- El aireador combinado por: la rampa, ranura y escalón, tiene un buen funcionamiento para una gama de caudales amplia, debido a que la rampa funciona perfectamente para caudales bajos, la ranura crea un espacio para que el aire sea generado y el escalón permite un desnivel de la solera,

haciendo de la trayectoria más larga y funcionando de mejor manera para caudales altos.

- El aireador combinado, seleccionado para el ejemplo presenta como variante a la salida de la ranura una curvatura en su pared con el fin de evitar acumulación de agua en la ranura, dando la posibilidad de evitar soluciones de desagüe que requieren otros aireadores.
- En este trabajo se plantea como solución el aireador para evitar que se presenten riesgos por cavitación, esta solución es factible en términos constructivos, es económica y permite un buen funcionamiento a lo largo de la vida útil de la rápida.
- El aireador combinado se selecciona para el desarrollo de la hoja de cálculo por varias razones: es un dispositivo que abarca: rampa, escalón y ranura; permite la evacuación del fluido mediante la curvatura de la ranura a la salida en dirección del flujo, pudiendo también conectarse la ranura con fondo plano a la rápida tratando de evitar esquinas que interrumpan el libre paso del flujo; funciona de mejor manera para una amplia gama de caudales a diferencia de los aireadores simples.
- Se destaca que dependiendo de cada proyecto se debe seleccionar el aireador más adecuado de acuerdo a las condiciones hidrológicas, geológicas e hidráulicas. El aireador combinado es el que más se ajusta a las necesidades de grandes caudales. Pero cabe recalcar que no se minimiza el funcionamiento de los otros tipos de aireadores.
- El aireador combinado permite elevar el flujo mediante la rampa creando una cavidad bajo el chorro con presiones negativas que permitan el ingreso de aire para su distribución en el flujo, la ranura hace posible que se abarque más volumen de aire y el escalón permite disminuir la cota de la solera a la salida y amplía la trayectoria del chorro para grandes caudales y también el espacio para el ingreso de aire.

- La hoja de cálculo desarrollada se convierte en una guía para el diseño del aireador y asegura el correcto funcionamiento de la rápida evitando que ocurran daños por cavitación.
- El criterio principal para la ubicación de un aireador es el análisis de la cavitación en toda la longitud de la rápida, por lo que se analiza este fenómeno basado en dos criterios: el Criterio de Echávez y el Criterio de Thoma, para el ejemplo en particular se ingresan 10 secciones (de un máximo de 20 que permite el programa) y los datos que solicita, los resultados obtenidos permiten identificar la sección en la que se advierte la cavitación mediante la comparación con los valores de los índices de cavitación admisible para cada criterio.
- El aireador se coloca en la primera sección identificada con riesgo de cavitación, la evaluación de las concentraciones aguas abajo del aireador permiten definir si se requiere o no de más aireadores, si la concentración de aire disminuye hasta el 8% esa es la sección idónea para ubicar un segundo aireador y así sucesivamente a lo largo de la rápida, y basados en la literatura técnica para una mayor distancia entre aireadores conviene tener una concentración de aire en el flujo hasta el 45%.
- Se analizó que para una gama de caudales el comportamiento de cavitación con el criterio de Thoma como lo muestra la Tabla adjunta, para el caudal de diseño de $622,22\text{m}^3/\text{s}$ la cavitación se presenta en la sección 7 al igual que para el caudal de $600\text{m}^3/\text{s}$, para caudales altos como $1000\text{m}^3/\text{s}$ la cavitación se presenta desde el inicio de la rápida y para caudales bajos no se presenta cavitación en ninguna sección. En este caso el primer aireador se ubicaría en la sección 7.

TABLA 5.1 CAUDAL DE DISEÑO

CAUDAL (m³/s)	σ_c (Thoma)	NOMBRE DE LA SECCIÓN EN RIESGO
100		Ninguna
200		Ninguna
500		Ninguna
550	0,20	8
600	0,18	7
Qd=622,22	0,17	7
1000	0,10	1

ELABORADO POR: Carrera J.

- Para rugosidades de 6mm y 7mm la cavitación se presenta en la sección 9, mientras que para rugosidades menores no se presenta cavitación en ninguna sección, y para rugosidades mayores a mm7 tampoco se presenta cavitación, es decir que en este caso mientras más liso esté la superficie menor a 6mm no habrá riesgo.
- Dentro del análisis de cavitación, conviene evaluar el fenómeno para distintas rugosidades del hormigón. Y cabe señalar que si la distribución de presiones tiene valores positivos, la rugosidad del hormigón le afecta, provocando presiones bajas en el flujo, entonces se puede optar por un valor máximo de irregularidad del hormigón dentro del aspecto constructivo para que no ocurra cavitación.
- Los métodos planteados para la solución del dimensionamiento del aireador presentan pequeñas variaciones entre sí, la comparación de los valores del coeficiente de arrastre de aire para determinar el caudal de aire muestran que la fórmula planteada por Gutiérrez, Arellano y Vega difiere en un 50% de los otros tres métodos. Por tal razón queda descartado este resultado para el ejemplo práctico, por razones de cálculo se puede realizar un valor

promedio de los resultados obtenidos siendo el coeficiente igual a 0,085, por ende el caudal de aire requerido es de $52,88\text{m}^3/\text{s}$.

- El área del ducto debe permitir el paso del caudal de aire de $52,88\text{m}^3/\text{s}$, por lo que basado en los resultados de los métodos el área que se requiere es de $1,34\text{m}^2$, la sección rectangular del ducto queda de la siguiente manera $0,95\text{m} \times 1,40\text{m}$, el lado largo es 1,5 veces el largo corto, por recomendación en técnica.
- La longitud del chorro obtenida de los métodos Hager y Rutchmann y Kokpinar y Gogus presentan valores de 10,32m y 9,16m respectivamente, se opta por un valor promedio de 9,74 aproximadamente como la longitud máxima que alcanzaría el chorro.
- Las dimensiones de escalón y rampa son ingresados como datos para cada método, por lo que si se requiere de una mayor longitud del chorro se debe variar los valores geométricos del aireador combinado.
- Para confirmar los resultados obtenidos por el programa para el diseño del aireador se requiere de una investigación a detalle en modelo físico hidráulico, que permita observar y medir el comportamiento hidráulico del flujo, con las dimensiones del aireador obtenidas en el diseño.

5.2 RECOMENDACIONES

- Cada tipo de aireador tiene una función específica, por lo que se recomienda que según las características del proyecto en estudio, se debe seleccionar el aireador más adecuado que cumpla con esas condiciones.
- Los métodos planteados son guías que se proponen en el presente trabajo, los resultados obtenidos deben ser comprobados con un modelo físico hidráulico con las restricciones correspondientes. Este trabajo debe ser tomado como un referente para un dimensionamiento preliminar.

- Se recomienda realizar modelos físico hidráulicos a escala reducida así como también modelación numérica tridimensional para evaluar el comportamiento hidráulico del flujo con la implantación del aireador en la rápida.
- Para el diseño preliminar de aireadores en base a la demanda de aire del chorro y el sistema de suministro de aire se toman en cuenta los Criterios del Dr. V. Semenkov citado en (Medina & Soriano 1992) señalando que: el porcentaje mínimo de concentración de aire debe ser del 7% al 8%, el porcentaje máximo de concentración de aire entre el 40% al 45% para que el salto del chorro sobre la ranura sea de 3 a 5 veces la dimensión del espesor de la lámina de agua antes del aireador, el porcentaje de pérdida de concentración de aire en el flujo está entre 0,3% a 0,4% por metro lineal.
- Para el diseño final del aireador se debe considerar:
 - Datos hidráulicos, topográficos, etc.
 - Cálculo de flujo no aireado: niveles de agua, velocidades de flujo, etc.
 - Análisis de los índices de cavitación a lo largo de la rápida para estimar el riesgo.
 - Diseño preliminar de los aireadores: ubicación, geometría, sistema de arrastre de aire.
 - Cálculos hidráulicos del aireador para cierta gama de caudales.
 - Cálculo del flujo aireado de agua a lo largo de la rápida, calados, velocidades y concentraciones de aire.
 - Diseño final de la estructura hidráulica incluido el aireador.

- Análisis del comportamiento del aireador para diferentes caudales, con el fin de establecer calados y de ser el caso buscar soluciones hidráulicas aguas abajo del aireador para el control del flujo evitando fenómenos de socavación, ondas cruzadas, etc.
- El espaciamiento de los aireadores depende de los caudales descargados en la rápida y de la longitud de la rápida.
- El ingreso de aire a una estructura hidráulica como la rápida es favorecedor para la prevención de efectos cavitantes y para el amortiguamiento de transitorios hidráulicos pero a su vez debe considerarse el efecto de aireación como desfavorable para bombas hidráulicas, obras de toma, sistemas de conductos cerrados, entre otros, causando en ciertas condiciones el golpe de ariete.
- Cada método tiene rangos para la selección de valores, se debe considerar estas limitaciones según el caso de estudio.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Arreguín, F. (2005). *Cavitación y aireación en obras de excedencia*. (Serie Avances en Hidráulica. Volumen No.13). México: Autor
- Arreguín, F. & Alcocer, V. (2011). Diseño hidráulico del conducto de descarga. En F. Arreguín & V. Alcocer (Eds.), *Diseño hidráulico de vertedores (pp.74-114)*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México: Autores
- Camargo, J., Baldi, R. & Aquino, C. (2014, octubre). *Diseño de aireadores en estructuras vertedoras, aplicación al PH Reventazón Costa Rica*, Trabajo presentado en el XXIII Congreso Nacional de Hidráulica. Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- Carrera, J., Lara, V. (2010). *Estudio en modelo hidráulico del túnel de desvío y el túnel de descarga intermedia de la Central Hidroeléctrica Sopladora*. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Castro, M. *Introducción a la hidráulica del flujo con superficie libre*, Hidráulica II, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Escuela Politécnica Nacional.
- Chanson, H., *Model studies of the aeration device of the Clyde Dam Spillway*, Ancold Bulletin No. 94.
- Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*, McGraw-Hill. Santa fe de Bogotá, Colombia.
- Del Toro, N. (2013). *Bases y criterios de diseño de canales con flujo escalonado y sujetos a aireación natural*, Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Echávez, G., Ruiz, G. (2006, septiembre). *Air ramps location in high head spillways*. Conferencia presentada en el 7th International Conference on HydroScience, and Engineering en Drexel University, Philadelphia, USA. Disponible en: <http://idea.library.drexel.edu/>

- Echávez, G. (1969). *Erosión en concreto causada por flujo de alta velocidad*. Memoria para optar al Título de Doctor en Ingeniería (Hidráulica), Facultad de Ingeniería, División de Estudios Superiores UNAM, México.
- Falvey H. (1980). *Air-water flow in hydraulic structures*. (Engineering Monograph No. 41, EM41). Denver, Colorado, United States: Bureau of Reclamation, United States Department of the Interior Water and Power Resources Service.
- Falvey, H. (1990). *Cavitation in chutes and spillways*. (Engineering Monograph No. 42, EM42). Denver, Colorado, United States: Bureau of Reclamation, United States Department of the Interior Water and Power Resources Service.
- Hager, W. & Pfister, M. (2009). *Historical advance of chute aerators*. Ponencia presentada en el 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment. International Association of Hydraulic Engineering & Research (IAHR).
- Haro, P., Jara, M. (2010). *Análisis de flujo inestable y autoaireado en canales de fuerte pendiente*. Tesis previa a la obtención del grado de Máster en Recursos Hídricos. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Koschitzky, P., Kobus H., (1988). *Hydraulics and design of spillway aerators for cavitation prevention in high speed flows*. Ponencia presentada en The International Symposium on Hydraulics for High Dams, Beijing, China.
- Marchegiani, A. (2006). *Cavitación*, (V. 1.2), (en línea). Disponible en: <http://es.slideshare.net/jose8100123/cavitacion-v-12>
- Palomino, J. (2003). *Diseño hidráulico de una rápida para el proyecto: construcción del canal principal de Fortaleza, distrito Congas, provincia Ochos, Región Ancash*. Monografía Técnica. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Perú.
- Pettersson, K. (2012). *Design of aerators for prevention of cavitation–The Höljes Dam*, Tesis de Magister, Royal Institute of Technology (KTH), Department of Land and Water Resources Engineering., Hydraulic Engineering. Stockholm, Sweden.

- Rosales, J. (2013). *Flujo aire-agua en vertedores*. Tesis previa a la obtención del grado de Ingeniero Civil. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Saldarriaga, J., Navarrete, M. & Galeano L. (1996). Aireación de flujos de alta Velocidad, Una metodología alterna para el diseño de aireadores, *Revista de Ingeniería Uniandes*, 1-11.
- Toapaxi, J. (2014). *Bases y criterios para el dimensionamiento hidráulico de formas especiales de saltos en esquí en presas*. Tesis previa a la obtención del grado de Máster en Recursos Hídricos. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Vischer, D. (Ed). (1984). *Air Entrainment Devices (Air Slots)*. Zurich: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössischen Technischen Hochschule Zurich: Editor.

ANEXOS

ANEXO 1
REPORTES