UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL:
HIDRÁULICA, ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

E.T.S.I. de CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

INFLUENCIA DE LA AIREACIÓN DEL FLUJO EN RÁPIDAS Y EN EL
RENDIMIENTO DE AMORTIGUACIÓN DE ENERGÍA EN CUENCOS DE
RESALTO

TESIS DOCTORAL

Juan José Rebollo Cillán

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Directores

Luis Garrote de Marcos

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

David López Gómez

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

2019

Tribunal nombrado por el Magfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día de de 2019.

Presidente D.

Vocal D.

Vocal D.

Vocal D.

Secretario D.

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día de de 2019,
en

Calificación:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

A mis padres, Joaquina y Juan José

A mi hermano Javier y a Francesca

A Jacinto Cillán Ávila, que quiso mucho y al que quisieron mucho, in memoriam

AGRADECIMIENTOS

A mis directores, Luis Garrote, por su generosidad al aceptar dirigir esta tesis y por la enorme lucidez que me ha prestado en sus consejos, y David López, por su inestimable ayuda, por su amistad y por trasmitirme cada día su ilusión por este trabajo, siempre con la palabra precisa y la sonrisa perfecta.

No puedo olvidar mi agradecimiento a los compañeros y amigos que han estado desde el inicio en este proyecto, Rubén Díaz, José Antonio Serrano, Tamara Ramos, José Luis García, Ricardo Herrero y Miguel de Blas, que merecen el reconocimiento por esta tesis tanto como yo. Quiero agradecer a Gregorio Yepes, responsable de la biblioteca del Centro de Estudios Hidrográficos, por su constante ayuda e interés en la búsqueda bibliográfica, y a Carlos Vélez, miembro del equipo de informática, por su asistencia y ánimos durante todo este periodo.

A Luis Balairón y a Ángel Lara, director y consejero técnico del Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, que impulsaron y se involucraron en este proyecto desde su nacimiento. A Lucía Turrero, responsable de la nave de ensayos, a Javier de Haro, a Fernando Pastor y a todo el equipo de construcción del Laboratorio de Hidráulica (Eufemio Díaz, Julián Sánchez, Francisco Olmos, Manuel Domínguez Gala, Javier Ortiz, Juan Notario y Francisco Pardo), que con su destreza y precisión hacen que cualquier problema sea sencillo de resolver. También quiero mostrar mi gratitud a Ramón Gutierrez Serret, por toda la ayuda y valiosa información que me ha transmitido en el transcurso de este trabajo.

Al Ministerio de Economía y Competitividad y al Plan Nacional de I+D+i por su financiación al proyecto EMULSIONA y a nuestros socios de la Universidad Politécnica de Cartagena y de la Universidad Politécnica de Valencia. Quiero tener una especial mención a los miembros del grupo Hidr@m de la UPCT, José María Carrillo, Luis Castillo, Paqui Marco y Juan Tomas García, cuya ayuda y consejos han conseguido desatascar más de una vez esta investigación.

Al CEDEX, en especial al Centro de Estudios Hidrográficos y al Laboratorio de Hidráulica, por el apoyo que me ha brindado durante estos años, y a todos sus miembros, una familia de la que me siento orgulloso de pertenecer y a quienes también está dedicada esta tesis.

A Juan Miguel Rebollo y a Rafael Pérez, que sin saber nada de esto, con un café y una simple conversación podían solucionar todo. A mi familia, a quienes tanto quiero y tanto debo, por animarme a empezar esta tesis y ser partícipes de la ilusión que me hacía, por enseñarme el camino correcto y por ser el mejor motivo para seguir aprendiendo cada día.

RESUMEN

Esta tesis es el resultado de un trabajo de investigación desarrollado durante 5 años en el marco del proyecto de investigación LS-EMULSIONA, cuyo objetivo ha sido caracterizar el efecto de la aireación del flujo con régimen turbulento y supercrítico en rápidas y analizar su influencia sobre el resalto hidráulico. Para llevar a cabo este estudio experimental, se ha construido en el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX un modelo físico de grandes dimensiones, formado por una rápida de 7 m de altura y un canal de resalto de casi 10 m de longitud. Estas dimensiones del modelo garantizarán la representatividad de los resultados y permitirá extrapolar las conclusiones a prototipos a escala real.

La principal motivación de este trabajo es ahondar en el estudio de la influencia que podría tener la aireación sobre el rendimiento de amortiguación de energía en cuencos de resalto, lo que permitiría aumentar los rangos de funcionamiento de las estructuras de disipación. Para analizar este efecto se ha diseñado una campaña experimental con diferentes caudales de agua y aire, lo que han permitido establecer múltiples escenarios de funcionamiento para estudiar la evolución del comportamiento hidrodinámico del resalto. Otro objetivo de esta investigación ha sido analizar la influencia de la concentración de aire en los mecanismos de disipación de energía en la rápida, que surge como paso previo y necesario para caracterizar el comportamiento del flujo de entrada al cuenco de amortiguamiento. Por último, también se ha incluido en el alcance de este trabajo realizar una comparativa de los diferentes dispositivos que se utilizan de manera experimental para determinar la concentración de aire en un flujo emulsionado, que sigue suponiendo un reto en la actualidad.

A partir de los resultados obtenidos en la campaña de ensayos, se han extraído una serie de conclusiones sobre los efectos que produce la aireación sobre el flujo de la rápida y el resalto hidráulico del modelo físico. La semejanza de Froude garantiza la representatividad de estos resultados para prototipos con una escala geométrica diez veces superior, lo que permite extender estas conclusiones a un gran número de aliviaderos y cuencos de amortiguamiento actuales. En primer lugar, de los métodos para determinar la concentración de aire en la mezcla emulsionada, la sonda de conductividad proporciona resultados precisos y cuenta con la ventaja de ser un equipo muy robusto, por lo que ha sido seleccionada para obtener el perfil de concentraciones en todos los ensayos. En cuanto a los resultados experimentales en la rápida, se ha comprobado que, a igualdad de condiciones de otras variables hidráulicas, una mayor aireación se traduce en una aceleración del flujo, lo que supone una reducción

de la fricción con los contornos. A partir de esta relación, se ha propuesto una formulación para caracterizar este fenómeno y que permite cuantificar el efecto de la aireación sobre el coeficiente de rugosidad de Manning.

El análisis del resalto hidráulico muestra que, para números de Froude del flujo de entrada comprendidos entre 6 y 8 y concentraciones de aire entre 22 y 33 %, no se aprecia ninguna dependencia entre el calado conjugado y la longitud del resalto con la concentración. En este sentido, tampoco se aprecian mejoras en el rendimiento de la amortiguación de energía con mayor aireación del flujo de entrada en el cuenco. Los resultados sí muestran un desequilibrio del esquema dinámico, por lo que se ha propuesto una nueva formulación que incluye una fuerza de reacción en el resalto.

Finalmente, se han propuesto una serie de líneas de investigación futuras para ampliar el conocimiento sobre esta temática y que se orientan en dos direcciones. En primer lugar, es necesario aumentar el número de ensayos con mayores concentraciones y ampliar el rango de números de Froude en el resalto hidráulico. También se pretende incorporar los resultados obtenidos a un modelo lagrangiano tridimensional, para desarrollar y calibrar el módulo hidrodinámico para flujos aireados.

ABSTRACT

This thesis is the results of a five years research included in the framework of the LS-EMULSIONA project. The purpose of this study is to characterize the influence of aeration in supercritical and fully turbulent flows and analyze the influence over the hydraulic jump. Our analysis is based on a physical model with high dimensions to reproduce these phenomena and consists of a spillway chute 7 m high, followed by a 10 m length still basin. This structure has been built in the Hydraulic Laboratory of the Hydrographical Studies Centre (CEDEX). The size of the physical model guarantees the results representation and ensures the main conclusions in real prototypes.

The main objective of this project is to extend the knowledge of the influence of aeration in the energy damping in still basins. This analysis would increase the efficiency of dissipation structures. This phenomenon has been studied in different scenarios with water and air flow rates to check the hydrodynamic evolution of the jump. The second objective is focused on the effects of aeration over the supercritical flow in the channel and how the velocity field is modified according to different air concentrations. This analysis is needed to characterize the flow entrance to the still basin. Finally, the third part is aimed at comparing the different experimental tools to determine the air concentration in the physical model.

Results obtained in tests show different conclusions about the aeration effects on the flow in the physical model. In this scale, Froude similarity guarantees the results representation in spillways and still basin ten sizes bigger, covering a high number of current structures. First, considering four methods to determine the air concentration in emulsified flows, the conductivity probe offers accurate results and is very strong in tests with high flow rates. These are the main reasons to be selected for the testing program. About the experimental results in the chute, with same conditions in other variables, higher aeration generates a flow velocity increase and the boundary friction reduction. With this relation, a new formulation has been proposed to quantify this effect over the Manning's roughness coefficient.

The hydraulic jump analysis is focused to Froude numbers between 6 and 8 and concentrations between 22 and 33 %. In this range, results do not show any relation between the subcritical depth and the length with the air concentration. There is no discernible improvement in the energy damping in the still basin with higher aeration of the flow entrance. Instead, all tests results show unbalance in the dynamical scheme. To solve

this difference, a new formulation has been proposed with a reaction strength in the hydraulic jump.

Finally, a few research lines has been proposed to extend the knowledge of the study and follow two ways. First, it is necessary to increase the experimental program with bigger air concentration tests and higher Froude numbers in the still basin. Moreover, the Hydraulic Laboratory of CEDEX is working in the calibration of a lagragian model 3D with the results obtained in this research to reproduce aerated flows.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1. Motivación.....	3
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Planteamiento y estructura de la investigación.....	5
2. ESTADO DEL ARTE.....	7
2.1. Aireación en flujos y caracterización de la entrada de aire en estructuras hidráulicas.....	8
2.1.1. Aireación natural en la superficie de flujos en régimen supercrítico.....	10
2.1.2. Aireación local en impacto de chorros.....	11
2.1.3. Aireación local en resaltos hidráulicos.....	13
2.1.4. Aireación local en cambios de sección.....	13
2.1.5. Aireación local en transiciones de flujos en lámina libre a conductos cerrados.....	14
2.2. Parámetros y variables características de la aireación.....	15
2.3. Aireación en rápidas y canales de descarga.....	19
2.3.1. Aireación natural en rápidas y canales de descarga.....	19
2.3.1.1. Mecanismos de aireación natural.....	20
2.3.1.2. Estructura del flujo por aireación natural.....	23
2.3.2. Aireación artificial en rápidas y canales de descarga.....	25
2.3.2.1. Tipología de aireadores.....	27
2.3.2.2. Mecanismos de aireación artificial.....	28
2.3.2.3. Estructura del flujo por aireación artificial.....	29
2.4. Aireación en cuencos de resalto.....	32
2.4.1. Aireación natural en cuencos de resalto.....	33
2.4.1.1. Mecanismos de aireación natural.....	35
2.4.1.2. Estructura del resalto por aireación natural.....	35
2.5. Medidas de aireación en modelo físico y prototipo.....	36
2.5.1. Medidas de concentración de aire en flujos con aireación artificial.....	36
2.5.2. Medidas de concentración de aire en flujos con aireación natural.....	38
2.6. Efectos de la aireación sobre mecanismos de disipación de energía en rápidas y cuencos de resalto.....	44
3. MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	47
3.1. Definición y diseño de la instalación experimental.....	48

3.2. Equipos de alimentación y sistemas de control	56
3.3. Equipos de instrumentación para la toma de velocidades	64
3.3.1. Medidas de velocidad en la rápida	64
3.3.2. Medidas de velocidad en el cuenco de resalto	67
3.4. Equipos de instrumentación para la toma de presiones	70
3.4.1. Medidas de presión en el cuenco de resalto	70
3.5. Equipos de instrumentación para la toma de concentraciones de aire	77
3.5.1. Medidas de concentración en la rápida	78
3.5.1.1. Equipo de decantación de mezcla	78
3.5.1.2. Sonda de fibra óptica	94
3.5.1.3. Análisis mediante fotointerpretación con láser	96
3.5.1.4. Sonda de conductividad	103
3.6. Diseño de la campaña experimental	105
4. RESULTADOS.....	109
4.1. Caracterización del flujo en la sección de entrada a la rápida	109
4.2. Resultados de velocidad al pie de la rápida	110
4.3. Resultados de concentración al pie de la rápida	114
4.4. Resultados de calado en el cuenco	119
4.5. Resultados de velocidad en el cuenco	122
4.6. Resultados de longitud del resalto en el cuenco	125
5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	129
5.1. Comparativa de sistemas de medida de concentraciones	129
5.2. Análisis del comportamiento del flujo en la rápida	131
5.3. Análisis del comportamiento del flujo en el cuenco de resalto	146
5.3.1. Influencia de la concentración sobre el calado conjugado	147
5.3.2. Influencia de la concentración sobre la longitud del resalto	149
5.3.3. Influencia de la concentración sobre la energía residual	151
5.3.4. Análisis de la desviación de los resultados experimentales con respecto a la formulación teórica de Bélanger	153
5.4. Análisis de semejanza	156
6. CONCLUSIONES Y APORTACIONES ORIGINALES	157
7. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	161
8. REFERENCIAS	163

ANEXO 1: Artículo de referencia publicado en la revista Water	171
ANEXO 2: Artículo publicado en las IV Jornadas de Ingeniería del Agua.....	187
ANEXO 3: Artículo publicado en las V Jornadas de Ingeniería del Agua.....	199
ANEXO 4: Artículo publicado en el III International Electronic Conference on Water Sciences	211

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de aireación artificial en el aliviadero de San Roque en Filipinas	9
Figura 2. Ejemplos de configuraciones de aireación local por el impacto de chorros	12
Figura 3. Configuración de aireación local en un resalto hidráulico	13
Figura 4. Configuración de aireación local por un sistema artificial en la base de un cana	14
Figura 5. Caracterización de calados en flujos emulsionados.....	18
Figura 6. Esquema de mecanismo de aireación en flujos de canales abiertos	21
Figura 7. Distribución de zonas de la estructura transversal del flujo emulsionado.....	23
Figura 8. Distribución de zonas de la estructura longitudinal del flujo emulsionado	25
Figura 9. Tipología básica de aireadores.....	28
Figura 10. Combinación de varios tipos de aireadores	28
Figura 11. Fases del mecanismo de aireación artificial con aireadores	29
Figura 12. Estructura longitudinal del flujo en un aireador y distribución de concentraciones y presiones en el fondo	30
Figura 13. Detalle de la estructura de la zona de aireación	31
Figura 14. Detalle de la estructura de la zona de impacto.....	32
Figura 15. Fenómeno de autoaireación en un resalto hidráulico	35
Figura 16. Distribución de curvas para aireadores en prototipo desarrollada por Pinto	37
Figura 17. Esquema del experimento para determinar la concentración de Ehrenberger.....	38
Figura 18. Esquema del dispositivo “Mechanical Sampler” para determinar la concentración.....	39
Figura 19. Esquema de la sonda de conductividad y circuito de toma de datos de Lamb.....	40
Figura 20. Esquema de la sonda de conductividad de Jacobs	41
Figura 21. Esquema de un sistema de medida con sensor óptico	42
Figura 22. Ejemplo de sensor óptico.....	42
Figura 23. Tratamiento en escala de grises de un flujo emulsionado	43
Figura 24. Perfil longitudinal del dispositivo experimental	48
Figura 25. Planta del dispositivo experimental	49
Figura 26. Sección transversal del cuenco de resalto y del canal de retorno	49
Figura 27. Vista isométrica del cajón de entrada a la rápida y boquilla abatible	53
Figura 28. Perfil longitudinal del cajón de entrada a la rápida y boquilla abatible	53
Figura 29. Planta del esquema de alimentación de agua del dispositivo experimental.....	57
Figura 30. Sección del esquema de alimentación de agua del dispositivo experimental	58

Figura 31. Esquema de un medido electromagnético de caudal	59
Figura 32. Planta del esquema de alimentación de caudal de aire del dispositivo experimental	61
Figura 33. Sección del esquema de alimentación de caudal de aire del dispositivo experimental ...	62
Figura 34. Sección longitudinal del mezclador del dispositivo experimental	63
Figura 35. Esquema de funcionamiento de la sonda Nortek ADV	67
Figura 36. Esquema del sensor de la sonda Nortek ADV	68
Figura 37. Funcionamiento del efecto Doppler en la sonda Nortek ADV.....	69
Figura 38. Esquema de funcionamiento de captor piezorresistente	71
Figura 39. Distribución de captores de presión en el canal de resalto	72
Figura 40. Recta de calibración del sensor P1.....	73
Figura 41. Recta de calibración del sensor P2.....	73
Figura 42. Recta de calibración del sensor P3.....	73
Figura 43. Recta de calibración del sensor P4.....	74
Figura 44. Recta de calibración del sensor P5.....	74
Figura 45. Recta de calibración del sensor P6.....	74
Figura 46. Recta de calibración del sensor P7.....	75
Figura 47. Recta de calibración del sensor P8.....	75
Figura 48. Recta de calibración del sensor P9.....	75
Figura 49. Recta de calibración del sensor P10.....	76
Figura 50. Recta de calibración del sensor ubicado bajo el mezclador.....	76
Figura 51. Recta de calibración del sensor del tubo Pitot.....	76
Figura 52. Recta de calibración del sensor inferior del decantador	84
Figura 53. Recta de calibración del sensor superior del decantador	85
Figura 54. Estructura del flujostato (SMC).....	87
Figura 55. Esquema de funcionamiento del flujostato (SMC).....	88
Figura 56. Evolución del caudal de agua de salida del decantador.....	90
Figura 57. Evolución del caudal de aire de salida del decantador	90
Figura 58. Evolución y valor medio de la concentración en el punto de toma	91
Figura 59. Perfiles de concentración con decantador para $Q_{WE} = 155$ l/s y Q_{AE} variable	92
Figura 60. Perfiles de concentración con decantador para $Q_{WE} = 200$ l/s y Q_{AE} variable	93
Figura 61. Perfiles de concentración con decantador para $Q_{WE} = 250$ l/s y Q_{AE} variable	93
Figura 62. Perfiles de concentración con decantador para $Q_{WE} = 300$ l/s y Q_{AE} variable	94
Figura 63. Representación 3D de los pixeles en función de la escala de grises	98

Figura 64. Selección de una fila de píxeles para la definición de su rango de grises	99
Figura 65. Evolución de los tonos de grises de los píxeles de la fila seleccionada	99
Figura 66. Imagen con los resultados en escala de grises.....	100
Figura 67. Imagen con los resultados aplicando el criterio de selección	100
Figura 68. Representación 3D de la superposición de los dos tratamientos	100
Figura 69. Perfiles de concentración con fotointerpretación para $Q_{WE} = 155$ l/s y Q_{AE} variable	101
Figura 70. Perfiles de concentración con fotointerpretación para $Q_{WE} = 200$ l/s y Q_{AE} variable	102
Figura 71. Perfiles de concentración con fotointerpretación para $Q_{WE} = 250$ l/s y Q_{AE} variable	102
Figura 72. Perfiles de concentración con fotointerpretación para $Q_{WE} = 300$ l/s y Q_{AE} variable	103
Figura 73. Perfiles de velocidad para el escenario 1 en el pie de la rápida.....	111
Figura 74. Perfiles de velocidad para el escenario 2 en el pie de la rápida.....	112
Figura 75. Perfiles de velocidad para el escenario 3 en el pie de la rápida.....	113
Figura 76. Perfiles de velocidad para el escenario 4 en el pie de la rápida.....	114
Figura 77. Perfiles de concentración para el escenario 1 en el pie de la rápida	115
Figura 78. Perfiles de concentración para el escenario 2 en el pie de la rápida	116
Figura 79. Perfiles de concentración para el escenario 3 en el pie de la rápida	117
Figura 80. Perfiles de concentración para el escenario 4 en el pie de la rápida	118
Figura 81. Evolución de calados en el cuenco para el escenario 1	119
Figura 82. Evolución de calados en el cuenco para el escenario 2	120
Figura 83. Evolución de calados en el cuenco para el escenario 3	121
Figura 84. Evolución de calados en el cuenco para el escenario 4	122
Figura 85. Perfil de velocidad en la salida del resalto para el escenario 1	123
Figura 86. Perfil de velocidad en la salida del resalto para el escenario 2	124
Figura 87. Perfil de velocidad en la salida del resalto para el escenario 3	125
Figura 88. Comparativa de decantador y sonda de conductividad para el escenario 1.....	129
Figura 89. Comparativa de decantador y sonda de conductividad para el escenario 2.....	130
Figura 90. Comparativa de decantador y sonda de conductividad para el escenario 3.....	130
Figura 91. Comparativa de decantador y sonda de conductividad para el escenario 4.....	130
Figura 92. Secciones de medida en la rápida.....	131
Figura 93. Perfiles de velocidad y concentración en la salida de la rápida para el escenario 1	132
Figura 94. Perfiles de velocidad y concentración en la salida de la rápida para el escenario 2	132
Figura 95. Perfiles de velocidad y concentración en la salida de la rápida para el escenario 3	133
Figura 96. Perfiles de velocidad y concentración en la salida de la rápida para el escenario 4	133

Figura 97. Perfiles de velocidad y concentración en la salida de la rápida para todos los ensayos	134
Figura 98. Evolución del coeficiente de Manning con la concentración en todos los escenarios...	144
Figura 99. Evolución de la pendiente de fricción con la concentración en todos los escenarios....	145
Figura 100. Esquema de equilibrio de fuerzas en el resalto hidráulico.....	146
Figura 101. Relación entre variables adimensionales del calado conjugado y la concentración	149
Figura 102. Relación entre variables adimensionales de longitud del resalto y la concentración ..	151
Figura 103. Relación entre variables adimensionales de la energía y la concentración	152
Figura 104. Relación experimental y teórica de calados adimensionales y Fr_1	153
Figura 105. Equilibrio de fuerzas en el resalto hidráulico con la fuerza de reacción (F_{RR})	154
Figura 106. Reducción del peso de F_{RR} sobre las fuerzas equilibrantes en función de Fr_1	155
Figura 107. Ampliación de la relación experimental y teórica de calados adimensionales y Fr_1 el resalto hidráulico	161
Figura 108. Análisis del funcionamiento del resalto hidráulico en el modelo físico y numérico.....	162

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Aliviadero de la presa de Cachamuiña.....	10
Fotografía 2. Aliviaderos de la presa del Villar y derivación de Bembézar.....	10
Fotografía 3. Trampolín de lanzamiento de la presa de la Almendra	11
Fotografía 4. Desagüe de fondo (Válvula Howell-Bunger) de la presa de Iznajar	11
Fotografía 5. Entrada de aire por el impacto de un chorro	12
Fotografía 6. Entrada de aire por vórtices perpendiculares al flujo en un resalto hidráulico	13
Fotografía 7. Vórtice en la entrada de flujo en una campana de succión.....	15
Fotografía 8. Distribución longitudinal de burbujas en un canal de descarga	22
Fotografía 9. Daños por cavitación de la presa de Karun y en el túnel de Glenn Canyon.....	26
Fotografía 10. Vista lateral y superior de la rápida y el cuenco de resalto	50
Fotografía 11. Vista lateral de la rápida y el cuenco de resalto	50
Fotografía 12. Vista superior del cuenco de resalto y del canal de retorno	50
Fotografía 13. Vista lateral y funcionamiento de la entrada en la rápida	51
Fotografía 14. Efecto del flujo en la entrada del cuenco sin pieza de transición.....	51
Fotografía 15. Instalación de la pieza de transición y comportamiento del flujo	51
Fotografía 16. Cajón de entrada a la rápida.....	52
Fotografía 17. Boquilla abatible para fijar niveles en la entrada de la rápida.....	52
Fotografía 18. Compuerta de salida del cuenco de resalto	54
Fotografía 19. Vista superior de la rápida con malla metálica y cubierta de plástico	55
Fotografía 20. Vista lateral de la rápida con malla metálica y cubierta de plástico	55
Fotografía 21. Detalle del efecto de la malla sobre el flujo emulsionado.....	55
Fotografía 22. Depósito elevado a nivel constante.....	56
Fotografía 23. Bomba de impulsión de agua	57
Fotografía 24. Sistema de impulsión del caudal de agua y circuito de alimentación.....	58
Fotografía 25. Compresor de aire y depósito acumulador	60
Fotografía 26. Regulador de presión con válvula de tornillo y manómetro digital	60
Fotografía 27. Caudalímetro de aire de entrada al mezclador	61
Fotografía 28. Vista general del mezclador en el modelo físico	63
Fotografía 29. Detalle de la entrada de los caudales de agua y aire al mezclador.....	63
Fotografía 30. Sensor para el registro de presiones en el mezclador	64
Fotografía 31. Diferentes vistas del tubo Pitot conectado al sensor de presiones	65

Fotografía 32. Funcionamiento del dispositivo de medida durante los ensayos	65
Fotografía 33. Sensor de presión utilizado y equipo de registro.....	66
Fotografía 34. Funcionamiento de la sonda ADV y equipo de registro durante los ensayos	69
Fotografía 35. Funcionamiento de la sonda ADV en el canal del resalto	70
Fotografía 36. Captor de presión instalado en la base del canal de resalto.....	72
Fotografía 37. Dispositivo de decantación para la toma de concentración	79
Fotografía 38. Captor de muestra con boquilla para caudales pequeños.....	80
Fotografía 39. Captor de muestra boquilla para caudales altos	80
Fotografía 40. Situación de equilibrio del decantador durante un ensayo	81
Fotografía 41. Vista global del equipo de decantación en pruebas	82
Fotografía 42. Captor de muestra en funcionamiento	82
Fotografía 43. Detalle de la boquilla del captor en funcionamiento.....	83
Fotografía 44. Entrada de la muestra al decantador y piezómetro lateral	83
Fotografía 45. Posición de los captosres de presión en el decantador	84
Fotografía 46. Anemómetro de burbuja	85
Fotografía 47. Anemómetro de hilo caliente	86
Fotografía 48. Flujostato de aire.....	87
Fotografía 49. Toma de caudal de aire con el flujostato durante los ensayos	88
Fotografía 50. Salida del decantador del tubo conector al flujostato	88
Fotografía 51. Caudalímetro electromagnético para la toma de caudales del decantador	89
Fotografía 52. Imagen de la interfaz del programa de visualización y registro.....	90
Fotografía 53. Equipo de fibra óptica y osciloscopio para el control de la señal	94
Fotografía 54. Equipo de fibra óptica durante los ensayos en la rápida	95
Fotografía 55. Cámara de alta resolución	97
Fotografía 56. Ubicación del láser bajo base de la rápida.....	97
Fotografía 57. Diferencias entre imagen en bruto y tratada	98
Fotografía 58. Sonda de conductividad utilizada para la experimentación	104
Fotografía 59. Sonda de conductividad en el bastidor durante los ensayos.....	105
Fotografía 60. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 1.1	125
Fotografía 61. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 1.2	125
Fotografía 62. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 1.3	126
Fotografía 63. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 2.1	126
Fotografía 64. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 2.2	126

Fotografía 65. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 2.3	126
Fotografía 66. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 3.1	126
Fotografía 67. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 3.2	126
Fotografía 68. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 3.3	126
Fotografía 69. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 4.1	127
Fotografía 70. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 4.2	127
Fotografía 71. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 4.3	127

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de las relaciones de calibración de los captosres utilizados en el modelo.....	77
Tabla 2. Resultados de concentración obtenidas con el decantador en el perfil del flujo.....	92
Tabla 3. Resultados característicos del flujo de entrada en la rápida para todos los ensayos.....	110
Tabla 4. Resultados de velocidad para el escenario 1 en el pie de la rápida	111
Tabla 5. Resultados de velocidad para el escenario 2 en el pie de la rápida	112
Tabla 6. Resultados de velocidad para el escenario 3 en el pie de la rápida	113
Tabla 7. Resultados de velocidad para el escenario 4 en el pie de la rápida	114
Tabla 8. Resultados de concentraciones para el escenario 1 en el pie de la rápida	115
Tabla 9. Resultados de concentraciones para el escenario 2 en el pie de la rápida	116
Tabla 10. Resultados de concentraciones para el escenario 3 en el pie de la rápida	117
Tabla 11. Resultados de concentraciones para el escenario 4 en el pie de la rápida	118
Tabla 12. Resultados de calado en el cuenco para el escenario 1	119
Tabla 13. Resultados de calado en el cuenco para el escenario 2	120
Tabla 14. Resultados de calado en el cuenco para el escenario 3	121
Tabla 15. Resultados de calado en el cuenco para el escenario 4	121
Tabla 16. Resultados de velocidad en la salida del resalto para el escenario 1	122
Tabla 17. Resultados de velocidad en la salida del resalto para el escenario 2	123
Tabla 18. Resultados de velocidad en la salida del resalto para el escenario 3	124
Tabla 19. Resumen de los resultados de longitud del resalto hidráulico para todos los ensayos...	127
Tabla 20. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 1.1	135
Tabla 21. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 1.2	136
Tabla 22. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 1.3	136
Tabla 23. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 2.1	137
Tabla 24. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 2.2	138
Tabla 25. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 2.3	138
Tabla 26. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 3.1	139
Tabla 27. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 3.2	139
Tabla 28. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 3.3	140
Tabla 29. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 4.1	141
Tabla 30. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 4.2	141
Tabla 31. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 4.3	142

Tabla 32. Resultados característicos del flujo de salida en la rápida para todos los ensayos	142
Tabla 33. Resultados característicos en la sección media de la rápida para todos los ensayos.....	145
Tabla 34. Variables características asociadas al calado conjugado para todos los ensayos.....	147
Tabla 35. Variables adimensionales asociadas al calado conjugado para todos los ensayos.....	148
Tabla 36. Variables características asociadas a la longitud del resalto para todos los ensayos	150
Tabla 37. Variables adimensionales asociadas a la longitud del resalto para todos los ensayos	150
Tabla 38. Variables características asociadas a la energía tras el resalto para todos los ensayos ..	151
Tabla 39. Variables adimensionales asociadas a la energía tras el resalto para todos los ensayos	152
Tabla 40. Variables adimensionales asociadas a los calados conjugados teórico y experimental ..	153
Tabla 41. Esquema dinámico del resalto para cada ensayo considerando F_{RR}	155
Tabla 42. Resultados adimensionales del flujo al pie de la rápida para todos los ensayos.....	156

SIMBOLOGÍA

Q_a	Caudal de aire	Q_t	Caudal total
V_a	Volumen de aire	Q_w	Caudal de agua
V_t	Volumen total de la mezcla	C	Concentración puntual
Ω	Concentración de agua	β	Coeficiente de aireación
ρ_w	Densidad del agua	ρ_a	Densidad del aire
ρ_m	Densidad de la mezcla	C_m	Concentración media
h_e	Calado emulsionado	h_w o h_{Neto}	Calado equivalente de agua
h_c	Calado característico	h_{90}	Calado para C del 90 %
v_c	Velocidad característica	v_m	Velocidad media de la mezcla
Q_a^{INF}	Caudal de aire en aireador	Q_a^{SUP}	Caudal de aire de salida superior
$Q_a^{IMPACTO}$	Caudal de salida en impacto	Q_a^{RECIR}	Caudal de recirculación de aire
y_1 o h_1	Calado de entrada al resalto	y_2 o h_2	Calado en la salida del resalto
Fr_1	Nº Froude de entrada al resalto	β_a	Factor corrector (Chanson, 2009)
I_f	Pendiente de fricción	H_1	Energía de entrada al resalto
H_2	Energía en la salida del resalto	ΔH	Energía residual del resalto
L_r	Longitud de remolinos	L_R	Longitud total del resalto
β'	Factor corrector (Pinto, 1990)	N_b	Número de pixeles de aire
N_w	Número de pixeles de agua	n	Rugosidad de Manning
R_h	Radio hidráulico	τ_f	Tensión en el fondo
γ_w	Peso específico del agua	U_E	Tensión de inducción en el fluido
B	Inducción magnética	h_{atmr}	Presión atmosférica relativa
Q_{WE}	Caudal de agua de entrada	Q_{AE}	Caudal de aire de entrada
Q_{WS}	Caudal de agua de salida	Q_{AS}	Caudal de aire de salida
R	Intensidad de luz reflejada	$K_{Fresnel}$	Constante de Fresnel
η_{Fluido}	Índice de refracción del líquido	η_{Sonda}	Índice de refracción de la sonda
Q_{TE}	Caudal total de entrada	v_{ME}	Velocidad media en la entrada
C_{ME}	Concentración media de entrada	v_{XP}	Velocidad promedio (sonda ADV)

Simbología

V_{MR}	Velocidad media total (sonda ADV)	V_{MM}	Velocidad media en la rápida
C_{MM}	Concentración Media en la rápida	V_{MS}	Velocidad media en la salida
C_{MS}	Concentración Media en la salida	F_{RR}	Fuerza de Reacción del Resalto

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Esta tesis tiene como origen y antecedente principal los trabajos experimentales que se han desarrollado en el subproyecto de investigación coordinado “ESTUDIO DE LA AIREACIÓN NATURAL Y FORZADA EN MODELO FÍSICO DE GRANDES DIMENSIONES Y ANÁLISIS DE SU INFLUENCIA EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS CUENCOS DE RESALTO HIDRÁULICO (LS-EMULSION)”. Todas las actividades vinculadas a este estudio se han llevado a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, donde se ha diseñado y construido un modelo de grandes dimensiones formado por una rápida de 7 m de altura y un canal de resalto de casi 10 m de longitud.

El contexto principal donde se enmarca esta investigación ha sido el proyecto del Plan Nacional de I+D+i (2008–2011) “USO DE LA AIREACIÓN NATURAL Y FORZADA DEL FLUJO EN ALIVIADEROS DE PRESAS Y EXTENSIÓN DEL CAMPO DE UTILIZACIÓN DE LAS OBRAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE RESALTO HIDRÁULICO (EMULSIONA)”, con referencia BIA2011-28756-C03-03 y al amparo de la resolución del 11 de enero de 2012 publicada por la Dirección General de Investigación y Gestión del Plan Nacional de I+D+i.

El proyecto EMULSIONA ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y ha contado con la participación del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT). Estas dos últimas instituciones han trabajado de forma paralela al CEDEX en otros dos subproyectos asociados a la línea de investigación principal:

- “EL USO DE LA AIREACIÓN FORZADA DEL FLUJO EN RÁPIDAS COMO EXTENSIÓN DEL CAMPO DE UTILIZACIÓN DE LAS OBRAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA A PIE DE PRESA MEDIANTE RESALTO HIDRÁULICO (EMULRAPID)”, en el Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la UPV.
- “AIREACIÓN NATURAL DE FLUJOS EN EL VERTIDO LIBRE POR CORONACIÓN DE PRESAS Y SU DIFUSIÓN EN CUENCOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA HIDRÁULICA (JET-EMULSION)”, en el Grupo de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Medioambiental (Hidr@m) de la UPCT.

Una parte de los resultados y conclusiones finales de este trabajo han sido publicados en marzo de 2019 en la revista *Open Access Water* (ISSN 2073-4441 y Q2), con el artículo titulado “*Experimental Analysis of the Influence of Aeration in the Energy Dissipation of*

Supercritical Channel Flows”, y cuya copia se encuentra en el anexo 1 de ese documento. Además de este artículo, también se han publicado los siguientes resúmenes y ponencias en diferentes congresos y seminarios con los avances que se han ido obteniendo durante el periodo de investigación:

- *“Influencia de la aireación en rápidas y cuencos de resalto. LS-Emulsion”*, presentado en el VIII Seminario sobre Líneas Prioritarias de la Red de Laboratorios de Hidráulica de España (ISBN 978-84-170987-2-8) el 25 de junio de 2015 en la Universidad da Coruña (A Coruña, España).
- *“Influencia de la aireación del flujo en rápidas y en el rendimiento de amortiguación de energía en cuencos de resalto”*, publicado en las IV Jornadas de Ingeniería del Agua (JIA) en la Universidad de Córdoba (Córdoba, España) entre el 20 y el 23 de octubre del 2015 (ISBN 978-84-608-3043-6) y adjunto en el anexo 2 de esta tesis.
- *“Influencia de la aireación en las pérdidas por fricción en rápidas”*, presentado en el IX Seminario sobre Líneas Prioritarias de la Red de Laboratorios de Hidráulica de España (ISBN 978-84-17098-7-3) que se tuvo lugar en la Universidad Politécnica de Cartagena (Cartagena, España) el 28 de junio de 2016.
- *“Medidas para la caracterización de flujos emulsionados”*, que fue presentado en el X Seminario sobre Líneas Prioritarias de la Red de Laboratorios de Hidráulica de España el 21 de junio de 2017 en la Universitat Politècnica de Catalunya (Barcelona, España).
- *“Influencia de la aireación del flujo en rápidas en la evolución del Número de Manning”*, artículo publicado en V Jornadas de Ingeniería del Agua (ISBN 978-84-9749-670-4) celebradas en la Universidad da Coruña (A Coruña, España) entre el 25 y 26 de octubre de 2017 (anexo 3).
- *“Medida de concentración en flujos emulsionados mediante fotografía con iluminación láser”*, presentado en el X Seminario sobre Líneas Prioritarias de la Red de Laboratorios de Hidráulica de España que se celebró en la Universidad de Castilla–La Mancha (Toledo, España) el 4 de octubre de 2018.
- *“Energy Dissipation Structures: Influence of Aeration in Supercritical Flows”*, presentado en el III International Electronic Conference on Water Sciences (EISSN 2504-3900) entre el 15 y el 30 de noviembre de 2018 (anexo 4).

1.1. Motivación

El uso y la gestión del agua en España han supuesto un reto para los ingenieros hidráulicos desde la antigüedad, ya que se trata de un recurso irregularmente distribuido de manera natural en todo el territorio nacional, tanto en el espacio como en el tiempo. Esta peculiaridad ha obligado a la construcción de innumerables obras públicas tanto para el almacenamiento como el transporte y la distribución, lo que ha convertido a España en uno de los países con mayor número de estructuras hidráulicas de toda Europa.

Debido a la antigüedad de su construcción, gran parte de las presas españolas que hoy en día se encuentran en funcionamiento han sido diseñadas con criterios de seguridad menos estrictos de los que actualmente exige la normativa española. Así lo contemplan tanto el actual marco legislativo como las recomendaciones técnicas en materia de seguridad de obras hidráulicas en España, reflejados en las Normas Técnicas de Seguridad (NTS) de Presas y Embalses del Ministerio para la Transición Ecológica. Estos documentos constituyen una parte fundamental de la normativa legal en este campo y fija escenarios de comprobación más restrictivos que los considerados para su diseño original.

Para hacer frente a esta situación, la administración hidráulica española está haciendo una gran inversión en actualizar el actual parque de presas a tales estándares de seguridad. Esto requiere aumentar la capacidad de los órganos de desagüe, así como las dimensiones de las obras de restitución de caudales de evacuación al cauce.

La primera motivación de esta tesis es aportar más información en la influencia que podría tener el efecto de la aireación sobre la mejora del rendimiento de amortiguación de energía en cuencos de resalto (Fernández-Bono y Vallés-Morán, 2006). Esto permitiría aumentar los rangos de funcionamiento de las actuales estructuras de disipación y reducir los gastos de inversión necesarios para su modificación.

Muchos de los estudios que se han realizado para analizar este fenómeno se han llevado a cabo en modelos físicos de pequeñas dimensiones, donde los resultados podrían verse alterados por los efectos asociados a una escala excesivamente grande. En este sentido, otra de las motivaciones de este trabajo es realizar una campaña experimental que permita caracterizar la influencia de la aireación sin alteraciones. Para alcanzar estas condiciones, se ha diseñado y construido un dispositivo de grandes dimensiones que ha permitido realizar una campaña de ensayos libre de tales efectos y garantizar la representatividad de los datos obtenidos.

Otro impulso para el desarrollo de esta tesis, y en la que se ha podido avanzar con un mayor detalle, ha sido el estudio de la influencia de la concentración de aire en la disipación de energía en la rápida, como paso necesario para caracterizar el comportamiento del flujo de entrada al cuenco de amortiguamiento. Con el canal de descarga que se ha construido como parte del prototipo para la campaña experimental, se ha desarrollado un marco idóneo para el análisis de los efectos de la aireación en un flujo en condiciones supercríticas.

La posibilidad de variar la concentración de la mezcla con diferentes caudales de agua, ha permitido caracterizar su influencia sobre la pendiente de fricción de la rápida. Extrapolando esta relación a variables que son utilizadas para definir el funcionamiento del flujo, como el coeficiente de rugosidad de Manning (Manning, 1891), se pretende determinar la evolución de este valor en función del nivel de aire en la emulsión.

En cuanto al resalto, los parámetros que determinan su comportamiento son el número de Froude en la entrada del cuenco y el calado conjugado (Bélanger, 1841). Existen otras variables que caracterizan su funcionamiento, como su longitud y la energía residual generada, y cuya influencia por la concentración del flujo ha sido analizada en este trabajo.

Por último, la determinación la concentración del aire en flujos emulsionados de manera experimental sigue suponiendo un reto hoy en día. Existen diferentes principios físicos en los que se basan los instrumentos de medida actuales, como son los equipos de fibra óptica, de conductividad, de medición directa, etc. Con esta investigación también se pretende aportar un análisis de las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos de acuerdo con la experiencia obtenida durante los trabajos experimentales.

1.2. Objetivos

El principal objetivo de esta tesis es estudiar el resalto hidráulico con especial atención a la influencia que la aireación del flujo tiene sobre su comportamiento hidrodinámico. Como objetivo previo, ha sido necesario caracterizar con detalle el comportamiento y la evolución del flujo emulsionado en la rápida, ya que define las condiciones de entrada del resalto en el cuenco de amortiguamiento.

Para poder alcanzar estas metas, ha sido necesario abordar otras necesidades para definir correctamente los escenarios en los que se ha trabajado, como son el diseño y construcción de un dispositivo experimental que permita realizar una campaña de ensayos en laboratorio libre de efectos de escala. Estas dimensiones del modelo garantizaran la representatividad

de los resultados y permitirá extrapolar las conclusiones del funcionamiento del flujo a prototipos a escala real.

Otro objetivo complementario de este estudio es seleccionar los métodos más adecuados para determinar las variables hidráulicas fundamentales del flujo emulsionado en la rápida y en el cuenco, que son el calado, la velocidad y la concentración de aire.

La consecución de estos propósitos implica alcanzar también otros objetivos de carácter parcial y metodológico y que se enumeran a continuación:

- Análisis de los trabajos previos y definición del estado de conocimiento sobre el efecto de la aireación en flujos supercríticos y en resaltos hidráulicos.
- Diseño de los equipos de instrumentación y control necesarios para definir correctamente las condiciones del flujo en el modelo físico.
- Proponer un método que permita cuantificar el efecto de la aireación en la rápida en función de la pendiente de fricción y la disipación de energía.
- Emplear los resultados de la campaña experimental para mejorar la formulación teórica del resalto hidráulico en cuencos rectangulares.

1.3. Planteamiento y estructura de la investigación

Esta tesis tiene un carácter plenamente experimental y los resultados obtenidos durante los ensayos permiten una aplicación muy amplia de sus conclusiones a prototipos reales. Dadas las dimensiones del modelo físico, es posible eliminar los efectos de escala y extrapolar el funcionamiento del flujo emulsionado en la rápida y en el cuenco de resalto a la mayoría de estructuras donde se desarrollan fenómenos de aireación.

El esquema general de la investigación comienza con la recopilación del estado del arte (capítulo 2), donde se ha incluido las principales referencias bibliográficas en esta materia y que se ha estructurado en seis apartados. El primero analiza el fenómeno de la aireación en flujos y las diferentes formas que propician la entrada de aire, de manera longitudinal o local, en una estructura hidráulica. El segundo apartado define las variables representativas que caracterizan el fenómeno de la aireación y el transporte de aire en un flujo. El tercer y cuarto epígrafe de este capítulo se centran en los mecanismo de aireación en rápidas y cuencos de resalto. En el análisis de los canales de descarga de aliviaderos se ha incluido, además de la

aireación natural, el esquema de funcionamiento de aireadores en rápidas para estudiar la aireación artificial. El quinto apartado incluye las referencias sobre los trabajos realizados hasta el momento de medidas de la aireación, tanto natural como artificial, en modelos físicos y prototipos. En general, todos los estudios se centran en determinar la concentración de aire, que es la variable que define de manera más clara el contenido de aire en un flujo. El último epígrafe de este capítulo desarrolla las referencias asociadas a los efectos de la aireación sobre mecanismos de disipación de energía en rápidas y cuencos de resalto, donde se exponen los criterios teóricos que serán aplicados en esta investigación.

El capítulo 3 describe los materiales y la metodología que se han utilizado para desarrollar la fase experimental en esta tesis y se divide en seis apartados. En primer lugar, los dos primeros incluyen el diseño de la instalación experimental construida en el laboratorio de hidráulica y los equipos de alimentación y control instalados, necesarios para definir las condiciones de los ensayos y asegurar la representatividad de los resultados. Los siguientes tres apartados describen los métodos utilizados para obtener los datos de velocidad, calado y concentración de aire en la rápida y en el cuenco de resalto. Por último, se detalla el diseño planteado para la fase de ensayos que se ha desarrollado en esta tesis.

En el capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos durante la campaña experimental y se ha dividido en otros seis apartados. En el primero se incluyen las variables que caracterizan el flujo en la sección de entrada a la rápida, que son definidas por los caudales de aportación de agua y aire y la apertura de la boquilla inicial. El resto de apartados muestra los resultados de velocidad y concentración de aire en el pie de la rápida, los de calado y velocidad en la sección de salida del cuenco y la longitud del resalto hidráulico para cada uno de los ensayos.

Estos datos son analizados en el capítulo 5 y se estructura en dos epígrafes, uno enfocado a la discusión del comportamiento del flujo emulsionado en la rápida y, el segundo, en el cuenco de amortiguamiento. En este último se ha estudiado la influencia de la concentración sobre tres variables características del resalto hidráulico: el calado conjugado, la longitud del resalto y la energía residual.

Los capítulos 6 y 7 incluyen un resumen de las principales conclusiones del estudio y las aportaciones originales incluidas en esta tesis, así como una propuesta de futuras líneas de investigación en trabajos futuros. Por último, el capítulo 8 recoge las principales referencias bibliográficas que han servido de base para los trabajos realizados en esta tesis.

2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se revisan los antecedentes que fundamentan la investigación en la que se basa esta tesis. Todos los apartados están interrelacionados y definen una estructura que se resume en seis partes. Las cuatro primeras recogen los fundamentos de la aireación en flujos y sus efectos en estructuras hidráulicas: (1) aireación en flujos y caracterización de la entrada de aire en estructuras hidráulicas, (2) parámetros característicos de la aireación, (3) aireación en canales de descarga y (4) aireación en cuencos de resalto. El quinto apartado incluye un resumen de las metodologías existentes de medidas de aireación en modelo físico y prototipo (5). El último epígrafe detalla los efectos de la aireación sobre los mecanismos de disipación de energía en flujos emulsionados (6), que será la base teórica del análisis de los resultados obtenidos en la rápida y en el cuenco de resalto.

- Aireación en flujos y caracterización de la entrada de aire en las estructuras hidráulicas: Esta sección contiene una visión global del fenómeno de aireación en estructuras hidráulicas y clasifica las diferentes formas de entrada y salida de aire en flujos.
- Parámetros característicos de la aireación: En este apartado se incluye la definición de las principales variables que se utilizan para caracterizar el comportamiento del flujo emulsionado.
- Aireación en rápidas y canales de descarga: El objetivo de esta parte es describir los principales fenómenos que intervienen en el proceso de aireación en rápidas con flujos supercríticos. Junto al siguiente apartado, se concretan las principales referencias en las que se ha basado la fase experimental de esta tesis.
- Aireación en cuencos de resalto: Este apartado continúa con la sección anterior y traslada el análisis de la aireación y sus efectos al resalto hidráulico en el cuenco.
- Medidas de aireación en modelo físico y prototipo: En este epígrafe se hace una revisión de la evolución de los métodos de toma de concentración en flujos hasta la actualidad.
- Efectos de la aireación sobre los mecanismos de disipación de energía: En la última sección de este capítulo se resumen las diferentes formulaciones que vinculan la aireación en flujos con la pérdida de energía, tanto en canales abiertos como en cuencos de resalto.

2.1. Aireación en flujos y caracterización de la entrada de aire en estructuras hidráulicas

La alta velocidad que alcanza el flujo en una estructura hidráulica genera una situación de intercambio de aire con la atmósfera que conforma la mezcla emulsionada. Este fenómeno determina el transporte de las burbujas en condiciones bifásicas, que puede propiciar el incremento o decremento de concentración en función de las condiciones y el régimen de la mezcla.

Existen diferentes formas de aireación y entrada de aire en estructuras hidráulicas. En conducciones cerradas a presión, la concentración viene determinada por inyecciones artificiales y por el contenido inicial de burbujas en el fluido. En estos casos, la demanda o saturación de aire en el flujo está muy influenciada por las condiciones de presión y temperatura, donde un cambio en cualquiera de estas variables supone una modificación del diámetro de las burbujas en el interior del líquido. Este efecto modifica las propiedades elásticas y de la velocidad de propagación de la onda, sobre todo con bajas concentraciones, y tiene gran influencia en cambios de régimen en flujos confinados (Kobus, 1984; Bourdarias, 2009).

Para conductos cerrados en lámina libre, la aireación del fluido se produce de manera natural desde la sección no ocupada por el agua. Sin embargo, si la demanda es mayor que el volumen que puede aportar la zona no anegada, lo más frecuente es recurrir a dispositivos de aireación artificial para que la propia corriente pueda succionar el aire adicional que necesita e incorporarlo al volumen del fluido (Gutiérrez Serret y Palma, 1995).

En estructuras abiertas, la entrada de aire puede producirse por diferentes métodos, tanto de manera natural como artificial. En el primer caso, las condiciones del flujo que generan la entrada o arrastre de aire constituyen lo que se denomina aireación natural (*self-aeration*). Este fenómeno se puede producir a lo largo de la superficie del flujo, por la interacción entre la interfaz de la mezcla y la atmósfera, dando lugar a una aireación longitudinal (*ambient aeration*), o tiene lugar en secciones concretas donde se produce una discontinuidad, generando una situación de aireación local (*local aeration*) (Wood, 1991).

Cuando la demanda de aire en algún punto de la estructura es mayor que la capacidad de aportación, existen riesgos de que aparezcan presiones negativas sobre el contorno del fluido. Este efecto supone un riesgo para que se produzca cavitación en esa zona, por lo que se recurre a dispositivos artificiales llamados aireadores (*aerators*) que permiten aumentar

la concentración de aire en el flujo mediante aireación artificial (*artificial aeration*) y así eliminar la posibilidad de que se produzca este fenómeno (Gutiérrez Serret y Palma, 1995). El diseño de este tipo de sistemas de aportación artificial está determinado por el objetivo de la aireación. A parte de su empleo en estructuras hidráulicas, también es muy común en plantas de tratamiento y reutilización de aguas residuales, que necesitan reoxigenar los efluentes durante diferentes fases del proceso de depuración. Los dispositivos empleados suelen operar bajo uno de estos dos principios (Kobus, 1984):

- Formación de la mezcla emulsionada desde la superficie mediante sistemas mecánicos, como rotores, espráis o bombas externas para forzar la entrada de aire en el flujo.
- Formación de la mezcla emulsionada por la entrada de aire desde el exterior sin elementos de impulsión. Estos dispositivos son los que se suelen utilizar en estructuras hidráulicas, ubicados en la solera o cajeros del canal de descarga, y están conectados al exterior por conductos a presión. Su funcionamiento básico no requiere elementos mecánicos, ya que la inyección de aire al fluido se produce por la diferencia de presión negativa o succión que genera sobre el paramento el flujo tangencial a alta velocidad. La figura 1 muestra varias vistas del esquema de aireación artificial en el aliviadero de la presa de San Roque (Filipinas).

Figura 1. Esquema de aireación artificial en el aliviadero de San Roque en Filipinas (Gutiérrez Serret y Palma, 1995)

A continuación, los siguientes subapartados desarrollan con más detalle los diferentes tipos de entrada de aire y las formas de aireación, tanto natural como artificial, en estructuras abiertas con condiciones de presión atmosférica (Wood, 1991).

2.1.1. Aireación natural en la superficie de flujos en régimen supercrítico

Las condiciones de turbulencia desarrolladas en la superficie de flujos supercríticos en canales abiertos generan alteraciones de la interfaz que propician el balance de aire entre la atmósfera y el fluido. Este esquema es característico de la aireación natural longitudinal (Volkart, 1980) y supone la principal aportación a la concentración del flujo en rápidas de aliviaderos convencionales (fotografías 1 y 2).

También es característica en flujos de salida de trampolines de lanzamiento (fotografía 3) e impulsiones de válvulas de desagüe (fotografía 4), donde la tensión tangencial de los contornos del chorro con la atmósfera permite la inclusión prolongada de aire en todo el volumen del fluido. El incremento de la concentración en este tipo de lanzamientos amplifica y difumina la sección del flujo hasta, en muchos casos, la completa desaparición del chorro.

Fotografía 1. Aliviadero de la presa de Cachamuiña (Orense) (concelloperreiro.com)

Fotografía 2. Aliviaderos de la presa del Villar (Madrid) y derivación de Bembézar (Córdoba) (ingeoexpert.com)

Fotografía 3. Trampolín de lanzamiento de la presa de la Almendra (Salamanca) (foroembalses.net)

Fotografía 4. Desagüe de fondo (Válvula Howell-Bunger) de la presa de Iznajar (Córdoba) (ingeoexpert.com)

2.1.2. Aireación local en impacto de chorros

La entrada local de aire en flujos en lámina libre siempre está asociada a discontinuidades de la superficie. Un ejemplo de este tipo de alteraciones son el impacto de un chorro sobre un colcho de agua, como impactos de chorros procedentes de descargas verticales en pozo o vertederos de pared delgada. La figura 2 muestra diferentes esquemas de aireación local provocados por el impacto de un chorro (Kobus, 1984). En estos casos, la entrada de aire se produce por la aparición de vórtices paralelos al flujo durante el contacto entre el chorro y la superficie de agua donde impacta y es independiente de la concentración inicial y la capacidad de transporte del flujo (Gutiérrez Serret y Palma, 1995). Las configuraciones asociadas al impacto de chorros se caracterizan porque la entrada de aire se localiza en la interfaz entre el impacto y la superficie (fotografía 5). Este efecto hace que aumente la

turbulencia en la zona donde se produce el choque y que la velocidad ascensional de las burbujas de aire hacia la superficie sea alta, provocando al mismo tiempo un escape de grandes cantidades de burbujas y una elevada salida de aire (Ervine, 1976; Thomas, 1976; Castillo, 2006). Bajo estas condiciones, el balance de intercambio de aire depende de otros factores asociados al flujo de recepción, como su velocidad y las condiciones a las que se someterá en su transporte (conducción cerrada o abierta).

Figura 2. Ejemplos de configuraciones de aireación local por el impacto de chorros (Wood, 1991)

Fotografía 5. Entrada de aire por el impacto de un chorro (Wood, 1991)

2.1.3. Aireación local en resaltos hidráulicos

El resalto hidráulico es otro ejemplo de discontinuidad en flujos que propicia la entrada local de aire (Kobus, 1984; Gutiérrez Serret y Palma, 1995). Al igual que en el caso anterior, la entrada se produce por la alta turbulencia que se forma en el cambio de régimen, pero en este caso el efecto de absorción viene asociado a vórtices perpendiculares al flujo (fotografía 6 y figura 3). El resalto estacionario es el más característico de cuencos en aliviaderos, pero también existen otras configuraciones asociadas a diferentes estructuras hidráulicas, como impactos de chorros, sifones y vertederos bajo compuerta.

Fotografía 6. Entrada de aire por vórtices perpendiculares al flujo en un resalto hidráulico (Barczewski, 1985)

Figura 3. Configuración de aireación local en un resalto hidráulico (Wood, 1991)

2.1.4. Aireación local en cambios de sección

Modificaciones en la solera (sobreelevaciones o descensos) de un canal o expansiones abruptas de la sección generan una reducción de la presión en esa zona con respecto a la

del flujo, que en determinados casos llega a ser negativa (Kobus, 1984). Esta situación provoca una demanda de aire por el efecto de succión que, en el caso de no contar con una vía natural, ha de incorporarse mediante un sistema de aireación artificial (figura 4). Generalmente, la entrada en estos casos se produce por vórtices perpendiculares a la dirección del flujo principal.

Figura 4. Configuración de aireación local por un sistema artificial en la base de un canal (Wood, 1991)

2.1.5. Aireación local en transiciones de flujos en lámina libre a conductos cerrados

La última forma de aireación en estructuras hidráulicas está asociada a las transiciones donde el flujo pasa de condiciones en lámina libre a conductos a presión. Existen multitud de ejemplos de este fenómeno, como cámaras de succión de bombas, tomas de embalses, túneles de derivación, etc. En todos estos casos se produce una disminución de la presión en la zona previa a la embocadura de la conducción, que provoca la formación de remolinos y vórtices de eje paralelo al flujo e inducen a la entrada de aire (Wood, 1991). La geometría y las condiciones de contorno de la entrada pueden variar la intensidad de la aireación.

Desde un punto de vista operacional, la entrada de aire en conducciones cerradas puede tener repercusiones en el funcionamiento del sistema, ya que puede generar alteraciones del flujo en el interior de la tubería y reducir el rendimiento en el transporte. Un ejemplo de estas consideraciones se encuentra en el diseño de las campanas de succión en las estaciones de bombeo, donde existen normativas como la ANSI/HI 9.8 (Hydraulic Institute,

1998) que definen los criterios de diseño de la embocaduras para reducir en lo posible la aparición de vórtices y la consiguiente entrada de aire (fotografía 7).

Fotografía 7. Vórtice en la entrada de flujo en una campana de succión (Technoindustria.wordpress.com)

2.2. Parámetros y variables características de la aireación

La caracterización del fenómeno de la aireación y el transporte de aire en un flujo viene determinado por una serie de variables. En el caso de canales en lámina libre, existen tres hipótesis que hay que considerar a la hora de definir estos parámetros (Wood, 1991):

- Siempre existe una salida ilimitada de aire del flujo a la atmósfera.
- Normalmente existe un aporte directo ilimitado de aire desde la atmósfera al flujo (con la excepción de los aireadores en rápidas y en cuencos de resalto).
- Existe una dependencia directa de la capacidad de transporte del flujo respecto a las características geométricas del canal.
- En una mezcla emulsionada en canales abiertos, las velocidades del aire y del agua son similares.

Estos condicionantes excluyen a priori cualquier efecto asociado a la variación de la pendiente o del retorno de partículas de aire aguas arriba, como ocurre en flujos en conducciones cerradas y a presión. Teniendo en cuenta estos apartados, las variables dependientes que describen la entrada, el transporte y el balance de aire en flujos emulsionados son las siguientes (Gutiérrez Serret y Palma, 1995):

- Caudal de aire (Q_a): Representa el caudal de aire de la mezcla emulsionada y está asociado al volumen de aire (V_a) por el tiempo (t) en una sección del canal.

$$Q_a = \frac{V_a}{t} \quad [1]$$

- Caudal de agua (Q_w): Representa el caudal de agua de la mezcla emulsionada y está asociado al volumen de agua (V_w) por el tiempo (t) en una sección del canal.

$$Q_w = \frac{V_w}{t} \quad [2]$$

- Caudal total (Q_t): Representa la suma del caudal de aire y el caudal de agua de la mezcla emulsionada y está asociado al volumen total (V_t) por el tiempo (t) en una sección del canal.

$$Q_t = \frac{V_t}{t} = \frac{V_a + V_w}{t} \quad [3]$$

- Concentración (C): Es la relación entre el volumen de aire (V_a) de la mezcla emulsionada y el volumen total (V_t).

$$C = \frac{V_a}{V_t} = \frac{V_a}{V_a + V_w} \quad [4]$$

En canales en lámina libre, al considerar una velocidad similar para el agua y el aire, la ecuación 4 puede expresarse de la siguiente forma:

$$C = \frac{Q_a}{Q_t} = \frac{Q_a}{Q_a + Q_w} \quad [5]$$

- Concentración de agua (ω): Es la relación entre el volumen de agua (V_w) de la mezcla emulsionada y el volumen total (V_t). Al igual que el caso anterior, si las

velocidades del agua y el aire son similares, puede expresarse en términos de caudales (Q_a y Q_w).

$$\omega = \frac{V_w}{V_a + V_w} = \frac{Q_w}{Q_a + Q_w} \quad [6]$$

- Coeficiente de aireación (β): Representa la relación entre el caudal de aire y el caudal de agua de la mezcla emulsionada. Cuando la cantidad de aire es pequeña, se considera que el coeficiente de aireación es igual al valor de la concentración.

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} \quad [7]$$

- Densidad de la mezcla (ρ_m): Define la densidad de la mezcla emulsionada y viene dada por la relación entre las densidades (ρ_w y ρ_a) y los caudales del agua y el aire.

$$\rho_m = \frac{\rho_w Q_w + \rho_a Q_a}{Q_w + Q_a} \quad [8]$$

De la relación de las variables anteriores, surgen una serie de ecuaciones que permiten vincular los parámetros característicos de la aireación:

$$\omega = 1 - C \quad \omega = \frac{1}{1 + \beta} \quad [9]$$

$$\beta = \frac{C}{1 - C} \quad \beta = \frac{1 - \omega}{\omega} \quad [10]$$

$$C = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad C = 1 - \omega \quad [11]$$

$$\rho_m = \rho_w \cdot \omega + \rho_a \cdot C \left(1 + \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} \right) \approx \frac{\rho_w}{1 + \beta} = \rho_w \cdot \omega \text{ si } (\rho_w \gg \rho_a) \quad [12]$$

De manera adicional, también es necesario incluir algunos conceptos relacionados con la concentración del aire, el calado y la velocidad para caracterizar completamente los flujos emulsionados en condiciones de lámina libre. En primer lugar, el análisis de la concentración se puede llevar a cabo desde dos enfoques:

- Concentración puntual o local (C): Coincide con la ecuación 5 y es la concentración en un punto a una determinada profundidad.

- Concentración media C_m : Es el valor medio de todas las concentraciones de una sección a lo largo de la vertical.

Otro parámetro a considerar durante el análisis de flujos emulsionados es el calado, que se puede representar de tres maneras diferentes según la figura 5 (Gutiérrez Serret, 1995):

- Calado emulsionado (h_e): Es el calado total de la mezcla con una superficie uniforme y sin irregularidades. En flujos supercrítico y altamente turbulentos, no resulta fácil definir esta interfaz debido a las altas alteraciones en superficie.
- Calado equivalente de agua (h_w): Se trata de un valor teórico e indica el calado que debería tener el flujo exclusivamente con la parte correspondiente al agua, pero con la velocidad de la mezcla emulsionada.
- Calado característico de una cierta concentración (h_c): Es el calado asociado a la profundidad donde se alcanza una cierta concentración. Durante el análisis de los resultados en este trabajo, se ha considerado como valor de referencia el valor h_{90} , que corresponde al nivel de la lámina de agua con una concentración del 90 %.

Figura 5. Caracterización de calados en flujos emulsionados (Gutiérrez Serret y Palma, 1995)

La última variable a considerar es la velocidad, donde hay que diferenciar dos análisis en función del tipo de concentración que se haya tomado:

- Velocidad característica de una concentración local C (v_c): Este valor corresponde a la velocidad del flujo a una determinada profundidad de la sección del canal y está asociada a la concentración local en ese mismo punto.

- Velocidad media de la mezcla emulsionada (v_m): Es la velocidad media de todo el perfil del flujo y depende de la concentración media de la sección (C_m).

2.3. Aireación en rápidas y canales de descarga

Tras exponer de manera general todas las consideraciones del fenómeno de la aireación y los principales parámetros que caracterizan el flujo emulsionado, este apartado se centra en el análisis específico del efecto la aireación en flujos en lámina libre, tanto natural como artificial. En ambos casos se analizan el mecanismo que genera el balance de aire en el agua, la estructura del flujo emulsionado y los parámetros que caracterizan su comportamiento.

2.3.1. Aireación natural en rápidas y canales de descarga

El estudio de la aireación natural en rápidas y canales de descarga comienza a principios del siglo XX en Estados Unidos, con el planteamiento de introducir aire en flujos de desagüe de las presas para reducir los efectos de cavitación (Houk, 1927). Posteriormente, y en paralelo a trabajos europeos, se desarrollan los primeros análisis experimentales sobre casos específicos (Ludin, 1928; Lane, 1936). Ehrenberger realiza el primer ensayo en laboratorio en 1926, donde evalúa el efecto de proyección de gotas de agua sobre un flujo y comprueba como introducen aire en el fluido, determinado posteriormente la concentración en diferentes niveles.

Entre 1940 y 1960 se producen diversos avances con el análisis del arrastre de aire en rápidas de aliviaderos (Hall, 1943), la caracterización del mecanismo causante de la aireación (Hickox, 1945) y una serie de experimentos que van clarificando el funcionamiento de flujos emulsionados (Viparelli, 1951; Frankovich, 1953; Levin, 1955). Esta etapa de investigación concluye en 1958, con los resultados del trabajo de Straub y Anderson sobre experimentos de flujos aireados en canales abiertos. Este artículo presenta las medidas de concentración de aire en flujos con aireación natural en canales no revestidos con diferentes pendientes y caudales. La principal aportación de este estudio es que plantea las bases para el definir el mecanismo de entrada de aire y su movimiento en un flujo bajo estas condiciones. Los resultados muestran que la distribución del aire puede ser caracterizada con conceptos generales de transporte turbulento.

Durante los años 60 y 70 continúan las investigaciones en laboratorio y los trabajos in situ, entre los que destacan las conclusiones de Rao (1966), que plantea un desarrollo teórico para determinar la concentración y la velocidad de un flujo en función de la turbulencia

generada por la proximidad o el alejamiento a los cajeros laterales, y Falvey (1979), que propone una fórmula teórica para obtener la concentración media en flujos uniformemente aireados.

En la década de 1980 aparecen los trabajos de Volkart (1980), Pinto (1989) y Kobus (1984), donde se resumen y exponen los mecanismos de aireación que intervienen en la formación de un flujo emulsionado. También son destacables en este periodo las investigaciones de Cain (1981) y Wood (1983) que, de manera conjunta y por separado, amplían la descripción de los efectos de la aireación natural sobre flujos en régimen uniforme. Estos dos autores también amplían la temática de instrumentación para la medida de concentración, que será tratada con más detalle en un apartado 2.5.

Los años 90 y la primera década del siglo XXI se caracterizan en el estudio de la aireación por las mejoras desarrolladas en el plano de la instrumentación, donde aparecen nuevos dispositivos para determinar la concentración de la mezcla emulsionada (Jacobs, 1997, Chanson, 2002).

También aparecen nuevos estudios sobre los efectos de escala en la modelización física y numérica de este fenómeno, como los desarrollados por Boes (2000), Buscaglia (2002), Kramer (2005) y Bombardelli (2007). Un artículo que tiene gran relevancia en el desarrollo de esta tesis fue el publicado por Moñino y Riera en el año 2002, donde se propone que la velocidad de un flujo se incrementa con la concentración de aire, aunque no se cuantifica esta variación.

Los nuevos avances en este ámbito han continuado las líneas de investigación previas en los últimos años (2010-2019), con relevantes artículos por parte de Pfister (2014) y Chanson (2015), relativos a los efectos de escala de la aireación en modelización física, y Bai (2016 y 2018), que define un desarrollo experimental para analizar los mecanismos turbulentos que intervienen en la frecuencia y tamaño de las burbujas.

Los siguientes subapartados desarrollan con más detalle los mecanismos de entrada de aire y la estructura del flujo emulsionado que podemos encontrar en una rápida con aireación natural.

2.3.1.1. Mecanismos de aireación natural

Existen diferentes mecanismos que generan la aireación de un flujo en lámina libre. En el caso de canales con régimen supercrítico, el principal efecto que permite el intercambio de

aire entre agua y atmósfera es la elevada turbulencia que se genera por las características del flujo (Wood, 1991; Gutiérrez Serret y Palma, 1995). Bajo estas condiciones, las partículas de la superficie experimentan grandes alteraciones, sobretodo en la componente ortogonal (v'), por lo que parte del flujo supera la tensión superficial y se proyectan gotas de diferentes tamaños hacia el exterior.

Las partículas más finas se mantienen en suspensión en la zona de aire superior a la interfaz del fluido, debido a la alta turbulencia que también mantiene esta zona, pero las de mayor tamaño retornan y se incorporan de nuevo al flujo impactando sobre la superficie de agua (figura 6). Al cerrarse de nuevo la brecha abierta por el impacto en la superficie por el efecto de la tensión superficial, quedan atrapadas burbujas de aire en esta zona de intercambio. De todo el aire que se incorpora al fluido, una parte pasa a zonas interiores y otra asciende de nuevo por el efecto de la presión hidrostática y las condiciones de saturación, estableciendo el balance característico del proceso de aireación.

Figura 6. Esquema de mecanismo de aireación en flujos de canales abiertos (Gutiérrez Serret y Palma, 1995)

Según Gutiérrez Serret (1994), para que se produzca este mecanismo tienen que darse los siguientes condicionantes:

- El diámetro de las burbujas es mayor que el de la gota que provoca su entrada en el flujo, oscilando según criterios experimentales en el rango $1,1 < D_{\text{Burbuja}} / D_{\text{Gota}} < 1,6$.

- El tamaño de las burbujas se incrementa con el de las gotas y con su velocidad de impacto sobre la superficie del flujo. Este variable depende de la altura que alcanza la gota proyectada desde la corriente, de la turbulencia del flujo y la su velocidad.
- Los tamaños de las gotas que impactan sobre la superficie oscilan entre 1 y 6 mm. Cuando alcanza diámetros mayores, dejan de ser esféricas y tienden a dividirse, adoptando de nuevo formas esféricas y tamaños dentro del rango anterior.
- Los diámetros de las burbujas oscilan entre 1 y 20 mm. Se ha observado que su tamaño es mayor en las zonas próximas a la superficie que en las inferiores, debido al efecto de la flotación y el gradiente de presiones (fotografías 8).

Fotografía 8. Distribución longitudinal de burbujas con diámetro variable en un canal de descarga (Rebollo, 2018)

- Para que comience el arrastre de aire, la turbulencia ha de ser lo suficientemente elevada para que la componente ortogonal de la velocidad (v') alcance valores entre 0,1 y 0,3 m/s.

Se ha comprobado que, cuando el flujo se desarrolla en un canal cerrado en lugar de uno abierto, aunque se cumplan las condiciones de lámina libre, el nivel de aireación es menor (Volkart, 1982). El principal motivo de este efecto es que las gotas chocan en los contornos de la conducción y pierden energía, aumentando la dificultad de introducir aire en el flujo. Además, a no ser a cielo abierto, la disposición de airea a la demanda del flujo es menor, decreciendo a medida que aumenta el nivel hacia el llenado de la sección.

2.3.1.2. Estructura del flujo por aireación natural

La distribución del aire en un flujo varía a lo largo de la vertical en función de las condiciones de velocidad y turbulencia. El análisis de la emulsión se ha realizado desde dos enfoques, transversal y longitudinal (Gutiérrez Serret y Palma, 1995). La estructura transversal de una mezcla emulsionada en lámina libre y régimen supercrítico puede dividirse en cuatro áreas (Killen y Anderson, 1969) y está vinculada al nivel de concentración a lo largo de la vertical. La figura 7 recoge las zonas de aireación y las clasifica, desde la parte inferior a la superior del flujo, en zona sin airear, zona intermedia, zona de mezcla y zona superficial:

- Zona sin airear: Es el área inferior de la sección donde la aireación no ha llegado a desarrollarse por completo y con concentraciones muy bajas.
- Zona intermedia: Es la zona del flujo emulsionado donde no ya existe agitación que permiten la entrada de aire en la superficie. La concentración en esta franja depende del nivel de turbulencia de la superficie y de las condiciones de entrada de aire.
- Zona de mezcla: Representa el área de la sección donde se produce la máxima interacción entre agua y aire y el balance de intercambio de burbujas entre agua y aire.
- Zona superficial: Se define como la parte externa del flujo y se compone fundamentalmente de aire. Es en esta franja donde se produce la proyección de las gotas de agua que luego retornan a la superficie del flujo y propician la entrada de burbujas.

Figura 7. Distribución de zonas de la estructura transversal del flujo emulsionado (Gutiérrez Serret y Palma, 1995)

En cuanto a la estructura longitudinal, el proceso de aireación en canales abiertos cuenta con tres zonas genéricas (Falvey, 1980): zona sin aireación, zona de aireación gradual (con aireación parcial y aireación total) y zona de aireación uniforme. Otra variable del análisis es el punto crítico, que marca la transición entre la zona sin aireación y la de aireación gradual.

La figura 8 muestra las diferentes fases de la estructura longitudinal en una mezcla emulsionada, siempre que cuente con la longitud y pendiente suficiente para que llegue a desarrollarse por completo la aireación.

La longitud de la zona sin aireación tiene gran dependencia de la tipología de la embocadura del aliviadero. En el esquema de la figura se representa un vertedero de labio fijo, pero la presencia de una compuerta o cualquier otro tipo de elemento reduciría esta longitud y, en determinados casos, llegaría a desaparecer.

- Zona sin aireación (1): En este tramo no se alcanza la turbulencia suficiente para generar arrastre de aire al interior del flujo y la superficie es relativamente lisa y sin alteraciones. A medida que se incrementa la velocidad, la capa límite se va aumentando hasta que alcanza la superficie, donde llega al punto crítico.
- Punto crítico: Es la transición entre la zona sin aireación y la de aireación gradual, y se caracteriza por el inicio de entrada de aire y la agitación en la superficie.
- Zona de aireación gradual (2): En este tramo se distinguen dos subzonas. En primer lugar, en la denominada de aireación parcial (2.1), muestra un incremento de la turbulencia en la superficie. Con este fenómeno, el aire comienza a entrar en el agua y es arrastrado aguas abajo, generando zonas del flujo con y sin aire.

La segunda subzona (de aireación total (2.2)), el arrastre de aire se extiende a toda la sección y alcanza la solera de la rápida. En este tramo, la concentración aumenta progresivamente hasta establecer un balance de equilibrio entre el aire que entra y el que sale del flujo.

- Zona de aireación uniforme (3): Este tramo se caracteriza porque la concentración de aire se mantiene constante en toda la sección longitudinal, manteniéndose esta situación mientras no se produzcan modificaciones geométricas de la rápida que hagan volver al flujo a una de las zonas previas.

Figura 8. Distribución de zonas de la estructura longitudinal del flujo emulsionado (Falvey, 1980)

2.3.2. Aireación artificial en rápidas y canales de descarga

El uso de aireación artificial en rápidas y canales con flujos a altas velocidades es el método más efectivo para controlar la cavitación, que favorece la formación de cavidades, su crecimiento y su implosión llenas de vapor o de gas. Estas cavidades se forman en el fluido cuando su presión estática cae por debajo de la presión de vapor del líquido y, al ser transportadas por el flujo a zonas de mayores presiones, implosionan violentamente y generan altísimas presiones.

Para evitar este fenómeno se emplean dispositivos de aireación (aireadores) que succionan aire del exterior para introducirla en el flujo y aumentar la concentración en la zona de solera del canal de descarga, donde las irregularidades del hormigón hacen que el riesgo de cavitación sea mayor (fotografía 9).

Fotografía 9. Daños por cavitación de la presa de Karun (Hopping, 1987) y en el túnel de Glenn Canyon (Falvey, 1990)

Existe diversa documentación sobre los trabajos iniciales en materia de aireación artificial en aliviaderos. Los primeros dispositivos (Gutiérrez Serret y Palma, 1995; Marcano, 2005) se desarrollaron en los años 60 y 70 en presas norteamericanas como la de Grand Coulee, Glen Canyon (fotografía 9), Kortes, y en soviéticas, como la de Brask y Nurek. Posteriormente, a medida que avanza el conocimiento sobre este fenómeno, se incorporaron aireadores en las presas de Mica (Canadá), San Roque (Filipinas) y Karum (Irán, fotografía 9). En las décadas de 1980 y 1990 se generaliza el empleo de estos dispositivos en las grandes presas, donde destacan las presas de Guri (Venezuela), Foz de Areia, en el río Iguazú en Brasil, donde el sistema de aireación fue previsto en su diseño, Reveltoke (Canadá), Thomson (Australia) y Trenggrannu (China). En España, destacan los ejemplos de las presas de Giribaile y Canales, cuyos aireadores fueron descritos por Riera en 1988.

También aparece durante estos años multitud de documentación técnica y artículos científicos sobre la capacidad de demanda de aire de los aireadores y su diseño óptimo para mejorar la aireación del fluido. En este ámbito, destacan los estudios de Chanson (1990) sobre la demanda de aireadores en rápidas, donde determina, mediante ensayos en modelización física, las condiciones idóneas de un flujo supercrítico para incluir el mayor volumen de aire en el fluido y evitar fenómenos de cavitación.

En los últimos años, el uso aireadores se ha extendido como herramienta fundamental en el diseño de aliviaderos y se incluido su estudio de manera generalizada en la fase previa de

modelización física. En el plano de la investigación, las nuevas líneas de trabajo se han especializado en función de la tipologías de rápidas, como su aplicación a aliviaderos escalonados (Koen, 2017), y los efectos localizados de la aireación artificial en torno a pilas y estribos (Luna-Bahena, 2018). Con la mejora de las nuevas técnicas de instrumentación, también se han desarrollado estudios con un detalle mucho mayor durante el análisis, como el efecto del tipo de aireador empleado sobre las características de las burbujas del flujo emulsionado (Bai, 2016).

Al igual que en el apartado anterior sobre aireación natural, los siguientes subapartados desarrollan los mecanismos de entrada de aire y la estructura del flujo aireado en rápidas y canales de descarga con aireación artificial. Además, también se incluye una sección con las características y tipología de los aireadores más comunes.

2.3.2.1. Tipología de aireadores

Existen múltiples geometrías de dispositivos de aireación artificial, pero se pueden clasificar en tres grupos fundamentales (Gutiérrez Serret y Palma, 1995): rampas, escalones y ranuras. En la práctica, ninguno de ellos alcanza las exigencias de aireación necesarias de manera individual, por lo que suelen combinarse para aprovechar las ventajas de cada uno de ellos. La conexión del aireador con la fuente de aire también propicia múltiples combinaciones, dependiendo del diseño original del aliviadero (Marcano 1984; Wood, 1991). Por último, y como normal general, el diseño y la geometría de los aireadores y de su sistema de alimentación se seleccionan en base a estudios de modelos físicos a escala.

- Rampas: Generalmente se aplican en aliviaderos ya contruidos para evitar los efectos de la cavitación. Suministran altas cantidades de aires para caudales reducidos pero no funcionan correctamente con un gran rango de variación. También provoca importantes alteraciones en el flujo, como ondas de choque que se trasladan aguas abajo al resto del canal de descarga. Su altura varía entre 0,1 y 1 m y el ángulo de salida entre 5° y 15°.
- Escalones: Su ejecución es sencilla cuando se incluyen en el diseño previo de la presa. Tienen capacidad de suministrar cantidades de aire elevadas cuando el caudal de descarga también lo es y producen menos perturbaciones sobre el flujo. Su altura varía entre 0,5 y 2 m.
- Ranuras: También son frecuentes en obras que ya han sido ejecutadas y el principal problema que presentan es para caudales pequeños, que puede anegar la

conducción si no dispone de un drenaje adecuado. La demanda de aire que aporta es pequeña y su profundidad varía entre 0,2 y 2 m.

En una misma rápida, es posible encontrar cualquiera de estos elementos combinados entre sí en función de los niveles medios del flujo y el caudal de descarga. Las figuras 9 y 10 muestran las diferentes tipologías y varios ejemplos de aireadores combinados.

Figura 9. Tipología básica de aireadores (Gutiérrez Serret, 1995)

Figura 10. Combinación de varios tipos de aireadores (Gutiérrez Serret, 1995)

De manera asociada a los dispositivos de aireación, es necesario disponer sobre los cajeros y la solera conductos de aducción de aire desde el exterior. En este caso, la geometría está más condicionada por el diseño y la situación de la presa, pero cuentan con elementos básicos comunes en todos los tipos (Falvey, 1990).

2.3.2.2. Mecanismos de aireación artificial

El proceso de aireación artificial comienza aguas arriba del aireador, con el trayecto de la lámina de agua que alcanza una determinada velocidad y el posterior despegue cuando pasa por encima del dispositivo. En esta sección se produce un incremento de la presión negativa, aumentando la turbulencia y generando una diferencia de presiones respecto a la atmosférica que hace que se produzca la succión de aire desde el conducto de suministro. Al vencer la tensión superficial del agua, el aire succionado es arrastrado con el agua, dando lugar a la aireación a través del contorno inferior del flujo. Al mismo tiempo, y de manera simultánea, también se produce aireación por arrastre de aire en la superficie externa de la

corriente, debido al incremento de turbulencia que eleva de manera abrupta la lámina de agua. Entre ambas superficies se mantiene una zona de la sección sin airear, pero que va reduciéndose progresivamente aguas abajo hasta que se unen en una sola mezcla. A los dos procesos se les denomina aireación por contorno (Gutiérrez Serret y Palma, 1995).

Otra forma de entrada de aire en el fluido por el empleo de este tipo de dispositivos y adicional a la aireación por contornos es la aireación por impacto y recirculación de aire en la cavidad. Cuando el flujo impacta sobre la solera tras el aireador, genera altas turbulencias y gradientes de presiones con una zona de remolinos fuertemente aireada, provocando dos efectos sobre el flujo. Por un lado, aparece un arrastre adicional de aire por el impacto (arrastre de impacto) y, por otro, se introduce parte en la cavidad (recirculación de aire). De forma paralela, una parte importante del aire arrastrado por el flujo es expulsado al exterior de la mezcla por el efecto del impacto sobre el aireador (desaireación por impacto). La figura 11 engloba de manera esquemática todas las fases de los mecanismos de aireación por aireadores.

Figura 11. Fases del mecanismo de aireación artificial con aireadores (Gutiérrez Serret y Palma, 1995)

2.3.2.3. Estructura del flujo por aireación artificial

En el caso de los aireadores, la estructura y la distribución de aire en la mezcla emulsionada tiene un enfoque fundamentalmente longitudinal y localizado en el entorno al dispositivo. Con este esquema, se pueden distinguir cinco zonas diferentes (Gutiérrez Serret y Palma, 1995): zona de aproximación, zona de transición, zona de aireación, zona de impacto y zona

de flujo aireado en el fondo. Cada tramo está asociado a unas condiciones características de presión y concentración, que aparecen definidas en la figura 12:

Figura 12. Estructura longitudinal del flujo en un aireador (a) y distribución de concentraciones y presiones en el fondo (b) (Gutiérrez Serret y Palma, 1995)

- Zona de aproximación: Se caracteriza porque la concentración en la solera es muy baja o nula, entre 6 y 8 %, y las condiciones del flujo (calado, velocidad, turbulencia, concentración de aire, etc) están determinadas por el tamaño y el funcionamiento del aireador.
- Zona de transición: Esta zona se inicia con el arranque de la rampa previa al aireador y desaparece si no existe en el dispositivo. Con el cambio dependiente, la presión del flujo aumenta con respecto a la hidrostática hasta llegar al borde de la rampa, donde descienden al entrar en el escalón hasta valores negativos. Esta sección también se caracteriza por el incremento del nivel de turbulencia.
- Zona de aireación: Este tramo comprende el espacio entre la sección donde el flujo se despega de la solera y donde impacta de nuevo con el fondo de la rápida. Se caracteriza por la formación de una cavidad bajo el flujo y el aire es arrastrado desde el contorno inferior y superior de la corriente (Q_a^{INF} y Q_a^{SUP}). También aparecen entradas de aireación local por el impacto de la lámina ($Q_a^{IMPACTO}$) y por la recirculación de aire en la cavidad (Q_a^{RECIR}). La presión en toda esta zona es

negativa por el efecto del despegue y permite generar la succión necesaria para extraer aire del aireador.

Analizando con más detalle esta área, se pueden distinguir a su vez otras dos subzonas. En primer lugar, la zona de aireación incompleta, situada en la parte aguas arriba y consta de un núcleo central de la lámina de agua sin aireación. A continuación aparece la zona de aireación completa, donde el aire se extiende a toda la sección del flujo. La figura 13 muestra con más detalle este tramo de la estructura general.

Figura 13. Detalle de la estructura de la zona de aireación (Gutiérrez Serret y Palma, 1995)

- Zona de impacto: Es la zona contigua a la de aireación y es donde se produce el choque del flujo contra la solera. Se caracteriza por el alto nivel de turbulencia y pérdida de energía.

En este tramo, la presión vuelve a ser superior a la atmosférica en todo el flujo, alcanzando los valores máximos de todo el proceso. Por el efecto del impacto, se produce una aireación local en el choque (Q_a^{IMPACTO}) y por los remolinos que se forman (Q_a^{RECIR}). También se genera una desaireación local en la parte superior del flujo (figura 14).

Figura 14. Detalle de la estructura de la zona de impacto (Gutiérrez Serret y Palma, 1995)

- Zona de flujo aireado en el fondo: Tras la zona de impacto, el flujo vuelve a un régimen de aireación natural, en condiciones de gradualmente variado. La longitud durante la que se mantiene esta situación aguas abajo depende de la efectividad de aporte del aireador y el caudal del flujo, que determina el calado de la lámina de agua. Tras este fenómeno, si la longitud de la rápida es lo suficientemente larga, se llegará al régimen de aireación uniforme.

2.4. Aireación en cuencos de resalto

El siguiente apartado incluye un análisis de los efectos de la aireación en cuencos de amortiguamiento y su influencia sobre el resalto hidráulico. A diferencia del apartado 1.3, sólo se estudiará la aireación natural en este tipo de dispositivos, tanto el mecanismo como la estructura de la mezcla.

Dada la alta turbulencia que se genera en el resalto, se produce un intercambio de aire muy elevado entre el fluido y la atmósfera de manera natural, lo que reduce la necesidad de una aportación extra mediante elementos de aireación artificial. Según algunos autores, se podría considerar aireadores los dientes y otras estructuras de disipación adicionales en el

cuenco, ya que rompen el flujo e incrementan la turbulencia, incluyendo de forma local aire en el resalto. Pero el objetivo de este tipo de elementos es reducir la longitud del resalto y facilitar su adaptación al cauce, por lo que su estudio no se ha enfocado hacia el balance de aire que generan.

2.4.1. Aireación natural en cuencos de resalto

El estudio de la aireación en resaltos hidráulicos se ha desarrollado casi en paralelo a las líneas de investigación sobre esta materia en rápidas y canales de descarga (apartado 1.3.1). Originalmente, las formulaciones tradicionales del calado conjugado en el resalto hidráulico se han obtenido considerando el balance de fuerzas en el volumen fluido que contiene el resalto (conservación de la cantidad de movimiento), considerando que el empuje hidrostático del agua y la impulsión en las secciones extremas del volumen de control se deben equilibrar con las fuerzas externas, que se suelen despreciar. De este modo, Bélanger (1841) propuso la siguiente fórmula:

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right) \quad [13]$$

donde y_1 es el calado de un flujo sin aireación a la entrada del resalto, Fr_1 es el número de Froude del flujo de entrada e y_2 el calado conjugado.

En los años 40 y 50 del siglo XX, autores como Douma (1940) y Jevdjovich (1953) comienzan a analizar el efecto de la aireación en cuencos de resalto en diversas presas norteamericanas que sufrido problemas de cavitación en su estructura. Estos estudios fueron en prototipo, y sus conclusiones se basan en el análisis visual del comportamiento del flujo con diferentes caudales y los resultados tras la fase experimental.

Ya en el año 1963, Rajaratnam plantea una formulación teórica del proceso de aireación en el resalto y se convierte en una referencia básica para estudios sucesivos sobre esta materia. En este artículo, el autor propone una ecuación del calado conjugado [14] alternativa a la de Bélanger [13] al considerar la fricción de los contornos y relacionarla con la aireación.

$$\left(\frac{y_2}{y_1} \right)^3 - (2 \cdot F_1 + 1 - I_f) \cdot \frac{y_2}{y_1} + 2 \cdot F_1^2 = 0 \quad [14]$$

siendo y_1 el calado de un flujo sin aireación a la entrada del resalto, Fr_1 el número de Froude del flujo de entrada, y_2 el calado conjugado e I_f la pendiente de fricción.

Posteriormente, destacan los trabajos de Herbrand (1969) y Hay (1975), que profundizan en los efectos de la entrada de aire en un resalto con los resultados de una análisis experimental.

En 1967, Rajaratnam propone una formula experimental para determinar la concentración máxima del resalto en función del número de Froude al inicio del resalto. Esta ecuación será modificada más adelante por Rao y Kobus (1975) y Hager en 1992, que incluirán nuevos factores para adaptarse los resultados de sus estudios en laboratorio e incluye una ecuación experimental [15] para determinar la concentración máxima (C_{max}) del resalto en función del número de Froude de entrada (Fr_1).

$$C_{max} = 2,55 \cdot (Fr_1 - 1,55); 2 < Fr_1 < 10 \quad [15]$$

En el año 2009, Chanson propone una fórmula del calado conjugado [16] despreciando los efectos de la fricción. En este caso, considera la aireación de un modo global y la incluye a través de un coeficiente que depende de la concentración:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{\beta_a}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right) \quad [16]$$

donde y_1 representa el calado equivalente de agua en un flujo emulsionado a la entrada del resalto, Fr_1 es el número de Froude del flujo de entrada, y_2 el calado conjugado y β_a un factor corrector dependiente de la concentración de aire en el flujo.

La mayoría de los casos de análisis en la literatura son experimentales, pero en los últimos años se ha desarrollado el uso de modelos matemáticos en este campo (Bayón-Barrachina, 2015; Chanson, 2013). También se ha ampliado el número de estudios con un número de Froude elevado ($Fr > 9$), como los ensayos experimentales desarrollados por Valero (2014) y Vallés-Morán (2015), que complementan con modelización numérica mediante técnicas CFD.

En este campo, Murzyn (2009) y Chanson (2009) advierten que determinados aspectos del resalto hidráulico se encuentran actualmente fuera de las capacidades de modelización matemática, tales como la mezcla de flujo, la rotura y coalescencia de burbujas, las interacciones turbulentas de la superficie libre de agua y los procesos de formación y rotura de olas. En este sentido, consideran que la información complementaria que aporta el análisis de estos fenómenos en modelización física sigue siendo necesaria.

2.4.1.1. Mecanismos de aireación natural

El mecanismo fundamental de aireación del resalto tiene carácter localizado y se inicia con una zona de remolinos como consecuencia de la elevada turbulencia. Al igual que en la aireación superficial, este efecto genera irregularidades superficiales que crean el balance de aire entre la atmósfera y el fluido. Adicionalmente a esta aireación, que se puede denominar propia del resalto o autoaireación (Gutiérrez Serret y Palma, 1995), existe una entrada suplementaria procedente del flujo de llegada en régimen supercrítico, que ya se encuentra aireado y añade mayor concentración al resalto. A esta entrada de aire se la conoce como aireación inducida y, junto a la anterior, son las que se desarrollan de manera más común en los aliviaderos de presas. La concentración máxima (C_{max}) se alcanza al comienzo del resalto, en la zona de remolinos, pero viene determinada por la aportación adicional del flujo de llegada y su nivel de aireación.

2.4.1.2. Estructura del resalto por aireación natural

La estructura de aireación en un resalto se caracteriza por sus parámetros característicos como longitud y calados y el balance de aire se limita a la zona de remolinos entre el inicio y el final del cambio de régimen (figura 15). El cálculo del calado conjugado de la mezcla emulsionada puede determinarse mediante la ecuación 15, resultante del principio de conservación de la cantidad de movimiento. En general, según la literatura existente, el calado conjugado se ve poco afectado por el efecto de la aireación, con incrementos inferiores al 10 % cuando la concentración de aire no supera el 35 % (Rajaratnam, 1967).

Figura 15. Fenómeno de autoaireación en un resalto hidráulico (Gutiérrez Serret y Palma, 1995)

donde h_1 es el calado de entrada al resalto, h_2 el calado conjugado de la mezcla emulsionada, H_1 es la energía al inicio del resalto, H_2 la energía al final, ΔH es la pérdida de energía producida en el resalto, L_r es la longitud de remolinos y L_R la longitud total del resalto.

2.5. Medidas de aireación en modelo físico y prototipo

Cuantificar la aireación en una estructura hidráulica ha sido objeto de estudio desde los años 40 del siglo XX y se ha desarrollado en paralelo al análisis del fenómeno. En el caso de la toma de datos, la definición de una metodología generalizada, la precisión de los resultados y la evolución en las técnicas de medida han estado determinadas por los avances en materia de instrumentación. Este apartado tiene como objeto mostrar las principales metodologías desarrollada por diversos autores para determinar la aireación en un flujo emulsionado.

En cuanto al parámetro que mejor caracteriza la aireación, existe un consenso generalizado en los ámbitos científico y técnico en tomar los valores de concentración local [5] y concentración media para caracterizar este fenómeno.

A continuación, se describen las diferentes técnicas desarrolladas de forma cronológica y se ha diferenciado entre mediciones y toma de datos de concentración en aireadores de rápidas (aireación artificial) y en flujos emulsionados en canales abiertos (aireación natural).

2.5.1. Medidas de concentración de aire en flujos con aireación artificial

La determinación de la capacidad de aportación de aire de un aireador resulta fundamental durante el diseño de un aliviadero. Los estudios sobre los efectos de los dispositivos de aireación comienzan en 1973 con los trabajos de Semenov y Lentjaev en el aliviadero de Bratsk (Unión Soviética), donde obtuvieron medidas de la concentración de aire en la zona posterior a la ubicación de los aireadores. Posteriormente, el INCYTH (1985) realizó el mismo experimento en la presa de Alicura (Argentina).

Durante la medida de estos valores en prototipo, un aspecto importante a tener en cuenta es la pendiente del canal de descarga. Esta variable influye en la medida de la concentración en el punto de toma y es preciso realizar trabajos de corrección en las medias de los resultados (Wood, 1991). Por ejemplo, en relación a los casos anteriores, el aliviadero de Bratsk, con una pendiente de 1,25 ($\tan \alpha$), la variación de la concentración en la vertical era del 0,5 %, mientras que en la presa de Alicura, donde la pendiente de la rápida no es superior a 0,35, los resultados de concentración en el eje no superaban variaciones de 0,26 %. Debido a la gran incertidumbre en las medidas en función de la pendiente de la base del canal, los

resultados obtenidos durante este tipo de experimentos sólo pueden ser considerados como estimaciones del orden de magnitud de la concentración.

Los estudios más completos desarrollados hasta el momento, incluidos el flujo de aire a través de los conductos laterales y la variación de presiones en la zona de salida del aireador, fueron los propuestos por Pinto en la presa de Foz do Areia (Brasil) en 1990 (Wood, 1991). En este trabajo se establece la demanda de aire a través de un parámetro adimensional (β') que depende de la geometría del aireador, el número de Froude y un valor relacionado con la presión en la salida del dispositivo.

$$\beta' = \frac{q_a}{q_w} = f \left(\text{geometría}, Fr, \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_w \cdot v} \right) \quad [17]$$

donde q_a y q_w son los caudales unitarios de aire y agua respectivamente, Fr es el número de Froude, Δp es la diferencias de presiones en la salida del aireador, ρ_w es la densidad del agua y v es la velocidad del fluido.

Con esta formulación y tras diferentes análisis, Pinto propuso una serie de curvas (figura 16) en función de la tipología y la geometría del aireador para determinar el valor de β' .

Figura 16. Distribución de curvas para aireadores en prototipo desarrollada por Pinto (Wood, 1991)

En cuanto a las medidas de concentración en aireadores durante la fase experimental en modelización física, la inclusión de estos dispositivos a escala ha sido muy común desde hace varias décadas, incluyendo en el modelo la geometría del aireador y una toma exterior para la entrada de aire.

Inicialmente, debido a la falta de equipos de medida precisos, sólo era posible certificar el funcionamiento del aireador de manera cualitativa durante los ensayos. En la actualidad, con las mejoras desarrolladas en el ámbito de la instrumentación, existen caudalímetros de aire con un diámetro suficiente que determinan la entrada de aire en régimen uniforme y caracterizan con mucho más detalle la idoneidad del aireador para el aliviadero proyectado. Durante este análisis, el grado de exactitud de la toma de datos depende en gran medida de la escala del modelo y su representatividad en otro tipo de semejanzas.

2.5.2. Medidas de concentración de aire en flujos con aireación natural

Desde el inicio del estudio del fenómeno de la aireación, diversos autores han intentado caracterizar de manera precisa el comportamiento del flujo emulsionado. Entre las variables fundamentales dentro de este análisis se encuentra la concentración, cuya medida ha sido objeto de diferentes experimentos desde los años 20 del siglo XX. El primer intento por definir la distribución de aire de forma experimental en un flujo en lámina libre fue desarrollado en Austria por Ehrenberger (1926).

Figura 17. Esquema del experimento para determinar la concentración de Ehrenberger (Lamb y Killen, 1950)

El ensayo se basaba en determinar la distribución vertical de velocidades en un canal en lámina libre y con pendiente variable (figura 17). La toma de datos se llevó a cabo mediante un tubo Pitot y, posteriormente, eran comparados con los resultados teóricos asociados a las condiciones del flujo y las características geométricas del canal. Durante el experimento se consideró que el aire tenía una densidad relativa similar al agua y una distribución lineal del campo de velocidades. La comparativa entre ambos resultados (experimental y teórico) permitía al autor establecer una relación para determinar la concentración del flujo en cada punto de la vertical. El principal problema de este planteamiento era la consideración lineal de la velocidad, que imponía un desarrollo similar a la concentración.

Posteriormente, en los años 40, el Laboratorio de Hidráulica de Saint Anthony Falls, vinculado a la Universidad de Minnesota, comienza a desarrollar una herramienta de medida para determinar con cierto rigor la concentración de aire en un flujo. Este dispositivo, denominado “Mechanical Sampler”, consistía en un tanque estanco al que llegaba una muestra del flujo y funcionaba como decantador, separando el caudal de agua del de aire de la muestra. Con estos dos valores es posible determinar la concentración [5] en el punto de toma. El esquema del dispositivo aparece detallado en la figura 18. Este método será desarrollado con más detalle en el capítulo de Materiales y metodología de esta tesis, ya que se ha utilizado un instrumento similar durante la fase experimental.

Figura 18. Esquema del dispositivo “Mechanical Sampler” para determinar la concentración (Lamb y Killen, 1950)

El principal problema de esta herramienta fue sus dimensiones físicas, que limitaban la precisión en determinados rangos de medida de la concentración, ya que la cámara de aire

se llenaba en muy poco tiempo para flujos con altas concentraciones. Otro problema añadido era que el tiempo de ensayo necesario para tener una medida correcta era de 30 minutos, lo que hacía imposible captar variaciones de concentración en intervalos cortos.

Considerando estas experiencias, Lamb y Killen (1950) desarrollaron en el mismo laboratorio un método eléctrico para determinar concentraciones en flujos emulsionados y consistía en una adaptación de una sonda cuyo uso en el ámbito de investigaciones biológicas estaba bastante extendido. Este método se basa en que la conductividad eléctrica de un fluido varía de manera directa con el volumen que tenga de partículas en suspensión. Si la resistividad de estos elementos es mayor o menor que la del flujo, la conductividad aumenta o disminuye. La aplicación de este fenómeno a las burbujas de aire en una mezcla es totalmente válido, ya que la conductividad también depende de otros parámetros como la forma y orientación de las partículas.

Con esta experiencia previa y considerando un flujo emulsionado como una suspensión de partículas esféricas y no conductivas en un líquido conductivo, se configuró una sonda para determinar el porcentaje de burbujas en un fluido y un circuito eléctrico para la interpretación y toma de datos durante el periodo de ensayo (figura 19).

Figura 19. Esquema de la sonda de conductividad y circuito de toma de datos de Lamb (Lamb y Killen, 1950)

El principal elemento de la sonda se encuentra en el punto de toma y consiste en dos puntas de plata que funcionan como electrodos. La distancia entre ambos filamentos está

determinada por el diámetro de burbujas que se desea medir, pero debe contar con un espacio mínimo para que no se generen meniscos que alteren la toma de datos. Cuando una partícula de aire pasa entre las dos puntas, la variación de conductividad se transforma en una señal que registrar el tránsito de una burbuja. Tratando los resultados y analizando todas las señales durante el periodo de ensayo, es posible separar entre partículas de agua y aire que circulan por el flujo y determinar la concentración local en función de la ecuación 5.

Esta metodología ha sufrido multitud de modificaciones y mejoras hasta la actualidad, entre las que destacan los trabajos de Jacobs (1997) en el Bureau of Reclamation. En este desarrollo se mejoran tanto el dispositivo de medida como el circuito de toma de datos, alcanzando frecuencias de entre 50 y 100 datos por segundo. El funcionamiento de esta nueva sonda es similar al anterior, detectando partículas de aire en el flujo por cambios de conductividad, pero en este caso cuenta con un sólo electrodo en la toma (figura 20).

Figura 20. Esquema de la sonda de conductividad de Jacobs (Jacobs, 1997)

Este esquema ha sido utilizado también como dispositivo de medida de concentración durante los ensayos realizados en esta tesis y serán desarrollados en profundidad en el capítulo sobre Materiales y metodología. En base al esquema inicial de la sonda de conductividad, otros autores han modificado la estructura del dispositivo para medir de manera conjunta concentración y velocidad en el flujo (Cain y Wood, 1981; Matos, 2002;

Chanson. 2008). En este desarrollo se incorpora en la sonda un sensor para la toma de presiones, que permite determinar la velocidad del flujo emulsionado.

En los últimos años, con los nuevos avances en transferencia de señales con fibra óptica, han aparecido diferentes dispositivos para determinar la concentración de aire en una mezcla tomando como base este esquema (Xiangyang, 2012). Un sistema de sensor óptico consta de una fuente de energía (láser, LED, etc), fibra óptica, un modulador de señal para traducir la medida a una señal óptica, un sensor (detector óptico) y un dispositivo de tratamiento de señales electrónico (osciloscopio, analizador del espectro óptico, etc) (figura 21).

Figura 21. Esquema de un sistema de medida con sensor óptico (Xiangyang, 2012)

Cuando flujo interacciona con la fuente de luz, dependiendo de si se trata de una partícula de agua o aire, emite una señal al sensor de la fibra óptica que permite discernir entre ambos elementos (figura 22). El registro de datos y la traducción de la señal difiere muy poco de los dispositivos anteriores (conductividad), pero la fibra permite frecuencias mucho mayores.

Figura 22. Ejemplo de sensor óptico (Xiangyang, 2012)

El último método de medida de concentración descrito en este capítulo es el procesamiento digital de imágenes, que recientemente ha experimentado un gran avance con los desarrollos de nuevas tipologías de cámara de alta velocidad y sistemas de tratamiento de señales. Según Vaideliené y Tervydis (2012), con la fotografía de la emulsión se puede discretizar las partículas de aire (burbujas) de las del fluido analizando la imagen en una escala de grises, donde las burbujas tienen una definición más oscura que el agua. Analizando el pixelado mediante una representación binaria de grises y considerando que el valor 0 corresponde al negro (aire) y el 255 al blanco (agua), es posible seleccionar mediante un cribado aquellos pixeles que se encuentran por debajo de 145 (figura 23). El conjunto de elementos resultantes corresponde a la fracción de aire con respecto a la de agua, por lo que el valor de la concentración media (C_m) viene definida por la siguiente ecuación:

$$C_m = \frac{N_b}{N_w + N_b} \quad [18]$$

donde N_b es el número de pixeles en negro (< 145) y N_w el de pixeles en blanco (> 145).

Figura 23. Tratamiento en escala de grises de un flujo emulsionado (Vaideliené 2012)

Otros autores, como Bung (2011), Leandro (2014) y Bung y Valero (2016) han aplicado este método de tratamiento de imágenes para estimar la velocidad de un flujo emulsionado a

alta velocidad. En estos casos se han utilizado técnicas BIV (Bubble Image Velocimetry), donde se usan las burbujas como trazadores con la correlación de imágenes en alta velocidad y apoyados por iluminación laser. La combinación de ambos métodos también ha sido utilizada durante los trabajos experimentales de esta tesis y serán desarrollados con más detalle, al igual que el resto de técnicas para determinar la concentración, en el capítulo sobre Materiales y metodología.

2.6. Efectos de la aireación sobre mecanismos de disipación de energía en rápidas y cuencos de resalto

Uno de los principales efectos que tiene la aireación sobre un flujo es la alteración de los fenómenos de disipación de energía, que se puede analizar desde diferentes puntos de vista. En primer lugar, Hinze y Milborn plantearon en 1950 que un incremento de la concentración de aire en el flujo altera los mecanismos de disipación turbulenta (disipación por viscosidad turbulenta) y propuso una formulación teórica para evaluar los efectos disipativos de la aireación pero sin justificación ni estudios experimentales previos.

Otros autores como Wood (1983), Mateos (1991) y Chanson (1992) consideran el efecto de la división y reagrupamiento de las burbujas es el principal mecanismo de disipación en una mezcla emulsionada (disipación por rotura y reagrupamiento de las burbujas). Según este esquema, la diferencia de tensión tangencial en el flujo a diferentes capas produce efectos de cizallamiento que rompen las burbujas, para volver a reagruparse en zonas de choque. En este proceso se debe vencer la tensión superficial de las burbujas, lo que produce una disipación de energía (paso a calor). A igualdad de contenido de aire en el flujo medio, mientras más pequeñas sean las burbujas, mayor será la superficie de las mismas y la tensión superficial que habrá que superar para dividir las, dando como resultado una mayor disipación de energía.

Ambas formulaciones tienen un peso importante en fenómenos como el resalto hidráulico, donde los efectos de la turbulencia influyen en gran medida sobre el comportamiento del flujo. En rápidas en régimen supercrítico, con niveles de lámina de poca entidad debido a la velocidad, el efecto predominante sobre la disipación de energía es la fricción (disipación por fricción), cuyo análisis tienen gran interés para conocer la velocidad de entrega al final de la misma y dimensionar la estructura de disipación necesaria.

En la literatura técnica se mencionan diferentes mecanismos que influyen en la disipación de energía en las rápidas, siendo el primero de ellos el frenado por fricción con el contorno.

Existen múltiples expresiones para cuantificar este efecto, pero la más extendida en el campo de la ingeniería hidráulica es la fórmula de Manning (1891), que expresa la pendiente de fricción en función del coeficiente n [19]. Aunque esta formulación no es dimensionalmente correcta tiene la ventaja de disponer de múltiples estudios experimentales que permiten caracterizar la fricción con bastante exactitud.

$$I_f = \frac{n^2 \cdot v^2}{R_h^{4/3}} \quad [19]$$

donde I_f es la pendiente de fricción, n el coeficiente de Manning, v es la velocidad del flujo y R_h el radio hidráulico.

El primer efecto de la aireación es el emulsionado del flujo y, por lo tanto, el aumento del calado emulsionado. Si se considera el valor de n y caudal constantes, esto se traduce en una reducción de la pendiente de fricción y en un aumento de la velocidad (v) del flujo. Bajo estas condiciones, el calado debe ser menor al que tendría si el flujo no estuviera emulsionado, por lo que la tensión en el fondo se reduce de acuerdo a la expresión:

$$\tau_f = \gamma_w \cdot R_h \cdot I_f \quad [20]$$

considerando a τ_f como la tensión en el fondo y γ_w el peso específico del agua.

Este mecanismo de disipación ha sido el que se ha utilizado para caracterizar los efectos de la aireación en el desarrollo de esta tesis durante el análisis del flujo en la rápida. En este caso, las características del prototipo experimental cumplen todos los condicionantes para esta elección, ya que se alcanzan unas condiciones de flujo supercrítico y altamente turbulento.

3. MATERIALES Y MÉTODOLOGÍA

Tras analizar el estado del arte (capítulo 2) se ha puesto de manifiesto que, para caracterizar de manera adecuada el efecto de la aireación en un fluido y evaluar su comportamiento, es necesario considerar una serie de factores como el diseño de la estructura de descarga y del resalto, el control de los caudales de agua y aire que definen la mezcla emulsionada, el tipo de instrumentación, las variables que definen el comportamiento del flujo, etc.

Los objetivos de este trabajo son de diferente naturaleza y, por este motivo, los métodos asociados a cada uno de ellos también deben serlos. Algunos objetivos son de carácter experimental, como diseñar una instalación para generar un flujo con aireación totalmente desarrollada, con las limitaciones de espacio y equipamiento que ello conlleva. Otros tienen un enfoque metodológico, como la selección de procedimiento más adecuado para medir las variables características durante la fase de ensayos. Por último, un bloque de perfil analítico y orientado a caracterizar el comportamiento del flujo en función a los resultados obtenidos y del estado del arte existente.

Este capítulo describe la infraestructura que se ha utilizado y la metodología desarrollada para alcanzar los dos primeros objetivos propuestos en esta tesis, que se resumen en los siguientes apartados:

- Diseño y construcción de una instalación experimental adecuada para reproducir un flujo en régimen supercrítico y con turbulencia totalmente desarrollada en una rápida de descarga y en un cuenco de resalto.
- Selección de los equipos de alimentación y control necesarios para desarrollar un flujo con una estructura de aireación totalmente desarrollada durante la fase experimental. También se han definido las condiciones iniciales y de contorno necesarias para asegurar el rigor del proceso de toma de datos.
- Definición de la metodología más adecuada para determinar las velocidades del flujo en la rápida y en el resalto hidráulico.
- Desarrollo y diseño de una metodología para caracterizar la concentración del flujo en la rápida.
- Selección de la instrumentación más adecuada para definir el campo de presiones y los niveles del resalto hidráulico en el cuenco.

3.1. Definición y diseño de la instalación experimental

Para reproducir las condiciones de flujo necesarias en la fase de ensayos, se ha diseñado y construido un dispositivo experimental de una rápida de descarga y un cuenco de resalto en el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, aprovechando unas instalaciones existentes para el estudio de aliviaderos escalonado. Esta estructura cuenta con un canal de sección rectangular de 0,5 m de ancho por 0,67 m de cajero, una altura de total de 6,5 m desde el arranque de la sección y una pendiente de 0,75 (H):1 (V).

A continuación, le sigue un cuenco de resalto totalmente horizontal con el mismo ancho y una altura de cajero de 2m. Este canal tiene una longitud de 9,73 m hasta la compuerta de salida, que sirve de sistema de regulación para definir el nivel en el resalto y permite el desagüe del caudal procedente de la alimentación al depósito principal de la instalación por un canal paralelo. La figura 24 muestra el esquema de la sección longitudinal de la estructura con los principales elementos desde el arranque de la rápida hasta la salida del canal de resalto.

Figura 24. Perfil longitudinal del dispositivo experimental

Tanto en el canal de descarga como en el cuenco de resalto, el material de la solera y de los cajeros es PVC transparente con 2 cm de espesor, apoyado sobre una estructura metálica que sustenta el dispositivo. En el canal de resalto, los cajeros laterales se han reforzado con un emparrillado de perfiles metálicos IPE80 cada 0,5 m en sentido longitudinal y 0,6 en la vertical (perfiles T50) para rigidizar los contornos. El objeto de esta malla es reducir las vibraciones procedentes del resalto durante los ensayos y evitar al máximo alteraciones en las medidas. Estos refuerzos también se han dispuestos en el canal de descarga, pero con una distancia mayor y sólo en sentido longitudinal ya que se esperan menores vibraciones

durante el funcionamiento de esta parte del dispositivo. La figura 25 incluye la planta de la estructura desde la sección de entrada de caudales.

Figura 25. Planta del dispositivo experimental

También se han incluido rigidizadores (perfiles U40X35) en la parte superior del cuenco para asegurar la anchura constante de la sección hasta la compuerta de desagüe, que se ha construido con material de fábrica. La figura 26 incluye la sección transversal de todos estos elementos en el canal de resalto.

Figura 26. Sección transversal del cuenco de resalto y del canal de retorno

A continuación, las siguientes fotografías muestran una vista general del modelo físico desde diferentes ángulos y detalles de la estructura y los materiales de construcción.

Fotografía 10. Vista lateral y superior de la rápida y el cuenco de resalto

Fotografía 11. Vista lateral de la rápida y el cuenco de resalto

Fotografía 12. Vista superior del cuenco de resalto y del canal de retorno

Fotografía 13. Vista lateral y funcionamiento de la entrada en la rápida

Para evitar un impacto brusco del flujo en el cambio de pendiente de la rápida al cuenco, se ha incorporado una pieza de transición circular de radio 0,7 m en esta sección (fotografías 14 y 15). El objetivo de este elemento es que el caudal procedente del canal de descarga se adapte al cuenco sin alteraciones que podrían condicionar el comportamiento del resalto.

Fotografía 14. Efecto del flujo en la entrada del cuenco sin pieza de transición

Fotografía 15. Instalación de la pieza de transición y comportamiento del flujo

Otro de los aspectos que se han considerado en la fase de diseño ha sido la definición de las condiciones iniciales y de contorno que se impondrán en el modelo durante los ensayos, donde será necesario fijar unos niveles en la entrada de la rápida y en la salida del cuenco.

La primera de ellas se lleva a cabo mediante una boquilla abatible que regula el calado de entrada al dispositivo en un rango entre 2 y 20 cm, lo que permite establecer una velocidad inicial en cada ensayo en función del caudal impuesto (fotografías 16 y 17).

Fotografía 16. Cajón de entrada a la rápida

Fotografía 17. Boquilla abatible para fijar niveles en la entrada de la rápida

Esta pieza consta de un cajón metálico de 0,5 m de anchura con una chapa superior que bascula sobre una rosca en el extremo inferior, lo que permite variar con facilidad el calado del flujo de salida. También cuenta con dos tornillos rigidizadores a ambos lados de la manivela que fijan la tapa y mantienen un nivel constante (figuras 27 y 28).

Para evitar pérdidas de caudal en los márgenes de la chapa y alterar el flujo, se han incluido gomas de estanqueidad en los laterales que aíslan toda la superficie del cajón. También se ha colocado una lámina de neopreno flexible de 20 cm de longitud y 5 mm de espesor a continuación de la tapa superior, con el objeto de propiciar una entrada laminada del flujo en el canal de descarga y evitar los efectos de expansión a la salida de la boquilla.

Figura 27. Vista isométrica del cajón de entrada a la rápida y boquilla abatible

Figura 28. Perfil longitudinal del cajón de entrada a la rápida y boquilla abatible

La segunda condición en el modelo físico se impondrá en la salida del cuenco, donde se ha colocado una compuerta vertical con cierres de diferentes alturas para fijar la longitud del resalto y el calado conjugando en cada ensayo. La fotografía 18 muestra la compuerta, que se manipula a través de un tornillo sin fin y una manivela en la parte superior.

Fotografía 18. Compuerta de salida del cuenco de resalto

En las primeras campañas para ajustar el funcionamiento del modelo físico se comprobó que las velocidades en la salida del canal de descarga resultaban excesivas, proporcionando números de Froude superiores a 12. Para establecer unas condiciones al pie de la rápida con números de Froude entre 6 y 8, se ha colocado a lo largo del canal y en la parte superior una malla metálica flexible con objeto de reducir velocidad.

Previamente a la sección de entrada en la rápida, los caudales de agua y aire se han mezclado con dosificaciones conocidas dando lugar al flujo emulsionado (aireación forzada), por lo que se puede determinar su concentración inicial. Uno de los objetivos para tener unas condiciones de experimentación adecuadas es mantener esta concentración lo más estable posible a lo largo de la rápida, por lo que también se ha colocado sobre la malla una capa flexible de plástico para evitar el intercambio de aire entre el flujo y la atmósfera. Ambas capas, que se extienden en toda la superficie de la rápida hasta la llegada al cuenco, son flexibles y se adaptan al caudal circulante, por lo que se reduce notablemente su afección sobre el calado. Las fotografías 19, 20 y 21 reflejan la disposición de esta condición durante los ensayos.

Fotografía 19. Vista superior de la rápida en funcionamiento con malla metálica y cubierta de plástico

Fotografía 20. Vista lateral de la rápida en funcionamiento con malla metálica y cubierta de plástico

Fotografía 21. Detalle del efecto de la malla sobre el flujo emulsionado

3.2. Equipos de alimentación y sistemas de control

Para el desarrollo de los ensayos, ha sido fundamental la definición previa de los equipos de alimentación y control de caudales de agua y aire. La combinación de ambos flujos en condiciones adecuadas generará la mezcla emulsionada cuyo comportamiento se analizará en la fase experimental.

A partir de las instalaciones propias del Laboratorio de Hidráulica, se han incluido dos equipos de bombeo separados, uno para agua y otro para aire, junto a la instrumentación necesaria para aforar ambos caudales. También se ha incluido en la instalación un dispositivo mezclador previo a la entrada del modelo para generar una mezcla homogénea con una concentración inicial definida. En primer lugar, la bomba toma el agua de un depósito elevado a nivel constante de 6 m de altura, lo que proporciona una carga adicional a su capacidad de impulsión (fotografías 22).

Fotografía 22. Depósito elevado a nivel constante

Se trata de un equipo con rotor de eje horizontal que funciona a 960 rpm y cuenta con una potencia 31,5 KW (fotografías 23). El caudal máximo de impulsión es de 300 l/s ($18 \text{ m}^3/\text{min}$ para una altura de 10 m), aunque realmente es superior por la carga suplementaria que aporta la elevación del aforador, que incorpora 6 m adicionales al sistema. En conjunto, la carga total que habrá en la entrada del modelo alcanzará los 16 m, valor de referencia para extrapolar los resultados mediante análisis dimensional a prototipos reales.

Fotografía 23. Bomba de impulsión de agua

El sistema general de alimentación cuenta además con otros elementos adicionales en la conexión entre el depósito y la entrada del modelo. Las figuras 29 y 30 y a la fotografía 24, muestran todas las piezas y uniones que aseguran la alimentación del dispositivo.

Figura 29. Planta del esquema de alimentación de caudal de agua del dispositivo experimental

Figura 30. Sección del esquema de alimentación de caudal de agua del dispositivo experimental

Fotografía 24. Sistema de impulsión del caudal de agua y circuito de alimentación

En la fotografía anterior también se incluye el caudalímetro que se ha utilizado para definir los caudales de agua en los escenarios analizados. En concreto, se trata de un caudalímetro de ultrasonido ABB de 350 mm de diámetro nominal que se adapta a las dimensiones de la tubería de alimentación del modelo y cuenta con un límite inferior de medida de 150 l/s.

Los medidores electromagnéticos son idóneos para medir el caudal de cualquier líquido que tenga una mínima conductividad eléctrica específica y no tienen pérdida de carga adicional. El funcionamiento de este dispositivo se basa en las leyes de inducción de Faraday, que genera en el flujo conductor una tensión cuando se mueve dentro de un campo magnético en dirección perpendicular [21].

$$U_E \sim B \cdot D \cdot v \quad [21]$$

La tensión que se induce en el fluido se mide por medio de dos electrodos situados diametralmente opuestos entre si. Esta señal de tensión (U_E) es proporcional a la inducción magnética (B), a la separación entre electrodos (D) y a la velocidad media de caudal v . Puesto que la inducción magnética y la distancia entre electrodos son constantes, existe una proporcionalidad entre la señal de tensión y la velocidad media de caudal (figura 31). Un sistema electromagnético de medida de caudal consta de un primario de medida y un convertidor. El primario de medida va instalado en la tubería y el convertidor puede montarse localmente o en una ubicación central. En el diseño compacto, como es en este caso, el primario de medida y el convertidor forman una única entidad. La lectura instantánea del caudalímetro está vinculada a un display en la zona de control que permite, mediante una válvula de regulación, ajustar los caudales de ensayo (ABB).

Figura 31. Esquema de un medido electromagnético de caudal (ABB)

Para la alimentación del caudal de aire, la instalación se ha dotado de un compresor de tipo coaxial con presión de salida de 8 bares y un depósito acumulador de 500 l (fotografía 25).

Este equipo permite una aportación continua de hasta 2000 l/min y consta de una válvula de apertura manual en la salida.

Fotografía 25. Compresor de aire y depósito acumulador

Además del control del caudal líquido, los ensayos previstos requieren la regulación, control y medida del caudal de aire que se introduce en el mezclador, así como de la presión a la que se incorpora. Las condiciones óptimas de entrada de aire al dispositivo de mezcla deben estar en un rango entre 1 y 1,5 bares, por lo que es necesario en el sistema de aportación un regulador para reducir la presión de salida del compresor (8 bares). Para complementar este dispositivo, se ha acoplado un manómetro digital que controla la presión real en la instalación tras el regulador y una válvula de tipo esférico (fotografía 26).

Fotografía 26. Regulador de presión con válvula de tornillo y manómetro digital

Una vez aplicadas estas condiciones, se ha instalado a continuación un caudalímetro de aire para la medida final del caudal que se incorpora al modelo y un filtro de protección de partículas superiores de 10 micras (fotografía 27). El registro de este caudal será el utilizado para determinar la concentración inicial del flujo de salida durante los ensayos en la fase experimental.

Fotografía 27. Caudalímetro de aire de entrada al mezclador

Por último, las figuras 32 y 33 también incluyen el esquema de alimentación diseñado para la entrada de caudal de aire en la instalación con cada uno de sus elementos.

Figura 32. Planta del esquema de alimentación de caudal de aire del dispositivo experimental

Figura 33. Sección del esquema de alimentación de caudal de aire del dispositivo experimental

Con la regulación y el control de ambos caudales, el último elemento previo a la entrada del flujo en la rápida es el mezclador, donde se conforma la emulsión que se introducirá en el modelo. Este dispositivo consta de un carrete de transición circular, con un diámetro inicial de 350 mm para que se incorpore la tubería con caudal líquido, a una sección rectangular de 0,5 m de ancho por 0,19 de alto, para adaptarse a la rápida de la instalación.

La entrada de aire al mezclador se realizará a través de cuatro puntos separados entre sí 90°, uno a cada lado del dispositivo de mezcla. En cada entrada se ha incorporado una válvula antirretorno, para evitar que el agua circule por la instalación de aire si la presión en su tubería es mayor en algún momento. El final de esta pieza consta de un tramo curvo para tomar la alineación y la pendiente del canal de descarga (0,75 (H): 1 (V)), seguida de la boquilla para regular el calado de entrada.

La fotografía 28 y la figura 34 incluyen el esquema de diseño del mezclador y el dispositivo final que se ha incorporado al modelo físico. La fotografía 29 muestra el detalle de los puntos de entrada para ambos caudales, donde se aprecia las válvulas antirretorno en la aportación de aire y el codo de la tubería de 350 mm para la entrada del caudal de agua.

Fotografía 28. Vista general del mezclador en el modelo físico

Figura 34. Sección longitudinal del mezclador del dispositivo experimental

Fotografía 29. Detalle de la entrada de los caudales de agua y aire al mezclador

Por último, el mezclador cuenta con un sensor de presiones en la base inferior que tiene por objeto registrar la carga en el interior del dispositivo (fotografía 30), tanto en condiciones atmosféricas como en las asociadas a cada uno de los ensayos. Estos resultados son necesarios para determinar el efecto de la descompresión del flujo en la paso de unas condiciones de presión a lámina libre, y así poder ajustar el valor real de la velocidad en la sección de salida en cada escenario. El tratamiento de los resultados para ajustar este efecto será desarrollado en el capítulo 4 (Resultados).

Fotografía 30. Sensor para el registro de presiones en el mezclador

3.3. Equipos de instrumentación para la toma de velocidades

El objetivo de este apartado es describir y caracterizar los diferentes métodos que se han empleado durante la fase experimental para determinar la velocidad del flujo emulsionado. La clasificación de los equipos de medida se ha realizado según la sección donde se realiza la toma, en la rápida o en el cuenco de resalto. Esta división tiene carácter funcional ya que, dependiendo del fenómeno a analizar, se aplicarán metodologías diferentes.

3.3.1. Medidas de velocidad en la rápida

Dadas las características de los ensayos y las velocidades que se pueden alcanzar en la rápida, entre 2 y 20 m/s en función del caudal y de la apertura de la boquilla de entrada, se ha optado por un tubo Pitot para determinar el campo de velocidades en la salida del canal

de descarga. En realidad, se trata de un tubo de toma de 3 cm de diámetro con una boquilla de entrada circular de 1 cm y conectado a un captor de presiones en la parte superior. Con este sensor se pretende determinar la carga en el punto de toma y, de este modo, la velocidad del flujo emulsionado. Las fotografías 31 y 32 muestran el dispositivo y el esquema de funcionamiento del tubo, que se ha ido modificando durante la fase que ha durado el análisis hasta alcanzar un funcionamiento óptimo.

Fotografía 31. Diferentes vistas del tubo Pitot conectado al sensor de presiones

Fotografía 32. Funcionamiento del dispositivo de medida durante los ensayos

El captor, que se denomina sensor piezorresistivo, mide presiones relativas en metros de columna de agua y está vinculado a un equipo de registro que almacena los resultados con

una frecuencia de 10 Hz (fotografía 33). El sensor piezorresistivo está en contacto con un fluido de protección y separado del agua por de una membrana de acero inoxidable. La flexión de la membrana por la presión externa produce un cambio en la presión del fluido que rodea el sensor y emite una señal proporcional, que se convierte en una salida de 4-20 mA. Este método de medición es muy adecuado para detectar bajas presiones y se analizará con más detalle en el apartado 3.4 (Equipos de instrumentación para la toma de presiones). La conexión entre el sensor y el ordenador se ha realizado con un programa en LabVIEW desarrollado por el Laboratorio de Hidráulica, que permite una transferencia de alto rendimiento (tiempo real) de los resultados de presión y automatizar el proceso.

Fotografía 33. Sensor de presión utilizado y equipo de registro

Con la media de las presiones obtenidos por el captor (h_m) durante el periodo de análisis, la diferencia de altura entre la boquilla del tubo y el sensor ($h_c = 0,345$ m), que se ha mantenido constante en todos los escenarios, y la presión atmosférica relativa tomada en cada ensayo (h_{atmr}), es posible determinar la velocidad puntual del flujo mediante la ecuación:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_T} \quad [22]$$

Donde el término g representa la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$) y h_T es la suma de las tres cargas descritas anteriormente.

$$h_T = h_m + h_c - h_{atmr} \quad [23]$$

El perfil de velocidades en cada escenario se ha obtenido variando la elevación de la boquilla del dispositivo a lo largo de la vertical y siempre sobre el eje del canal. La profundidad de los

puntos de medida ha variado entre 1,6 y 14,5 cm desde la solera, que es el mayor calado reproducido en los ensayos. El tratamiento de los datos y los resultados finales se describen con detalle en el capítulo de Resultados de esta tesis.

3.3.2. Medidas de velocidad en el cuenco de resalto

El método seleccionado para determinar las velocidades en el resalto hidráulico ha sido la sonda ADV (Acoustic Doppler Velocimeter), que se basa en el efecto Doppler que genera la emisión de ultrasonidos y el rebote de la señal sobre las partículas en suspensión del fluido en movimiento.

Este dispositivo ha sido desarrollado por la empresa noruega Nortek y permite obtener las tres componentes de la velocidad en una frecuencia de 25 Hz. El sistema cuenta con tres componentes fundamentales: el sensor, el módulo de acondicionamiento y el módulo de procesado (figura 35).

Figura 35. Esquema de funcionamiento de la sonda Nortek ADV (Fernández López, 2013)

- La sonda es la encargada de emitir la señal de ultrasonidos a través de un emisor de 10 MHz rodeado de tres patas, cada una de 2,9 cm y dispuestas en un mismo plano formando 120° entre ellas (figura 36). Al final de estas mismas patas se han

colocado tres receptores, que son los encargados de recibir de nuevo el pulso. El sensor está montado sobre una varilla de 40 cm de longitud y unida en el otro extremo al módulo de acondicionamiento.

Figura 36. Esquema del sensor de la sonda Nortek ADV (Fernández López, 2013)

- El módulo de acondicionamiento está constituido por un conjunto de circuitos eléctricos que ajustan las señales emitida y absorbida a unos parámetros de conversión para su análisis en el módulo de procesamiento, al que se conecta con cable apantallado.
- El módulo de procesado de la señal cuenta con un procesador DSP (Digital Signal Processor) implementado en una tarjeta bus ISA de 16 bits y que se monta en un PC asociado.

El funcionamiento general de la sonda consiste en la emisión por parte del sensor de una señal acústica de ultrasonido a 10 MHz y la posterior recepción del eco debido al efecto Doppler, cuya frecuencia ha sido modificada por la velocidad relativa de las partículas en suspensión con respecto al conjunto emisor-receptor (V). Al contar con una frecuencia tan alta, el pulso emitido es aproximadamente unidireccional y establece el punto de toma de resultados a 5 cm de la posición del emisor (figura 37).

La velocidad de la partícula que interviene en la transformación de la frecuencia es relativa a la bisectriz entre el transmisor y el receptor, por lo que analizando la alteración en cada receptor es posible determinar las tres componentes de velocidad respecto al sistema en los ejes definidos por los receptores.

Figura 37. Funcionamiento del efecto Doppler en la sonda Nortek ADV (Fernández López, 2013)

El Laboratorio de Hidráulica del CEDEX dispone de una sonda Nortek que se ha empleado en la toma de velocidades para caracterizar el resalto hidráulico. Estas medidas se han tomado sobre el eje del canal y se ha construido un bastidor para ubicar la sonda en diferentes puntos del cuenco. La estructura de apoyo también cuenta con un mecanismo que permite desplazar la sonda sobre la vertical, con el objeto de determinar el campo de velocidades en todo el perfil (fotografías 34 y 35).

Fotografía 34. Funcionamiento de la sonda ADV y equipo de registro durante los ensayos

Fotografía 35. Funcionamiento de la sonda ADV en el canal del resalto

Este método se ha descartado para determinar las velocidades en la rápida ya que en la mayoría de los escenarios generan un campo con valores superiores al rango de medida de la sonda, comprendido entre 0,5 y 2,5 m/s. Por otra parte, el efecto de la pendiente podría alterar los resultados al modificar la dirección del pulso tanto en la emisión como en la recepción de la señal.

3.4. Equipos de instrumentación para la toma de presiones

A parte de análisis puntuales, como en la base del mezclador (apartado 2.2) y en la toma de velocidades en la rápida (subapartado 2.3.1), el estudio y la selección de una metodología para determinar las presiones se ha centrado en el cuenco.

3.4.1. Medidas de presión en el cuenco de resalto

El objetivo de determinar las presiones a lo largo del cuenco es caracterizar la evolución de los calados para cada uno de los escenarios. Al igual que en los estudios anteriores, se ha seleccionado como método de medida el sensor piezorresistivo, cuyo funcionamiento se basa en los cambios de resistividad de ciertos materiales semiconductores cuando estos se someten a una tensión mecánica para generar una corriente eléctrica. Este fenómeno cuenta con que los materiales tienden a sufrir cambios en sus características de resistencia latentes cuando se flexionan por la exposición a la presión, lo que provoca un cambio en

cualquier corriente eléctrica que pasa por el dispositivo. Este efecto se traduce en una medición o lectura de la presión.

El sistema de detección de un captor de presiones de este tipo es un diafragma formado sobre un sustrato de silicio y que se dobla con la presión aplicada (figura 38). La deformación que se produce en la red cristalina de la membrana por la flexión, provoca un cambio en la estructura de los piezoresistores que se colocan en el diafragma y cambia la resistividad del material o capacidad básica para oponerse a la corriente eléctrica. Este cambio puede ser un aumento o una disminución de acuerdo con la orientación de las resistencias. Los materiales que componen esta red interna son semiconductores que cambia su resistividad cuando se exponen a esfuerzos mecánicos y suele utilizarse el germanio y el silicio.

La corriente que genera la deformación se emite en una salida de 4-20 mA para evitar alteraciones de la señal y es enviada al traductor. Este equipo cuenta con un programa de que ha sido desarrollado con LabVIEW en el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX y permite recoger series de datos en metros de columna de agua con una frecuencia de 10 Hz.

Figura 38. Esquema de funcionamiento de captor piezorresistente (Bürkert Ibérica SAU)

El esquema diseñado para este análisis consta de 10 captadores de medida relativa, todos ellos colocados a distancias variables en la base y sobre el eje del canal de resalto (fotografía 36). La figura 39 representa la disposición final y la localización de los sensores en el cuenco. El

primer punto (captor P0) coincide con la sección de entrada al canal y no cuenta con piezómetro, pero se ha determinado el calado con la información de salida de la rápida.

Fotografía 36. Captor de presión instalado en la base del canal de resalto

Figura 39. Distribución de captores de presión en el canal de resalto

Cada captor consta de una recta con pendiente lineal de fábrica que permite vincular el voltaje del piezoresistor con el valor de la presión asociada en metros de columna de agua. Las siguientes figuras y la tabla 1 muestran cada una de las diez rectas de los sensores del cuenco, además de los captores que se han colocado en la base del mezclador y en el extremo del tubo Pitot para la toma de velocidades.

Figura 40. Recta de calibración del sensor P1

Figura 41. Recta de calibración del sensor P2

Figura 42. Recta de calibración del sensor P3

Figura 43. Recta de calibración del sensor P4

Figura 44. Recta de calibración del sensor P5

Figura 45. Recta de calibración del sensor P6

Figura 46. Recta de calibración del sensor P7

Figura 47. Recta de calibración del sensor P8

Figura 48. Recta de calibración del sensor P9

Figura 49. Recta de calibración del sensor P10

Figura 50. Recta de calibración del sensor ubicado bajo el mezclador

Figura 51. Recta de calibración del sensor del tubo Pitot

Sensor de presión	Punto 1		Punto 2		Ecuación recta
	x	y	x	y	
Sensor P1	1,09	-1,00	5,09	5,00	$y = 1,4985x - 2,6312$
Sensor P2	1,06	-1,00	5,00	5,00	$y = 1,4940x - 2,6145$
Sensor P3	1,07	-1,00	5,01	5,00	$y = 1,5059x - 2,6352$
Sensor P4	1,09	-1,00	5,02	5,00	$y = 1,5260x - 2,6704$
Sensor P5	1,07	-1,00	5,01	5,00	$y = 1,5072x - 2,6376$
Sensor P6	1,09	0,01	5,01	5,00	$y = 1,3848x - 1,3848$
Sensor P7	1,08	0,00	5,01	5,00	$y = 1,3748x - 1,3748$
Sensor P8	1,09	0,00	5,03	5,00	$y = 1,3939x - 1,3940$
Sensor P9	1,07	0,00	5,00	5,00	$y = 1,3577x - 1,3577$
Sensor P10	1,05	0,00	4,95	5,00	$y = 1,3469x - 1,3469$
Sensor Mezclador	1,07	0,00	5,00	5,00	$y = 1,3673x - 1,3673$
Sensor Pitot	1,08	0,00	5,00	5,00	$y = 1,3739x - 1,3739$

Tabla 1. Resumen de las relaciones de calibración de los captores de presión utilizados en el modelo

3.5. Equipos de instrumentación para la toma de concentraciones de aire

La determinación del valor de la concentración de aire en la mezcla emulsionada ha sido uno de los procesos más complejos que se han desarrollado durante la fase experimental de esta tesis, no sólo por la selección del método más adecuado, sino por la dificultad de calibración y puesta en práctica durante los ensayos.

Como se ha indicado en el subapartado 2.5.2 (Medidas de concentración de aire en flujos con aireación natural), existen principalmente cuatro métodos de medida de concentración cuya aplicación previa haya sido desarrollada ("Mechanical Sampler", sonda de fibra óptica, análisis mediante fotointerpretación y sonda de conductividad), y todos ellos han sido aplicados a este estudio con diferentes limitaciones y alcance de resultados. La coherencia y la evolución de estos valores con respecto a otras variables y la consecución de la condición de continuidad del flujo han sido los factores determinantes en la selección final del método de medida. También ha estado condicionada por otros aspectos como la disponibilidad de los equipos necesarios y la facilidad de aplicación a las condiciones de los ensayos.

A diferencia del análisis de la velocidad, el estudio y la caracterización de los perfiles de concentración se ha centrado hasta el momento en la rápida del modelo físico. Al margen de diferentes tanteos previos en varias secciones del canal para evaluar la aplicabilidad de

los métodos, la determinación de la concentración se ha centrado en la sección de salida de la rápida.

Las ventajas de conocer las características de la aireación en este perfil son múltiples. En primer lugar, definidas las condiciones del flujo en la sección de entrada al modelo, estos nuevos datos permiten analizar la evolución de la concentración y ver si existe en los ensayos pérdida o ganancia de aire en el fluido. Con ambos resultados, también se puede determinar el valor medio de la concentración en el conjunto de la rápida para los diferentes escenarios. Por último, este perfil también constituye la sección de entrada al cuenco y determina las condiciones iniciales de aireación del resalto hidráulico, cuya caracterización con diferentes concentraciones de aire también es objetivo de esta investigación.

3.5.1. Medidas de concentración en la rápida

Los siguientes subapartados describen tanto la metodología como el procedimiento que se ha aplicado en la determinación de la concentración con los cuatro equipos propuestos. También se incluyen algunos perfiles de los resultados obtenidos, cuya comparación con los ejemplos existente en la literatura en condiciones similares ha sido clave para la selección del método final. Por otra parte, debido a los diferentes imprevistos y problemas que han surgido durante la experimentación, no todos los equipos han cumplido las expectativas ni han podido definir unos datos de concentración coherentes.

3.5.1.1. Equipo de decantación de mezcla

El esquema de funcionamiento de este equipo se ha basado en el prototipo desarrollado por la Universidad de Minnesota (Laboratorio de Hidráulica de Saint Anthony Falls, 1950) y que se ha descrito en el subapartado 2.5.2 (Medidas de concentración de aire en flujos con aireación natural). Básicamente, el objetivo de este dispositivo es separar el contenido de agua y aire de una muestra de flujo y aforar las dos variables, obteniendo el valor de la concentración en el punto de toma con ambos caudales [5].

En la década de 1990, el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX comenzó con una campaña de ensayos para caracterizar el funcionamiento de los aliviaderos escalonados (Mateos y Elviro, 1998). Esta investigación, promovida y desarrollada por Cristóbal Mateos, director del laboratorio en los años 90, adaptó el mecanismo original de la Universidad de Minnesota para ser empleado en las instalaciones del CEDEX y es la base del método utilizado en esta tesis. En este tipo de perfiles, la aparición

del fenómeno de cavitación depende de la concentración y las dimensiones de los escalones, por lo que gran parte de la investigación estuvo enfocada al análisis de la aireación. Con un canal de descarga similar al de este estudio pero con solera escalonada, se diseñó un decantador de metacrilato de 0,35 m de diámetro y 1,5 m de altura para poder conectarlo a un captor en el eje del canal (fotografía 37).

Fotografía 37. Dispositivo de decantación para la toma de concentración (Mateos y Elviro, 1998)

Para la toma de la muestra se plantearon varios diseños de captores en función del caudal, modificando la boquilla de entrada y la conexión al decantador. Para flujos de pequeña entidad, se construyó un captor con una embocadura estrecha (0,4 cm) vinculado a un tubo de conexión de 3 cm (fotografía 38).

Para ensayos con mayor caudal, se colocó una boquilla de diámetro mayor (1 cm de diámetro) y el mismo tubo de conexión (fotografía 39). Con esta selección de diámetros se buscaba tomar una muestra lo suficientemente representativa para el decantador y que, al mismo tiempo, no altere la velocidad del flujo de entrada por dimensiones excesivas.

Fotografía 38. Captor de muestra con boquilla para caudales pequeños (Mateos y Elviro, 1998)

Fotografía 39. Captor de muestra boquilla para caudales altos (Mateos y Elviro, 1998)

Una vez llegaba la muestra al decantador, era necesario estabilizar el nivel para registrar de manera precisa los caudales de agua y aire. Este procedimiento se llevaba a cabo de forma manual con la regulación de una válvula en la parte inferior del tubo. El objetivo era abrir o cerrar la salida hasta una posición en la que se estabilizada el calado en el decantador, de modo que se alcanzaba un caudal de agua por la válvula inferior similar al de la muestra. Este se determinaba con un aforador triangular en la parte inferior del modelo. El caudal de aire en el decantador se registraba con un anemómetro en la parte superior del cilindro, que en condiciones de nivel estable, debía ser equivalente al caudal de entrada. Teóricamente,

con estos resultados, era posible determinar la concentración de la mezcla en rápida. La fotografía 40 reproduce el funcionamiento del decantador en condiciones de nivel estable.

Fotografía 40. Situación de equilibrio del decantador durante un ensayo (Mateos y Elviro, 1998)

Este método no resultó adecuado y se descartó para la toma de concentraciones, ya que aparecían problemas de funcionamiento durante la fase de estabilización del nivel en el decantador. Estas dificultades eran el resultado de las limitaciones técnicas que en aquellos años tenían los equipos de regulación e instrumentación para aforar con precisión ambos caudales.

La tecnología de este tipo de dispositivos instrumentales se ha desarrollado notablemente durante las últimas décadas, tanto en el plano mecánico como el de control y programación. Con estos avances, se ha planteado continuar con la opción del decantador para medir concentraciones en este estudio, con la implementación de nuevo instrumental más preciso.

El esquema fundamental del equipo diseñado consiste en un cilindro con total estanqueidad de metacrilato de 0,35 m de diámetro y 2,3 m de altura. El captor de la muestra en la rápida es el mismo tubo de 3 cm de diámetro que se ha utilizado para determinar las velocidades, con una boquilla de toma incorporada de 1 cm. La conexión entre este captor y el decantador se realiza con un tubo flexible, con el mismo diámetro interior que el tubo y la entrada del cilindro para evitar pérdidas de carga por cambios de sección. Las siguientes fotografías describen de forma global el decantador y sus principales elementos.

Fotografía 41. Vista global del equipo de decantación en pruebas

Fotografía 42. Captor de muestra en funcionamiento

Fotografía 43. Detalle de la boquilla del captor en funcionamiento

El decantador también cuenta con un piezómetro lateral conectado en la base del cilindro y una regla para calcular la variación de la carga de forma visual (fotografía 44). Este elemento resulta muy útil durante los ensayos para obtener una idea aproximada de la estabilización del nivel en el equipo.

Fotografía 44. Entrada de la muestra al decantador y piezómetro lateral

El funcionamiento de este equipo es similar al del prototipo diseñado en 1998 y consiste en igualar la suma de caudales de salida (agua y aire), separados tras el proceso de decantación, al caudal de la mezcla emulsionada que entra al decantador. En teoría, el nivel de agua en el cilindro se estabilizaría bajo estas condiciones, con lo que las medidas de los caudales de salida serían resultados válidos para determinar la concentración. A parte del piezómetro lateral, se han colocado dos captors de presión en la parte inferior y superior del decantador, similares a los utilizados en la toma de velocidades y de calados (fotografía 45). El objetivo de esta instrumentación es tener una medida más precisa y a tiempo real de la presión y el calado en el interior del tubo. Estos dispositivos están conectados, mediante el mismo programa en LabVIEW utilizado para la toma de presiones anteriores, a un equipo central que muestra y registra los resultados instantáneos con una frecuencia de 10 Hz. Las figuras 52 y 53 representan las rectas de calibración voltaje – presión de ambos captors.

Fotografía 45. Posición de los captors de presión en la base y la parte superior del decantador

Figura 52. Recta de calibración del sensor inferior del decantador

Figura 53. Recta de calibración del sensor superior del decantador

La siguiente fase corresponde a la determinación de los caudales de salida del decantador. Para estabilizar el nivel en el decantador y equilibrar los flujos de salida con el de entrada, la única apertura donde se ha controlado el caudal con una válvula ha sido en la salida de agua, en la parte inferior del decantador, estando la de entrada de la mezcla y la de salida de aire totalmente abiertas y sin regular. En primer lugar, para el caudal de aire, se utilizaron dos anemómetros que medían la velocidad del flujo del aire de salida por una abertura en la cubierta del cilindro. El primero de ellos, un anemómetro de burbuja, se utilizó inicialmente para tener un rango de medida pero no contaba con suficiente precisión como para asegurar la representatividad de los resultados (fotografía 46).

Fotografía 46. Anemómetro de burbuja

Para evitar esta incertidumbre se utilizó un segundo anemómetro, en este caso digital y de hilo caliente, que aseguraba mayor precisión durante la medida (fotografía 47). Este equipo permite la toma de velocidades en un rango entre 0 y 20 m/s, con una resolución de 0,1 m/s y una frecuencia de 1 Hz. Consta un cabezal telescópico donde se encuentra el sensor, que consiste en un filamento metálico cuya variación de temperatura determina la velocidad del flujo de aire que pasa por su sección. Con el valor de la velocidad y las dimensiones del orificio de paso, es posible determinar el caudal con un nivel de precisión adecuado.

Fotografía 47. Anemómetro de hilo caliente (RS Components)

Posteriormente, para mejorar la calidad de la medida, este método se sustituyó en la salida superior por un flujostato de aire que, además de contar con una medida directa de mayor precisión y frecuencia, permitía la conexión con el equipo de registro central e incorporar al programa los resultados instantáneos de medida de caudal de aire (figura 54 y fotografía 48). Este elemento permite un rango de medida entre 0 y 10 l/s y una frecuencia de 10 Hz.

Figura 54. Estructura del flujostato (SMC Corporation)

Fotografía 48. Flujostato de aire (SMC Corporation)

Su funcionamiento se basa en el efecto de la presión del flujo de aire sobre un sensor con una pastilla de silicio al pasar por el interior del flujostato (figura 55). Este sensor, transmite la señal al transductor incorporado y lo transforma en unidades de caudal, que se refleja de manera instantánea en el display propio del aparato y en el equipo central de registro.

Las fotografías 49 y 50 muestran el dispositivo en funcionamiento durante los ensayos y un detalle de la salida del tubo de conexión, donde se debía asegurar una estanqueidad total. Los resultados obtenidos con este dispositivo fueron los que finalmente se consideraron para determinar la concentración por el método de decantación.

Figura 55. Esquema de funcionamiento del flujostato (SMC Corporation)

Fotografía 49. Toma de caudal de aire con el flujostato durante los ensayos

Fotografía 50. Salida del decantador del tubo conector al flujostato

La última variable para determinar la concentración de aire con este método es el caudal de agua de salida en el decantador, que se realiza a través de un tubo de 5,08 cm de diámetro (2'') con salida en la base. Como se ha dicho anteriormente, además de su aforo, es necesario controlar el flujo para mantener un nivel estable y de manera constante en el decantador. Para ello, se ha colocado en el conducto de salida una válvula motorizada de esfera que permite tanto la apertura manual como automática. La ventaja del control automatizado es que transmite los datos de caudal de manera instantánea al equipo central de adquisición y permite visualizar en el programa su evolución junto al del nivel en el decantador, lo que facilita enormemente el tanteo de apertura y cierre de la válvula para estabilizarlo. Además, este control permite rangos de apertura mínimos de $0,5^\circ$, por lo que el ajuste se realiza de una manera muy precisa.

Una vez estabilizado el nivel en el cilindro, la medida de caudal de agua se realiza de manera directa con un caudalímetro electromagnético de diámetro similar al tubo (5,08 cm) y con un rango de medida entre 0 y 15 l/s (fotografía 51). La frecuencia de medida es de 10 Hz y también está vinculado al equipo central para su registro y visualización.

Fotografía 51. Caudalímetro electromagnético para la toma de caudales de agua de salida del decantador

Con este último resultado se obtienen todas las variables necesarias para determinar la concentración de aire en la mezcla. Todos estos datos son registrados y visualizados en una aplicación desarrollada en LabVIEW por Ricardo Herrero Santos y José Luis García Ramos, responsables del departamento de instrumentación del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (fotografía 52).

Fotografía 52. Imagen de la interfaz del programa de visualización y registro

Las figuras 56 y 57 recogen un ejemplo de los resultados obtenidos para los caudales de agua (Q_{WS}) y aire de salida (Q_{AS}) del decantador a una altura de 1,6 cm en el ensayo con 200 l/s de agua (Q_{WE}) y 1000 l/min de aire (Q_{AE}).

Figura 56. Evolución del caudal de agua de salida del decantador

Figura 57. Evolución del caudal de aire de salida del decantador

Incluyendo estos datos en la ecuación 5, es posible determinar la evolución de la concentración en este punto de toma (figura 58). Los resultados y el tratamiento definen un valor medio de la concentración de aire de 10,56 %.

Figura 58. Evolución y valor medio de la concentración en el punto de toma

La evolución de los datos define una pendiente constante durante todo el periodo de análisis. Esta tendencia es similar en casi todos los ensayos que se han realizado, pero cambia a medida que se aumenta la elevación del captor de toma en la sección del canal. Este es el principal problema de esta metodología, ya que, dependiendo de los caudales de descarga en el modelo, llega una altura de medida en la que no hay velocidad suficiente para poder mantener un flujo continuo de la muestra al decantador.

En esta situación, los resultados de concentración bajan drásticamente y reproduce un perfil de concentración erróneo a lo largo de la vertical, ya que debería ser siempre ascendente hasta alcanzar el 100 % en la superficie del flujo.

La tabla 2 incluye los perfiles de concentración obtenidos hasta el nivel donde la medida ha sido posible en los cuatro escenarios analizados y considerando la cubierta plástica y la rejilla sobre el canal. El calado medio de los ensayos varía entre 9,5 y 14,5 cm, que es el nivel máximo donde se ha obtenido velocidades con el captor de presiones. Con este método para calcular la concentración, la altura máxima de toma sólo ha llegado hasta los 5,5 cm.

Q_{WE} (l/s)	Q_{AE} (l/min)	Altura de muestra - h (cm)				
		1,6	2,7	3,5	4,65	5,5
155	0	14,60	17,02	15,84	11,43	8,31
	1000	15,38	17,75	19,76	16,08	9,10
	2000	16,58	19,86	22,17	17,82	10,56

200	0	8,92	10,57	12,86	12,09	8,67
	1000	10,56	13,54	16,99	16,21	11,79
	2000	12,46	16,37	19,96	18,65	15,23
250	0	5,95	8,64	11,09	10,53	9,17
	1000	7,92	11,11	14,54	14,31	13,13
	2000	8,54	13,42	16,87	17,51	15,20
300	0	3,49	5,96	8,07	8,07	4,84
	1000	5,01	8,55	12,01	12,22	7,62
	2000	6,24	11,47	13,91	15,48	10,87

Tabla 2. Resultados de concentración obtenidas con el decantador en el perfil del flujo

Los resultados en color rojo indican que se tratan valores de concentración más bajo a los obtenidos en los puntos de toma inferior, por lo que no se considera como dato aceptable para la representación final y pone fin al perfil de concentraciones. Las figuras 59, 60, 61 y 62 representan estos perfiles para los cuatro escenarios analizados. La incertidumbre asociada a la baja disponibilidad de resultados, sólo un tercio del perfil de concentraciones completo de los escenarios, y la dificultad de contrastar la precisión de este método con otros equipos han sido los principales motivos para descartar el decantador como dispositivo de medida en este estudio.

Figura 59. Perfiles de concentración con decantador para el escenario con $Q_{WE} = 155 \text{ l/s}$ y Q_{AE} variable

Figura 60. Perfiles de concentración con decantador para el escenario con $Q_{WE} = 200$ l/s y Q_{AE} variable

Figura 61. Perfiles de concentración con decantador para el escenario con $Q_{WE} = 250$ l/s y Q_{AE} variable

Figura 62. Perfiles de concentración con decantador para el escenario con $Q_{WE} = 300 \text{ l/s}$ y Q_{AE} variable

3.5.1.2. Sonda de fibra óptica

El segundo método que se ha utilizado para determinar la concentración en la rápida ha sido la sonda de fibra óptica desarrollada por RBI-Instruments (fotografía 53). Este equipo, cedido para este estudio por el Grupo de Investigación de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Medioambiental (Hidr@m) de la Universidad Politécnica de Cartagena, permite medir concentraciones de aire en flujos bifásico con velocidades inferiores a 20 m/s .

Fotografía 53. Equipo de fibra óptica y osciloscopio para el control de la señal (Carrillo, 2014)

La sonda consta de dos cables de fibra óptica de 200 mm insertados en tubos de acero y las puntas se encuentran separadas una distancia fija conocida. Su funcionamiento se basa en la emisión de un haz de luz infrarroja a través de la fibra hacia las puntas que, al retornar en dirección opuesta por reflexión, incide sobre un prisma con un fotodiodo que transforma la señal en voltaje en un tiempo de respuesta es inferior a 5 μ s. La intensidad de la luz reflejada R se obtiene a partir de la fórmula de Fresnel [24] y depende de un coeficiente asociado a la geometría de la sonda ($K_{Fresnel}$), del índice de refracción del líquido de la parte sensible del sensor η_{Fluido} y del índice de refracción del material de la sonda η_{Sonda} (Carrillo, 2014).

$$R = K_{Fresnel} \left(\frac{\eta_{Fluido} - \eta_{Sonda}}{\eta_{Fluido} + \eta_{Sonda}} \right)^2 \quad [24]$$

La variación de la señal de la sonda corresponde a la llegada y la salida de una burbuja a la punta del sensor, que está compuesto por una punta de zafiro. La diferencia de tiempo entre la entrada y salida la esfera se traduce en dos umbrales con voltajes diferentes (1 y 2,5 V), que al ser tratados permite establecer la Fracción de vacío (Carrillo, 2017). Este valor es equivalente a la concentración de aire y se define como la relación entre los intervalos de tiempo en el que el sensor está rodeado de aire (t_{Gi}) y el tiempo total del ensayo (t).

$$Fracción\ de\ vacío = \sum_{i=1}^n \frac{t_{Gi}}{t} \quad [25]$$

Para poder aplicar la sonda nuestro estudio, se construyó un bastidor y se realizaron una serie de pruebas para determinar la concentración en el canal de descarga (fotografía 54).

Fotografía 54. Equipo de fibra óptica durante los ensayos en la rápida

Este equipo cuenta con la ventaja de disponer de resultados directos de concentración y velocidad con un tratamiento sencillo, lo que supone un ahorro de tiempo durante la fase experimental. Otros aspectos que la hacen idónea para su aplicación en el modelo son que está calibrada a partir de ensayos con las mismas características que los de este estudio, proporcionando mayor rigor a los resultados, y que los valores de velocidad obtenidos durante la campaña de ensayos se encuentran dentro de su rango de medida.

Pese a todos estos motivos para su elección, existe un problema fundamental que descarta este método para determinar las concentraciones y que está asociado a las características del flujo del Laboratorio de Hidráulica y a la fragilidad del sensor de la sonda. La alimentación del modelo se lleva a cabo mediante un circuito cerrado que recircula el agua a través de un tanque inferior. Este depósito también alimenta a una parte importante de la nave de ensayos y carece de filtros que retengan las partículas sólidas que entran del resto de modelos, generalmente áridos de pequeñas dimensiones. Los elementos más pesados se depositan en el fondo por decantación, pero no evita que la carga de material en suspensión sea notable en el caudal de ensayo. Como se ha indicado antes, el sensor de la sonda es una punta de zafiro muy frágil y puede romperse con el impacto de cualquiera de estas partículas. Dado que el coste de su reparación es elevado, fue necesario buscar una metodología alternativa para las condiciones del flujo de este estudio.

3.5.1.3. Análisis mediante fotointerpretación con láser

La siguiente metodología que se ha tratado de aplicar para medir concentraciones se basa en los trabajos de Vaideliené (2012) y Bung (2016), descritos en el subapartado 2.5.2 del estado del arte, y se basa en el uso combinado de técnicas de fotointerpretación con efectos de iluminación por láser.

La instrumentación que se ha utilizado para este método son los mismos elementos del equipo PIV (Particle Image Velocimetry), que consta de una cámara de alta resolución con capacidad de realizar 100 fotografías por segundo (fotografía 55) y un dispositivo láser desarrollado por Oxford Laser. Este equipo cuenta con un sistema de iluminación que proporciona pulsos de luz infrarroja con diferentes frecuencias en un haz de 1 mm de espesor y una amplitud vertical variable. Colocando el emisor en la dirección adecuada, el láser permite iluminar una sección interna del flujo y crear el plano adecuado de la sección para que pueda ser captado por la cámara (fotografía 56). El equipo cuenta con un programa de conexión que permite conmutar ambos dispositivos para que se coordinen de manera automática. Esto permite que se realicen la batería de fotografías al mismo tiempo que se

dispara el haz del láser e ilumina la sección del flujo. Para crear las condiciones adecuadas durante los ensayos, se ha cubierto la zona donde se toman las fotografías con una lona opaca para evitar en lo posible que la luz exterior interfiera en la resolución de las imágenes.

Fotografía 55. Cámara de alta resolución

Fotografía 56. Ubicación del láser bajo base de la rápida

Una vez obtenidas las imágenes de los ensayos, se recortaron y escalaron para homogenizar las dimensiones en función del número de píxeles, con una longitud de 0,176 mm a ambos lados, y poder transformarlas con el programa ArcGIS a un archivo ASCII (fotografía 57). La altura de la imagen se fijó en 8 cm para todas las fotografías y así poder estandarizar el tratamiento de los resultados.

Fotografía 57. Diferencias entre imagen en bruto (izquierda) y tratada (derecha)

El formato ASCII permite asignar a cada pixel un valor de la escala de la escala de grises entre 0 (negro) y 255 (blanco). Asignando a cada elemento de una imagen una cota relativa en función de su tono de gris, es posible simular una superficie tridimensional donde se aprecian las zonas con mayor concentración (figura 63).

Figura 63. Representación 3D de los pixeles en función de la escala de grises (vista frontal)

Esta figura representa muy bien la evolución de concentración desde la base, donde los tonos son más claros porque el elemento predominante es el agua, hasta la superficie, con tonos más oscuros por el mayor contenido de aire.

Con esta distribución de grises para cada pixel dentro de una misma imagen, es posible imponer un criterio con un valor límite de la escala para diferenciar entre partículas de agua y aire. En este tratamiento, que se realizó con el programa GiD, se seleccionó el valor medio del rango de grises (128) como referencia para el cambio de estado y se impuso este criterio en todas las filas de pixeles desde la base hasta la cota máxima de la imagen (8 cm), considerando como partículas de agua a los elementos con valores superiores a 128 y de aire a los inferiores. Las figuras 64 y 65 muestran las fases de este proceso y la variación de los resultados obtenidos a lo largo de la fila de pixeles.

Figura 64. Selección de una fila de pixeles para la definición de su rango de grises

Figura 65. Evolución de los tonos de grises de los pixeles de la fila seleccionada (GiD)

Tras aplicar este proceso a todas las filas e incluir el criterio de selección entre partícula de agua o aire, se generó una superficie raster con la representación de ambos grupos. Las siguientes figuras representan la misma zona de una imagen con los valores en la escala de grises (figura 66) y con los resultados tras imponer el criterio de selección (figuras 67 y 68), donde el color rojo representa las partículas de agua y el blanco las de aire.

Figura 66. Imagen con los resultados en escala de grises (GiD)

Figura 67. Imagen con los resultados aplicando el criterio de selección (GiD)

Figura 68. Representación 3D de la superposición de los dos tratamientos (GiD)

Con la asignación a cada pixel de la condición de agua o aire, se ha podido representar la evolución de la concentración a lo largo del perfil según la siguiente expresión:

$$C (\%) = \frac{NP_{Aire}}{NP_{Total}} \cdot 100 \quad [26]$$

donde C representa la concentración en tanto por ciento, NP_{Aire} es el número de píxeles en la línea con la condición de aire y NP_{Total} en el número de píxeles total.

Las siguientes figuras representan la evolución de la concentración a lo largo del perfil para los cuatro escenarios propuestos. El análisis se ha llevado a cabo en la sección de salida de la rápida y en todos los ensayos se ha colocado la cubierta plástica y la rejilla sobre el canal de descarga. Los resultados están limitados en el eje de ordenadas por la altura de las fotografías (8 cm) y muestran en general una tendencia continua. Dado el volumen de datos en cada análisis, todas las series se han tratado con media móvil para suavizar su representación y poder diferenciar claramente cada ensayo. Por último, como en el método de decantación, las variables que definen las características del flujo en el experimento son los caudales de agua (Q_{WE}) y aire (Q_{AE}) de entrada al modelo.

Figura 69. Perfiles de concentración con fotointerpretación para el escenario con $Q_{WE} = 155 \text{ l/s}$ y Q_{AE} variable

Figura 70. Perfiles de concentración con fotointerpretación para el escenario con $Q_{WE} = 200$ l/s y Q_{AE} variable

Figura 71. Perfiles de concentración con fotointerpretación para el escenario con $Q_{WE} = 250$ l/s y Q_{AE} variable

Figura 72. Perfiles de concentración con fotointerpretación para el escenario con $Q_{WE} = 300$ l/s y Q_{AE} variable

En este caso, a diferencia del método del decantador de mezcla, se ha podido obtener un perfil completo de concentración en todos los ensayos, pero los resultados en ningún caso cumplen con la ecuación de continuidad. Además, se aprecia que no son representativos porque en ningún escenario se alcanza el 100 % de la concentración en la superficie del flujo. El principal problema que se ha detectado ha sido el efecto de difusión del láser con la profundidad, que genera una iluminación muy fuerte en la base del canal por su cercanía al emisor pero que se va degradando hacia la superficie del flujo. Esta situación permite una distinción muy clara entre ambas fases en niveles inferiores, pero se pierde nitidez a medida que aumenta el calado. En consecuencia, estos motivos hacen descartar a esta metodología como herramienta de medida la concentración para este análisis.

3.5.1.4. Sonda de conductividad

El último método empleado en este estudio para caracterizar la aireación del flujo ha sido la sonda de conductividad. El equipo también ha sido cedido por el Grupo de Investigación de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Medioambiental (Hidr@m) de la Universidad Politécnica de Cartagena y su funcionamiento se basa en el dispositivo diseñado por Jacobs (1997) en el U.S. Bureau of Reclamation (fotografía 58). Las características de la sonda y su estructura han sido definidas en el subapartado 2.5.2 de esta tesis (Medidas de concentración de aire

en flujos con aireación natural). La sonda cuenta con dos electrodos, uno en la boquilla de contacto con el flujo y el otro integrado en el tubo de soporte. Cuando la sonda está sumergida, el agua funciona como un puente de impedancia capacitiva, equivalente a un puente de tipo Wheatstone, entre ambos electrodos, por lo que es posible detectar una burbuja al romper esta vinculación.

Fotografía 58. Sonda de conductividad utilizada para la experimentación

Este dispositivo está diseñado para medir la concentración de aire en tanto por ciento en una mezcla emulsionada mediante la detección de las burbujas que impactan en el sensor introducido en el flujo. El esquema de funcionamiento tiene bastantes similitudes con el de la sonda de fibra óptica y se basa en el cambio de conductividad que cada partícula de aire genera con respecto al fluido. Esta señal es amplificada y escalada para determinar el periodo de rotura del puente, que define la fracción entre ambos medios. Con el tratamiento de este resultado a lo largo de todo el periodo de ensayo, es posible determinar la concentración media del flujo en el punto de toma.

La sonda está vinculada a un equipo de adquisición de datos y a un osciloscopio para analizar la señal. La frecuencia de medida se ha fijado en 80 Hz y el periodo de ensayo ha sido de 60 s. La experimentación se ha llevado a cabo con la cobertura plástica y la rejilla y la toma de datos se han realizado en la sección de salida de la rápida, inmediatamente después del final del tramo cubierto. El captor se ha colocado sobre un bastidor móvil que permitía variar la

altura de medida de manera sencilla y fijar los puntos de toma para obtener un perfil de concentraciones similar al de velocidad (fotografía 59).

Fotografía 59. Sonda de conductividad en el bastidor durante los ensayos

La campaña experimental para validar este método se ha cerrado con 12 ensayos en total, combinando cuatro caudales de agua con tres de aire. Los registros muestran una evolución ascendente de la concentración hasta alcanzar un valor de 100 % en la superficie del flujo, coherente con los perfiles de aireación teóricos. Además, combinando estos resultados con los datos de velocidad obtenidos con el tubo Pitot, se ha comprobado que ambos cumplen con la ecuación de continuidad. Esta justificación, junto a los perfiles de concentración para todos los escenarios, se incluye en el capítulo 4 (Resultados).

La facilidad de manejo de este equipo y la coherencia de los datos justifican la selección de este método para determinar el perfil de concentraciones en la rápida y considerar sus resultados como definitivos.

3.6. Diseño de la campaña experimental

El flujo que se establece en la rápida tiene un carácter claramente bidimensional, por lo que, para caracterizar su comportamiento al pie de la misma y utilizar estos resultados como una condición de contorno de entrada al resalto hidráulico, se ha considerado suficiente medir el calado emulsionado, los perfiles de velocidad y de concentración sobre el eje del canal, de forma perpendicular a la solera de la rápida (apartados 3.3.1 y 3.5). Aunque el cuenco de resalto tiene sólo 0,5 m de anchura, las estructuras de vórtice que se generan tienen un

comportamiento tridimensional. Sin embargo, superada la zona de gran turbulencia del frente del resalto, el flujo recupera el carácter bidimensional hacia la sección de salida del dispositivo experimental. En esta zona, la turbulencia y la aireación del flujo se reducen considerablemente y permiten el empleo de la sonda ADV para medir los perfiles de velocidad en la vertical del eje (apartado 3.3.2). En esta misma sección y a lo largo del cuenco también se han obtenido la línea de calados del resalto hidráulico con los sensores de presión instalados en la base (apartado 3.4). Con estos datos se pretende determinar la energía residual generada por este fenómeno para los diferentes escenarios de ensayo.

Los caudales de ensayos vienen determinados, como se ha indicado en el apartado 3.2 del capítulo de Materiales y Metodología, por la precisión del caudalímetro de ultrasonidos, que permite aforar un caudal mínimo de 150 l/s. Por otra parte, la capacidad máxima de la instalación de bombeo limita el caudal superior del programa de ensayos a 300 l/s.

Los escenarios de cada ensayo se han diseñado para alcanzar un rango adecuado del número de Froude en la sección de entrada al cuenco. Es bastante común en el diseño del aliviadero de una presa definir estas estructuras de amortiguamiento para resaltos hidráulicos de tipo C (Design of Small Dams, 1977), con valores comprendidos entre 4,5 y 9. En las primeras campañas para ajustar el funcionamiento del dispositivo se comprobó que las velocidades al pie de rápida resultaban excesivas, proporcionando números de Froude superiores a 12 (cuenco de resalto tipo D). Con el fin de reducir estos resultados a la horquilla que se ha establecido como objetivo, se han estudiado diferentes sistemas para aumentar la pérdida de carga del flujo en la rápida. Finalmente, se ha optado por incluir una rejilla metálica flexible de acero que se ha dispuesto a lo largo del canal de descarga (apartado 3.1) y que ha permitido reducir los números de Froude en el pie de rápida a un rango final entre 6 y 8.

Para poder analizar la influencia de diferentes rangos de concentración de aire en el resalto, se ha incorporado aireación forzada al dispositivo experimental (apartado 3.2). Aunque el compresor permite proporcionar una caudal punta de 10.000 l/minuto, no es capaz de mantener un suministro constante por encima de 2.000 l/min durante el tiempo necesario para realizar las medidas en cada ensayo. Combinando las capacidades de aportación de agua con la bomba y de aire con el compresor, se ha podido establecer una horquilla de concentraciones iniciales entre 0 y 18 % en la boquilla de entrada a la rápida.

También se comprobó durante los ensayos previos a la campaña que el intercambio de aire entre el flujo y la atmósfera a través de la superficie libre era excesivo a lo largo de la rápida, por lo que no era viable establecer diferentes escenarios de aireación en la salida del canal.

Con el fin de alcanzar una gradación con diferentes concentraciones de aire para un mismo caudal del agua y evitar la salida del aire que se incorpora de manera forzada en la entrada, se ha dispuesto un cobertor plástico flexible sobre el canal de descarga (apartado 3.1), que permite establecer flujos emulsionados al pie de la rápida (sección de toma de datos) con concentraciones medias comprendidas entre el 22 y el 33 %.

Finalmente, y teniendo en cuenta todos los condicionantes y las limitaciones anteriores, se ha definido un programa de cuatro escenarios con 12 ensayos en total, combinando cuatro caudales de agua con tres caudales de aireación forzada en la entrada del dispositivo:

- Escenario 1: Caudal de agua (Q_{WE}) de 155 l/s (0,31 m²/s) combinado con caudales de aire (Q_{AE}) de 0 (**ensayo 1.1**), 1000 (**ensayo 1.2**) y 2000 l/min (**ensayo 1.3**).
- Escenario 2: Caudal de agua (Q_{WE}) de 200 l/s (0,4 m²/s) combinado con caudales de aire (Q_{AE}) de 0 (**ensayo 2.1**), 1000 (**ensayo 2.2**) y 2000 l/min (**ensayo 2.3**).
- Escenario 3: Caudal de agua (Q_{WE}) de 250 l/s (0,5 m²/s) combinado con caudales de aire (Q_{AE}) de 0 (**ensayo 3.1**), 1000 (**ensayo 3.2**) y 2000 l/s (**ensayo 3.3**).
- Escenario 4: Caudal de agua (Q_{WE}) de 300 l/s (0,6 m²/s) combinado con caudales de aire (Q_{AE}) de 0 (**ensayo 4.1**), 1000 (**ensayo 4.2**) y 2000 l/s (**ensayo 4.3**).

4. RESULTADOS

Una vez definidos los métodos de medida que se han seleccionado para la caracterización del flujo en los ensayos (capítulo 3), este capítulo recoge todos los resultados obtenidos en la fase experimental, tanto en la rápida como en el cuenco de resalto. Para facilitar el análisis de los datos en los apartados posteriores de discusión y conclusiones, los registros se han clasificado en seis grupos dependiendo de la variable estudiada y la sección donde se han tomado:

- Definición de las variables del flujo en la sección inicial de la rápida en función de la apertura de la boquilla de entrada y los caudales de aportación de agua y aire.
- Perfiles de velocidad en el pie de la rápida con el tubo Pitot para determinar como se ven afectados por la aireación.
- Perfiles de concentración en el pie de la rápida con la sonda de conductividad para caracterizar el flujo al pie de la rápida.
- Registro de la línea de calados a lo largo del cuenco de amortiguamiento con los sensores de presión ubicados en la base del canal para definir la geometría del resalto hidráulico.
- Perfiles de velocidad en el flujo de salida del cuenco con la sonda ADV para definir la energía residual generada por el resalto hidráulico con distintas condiciones de entrada.
- Registro de las longitudes del resalto hidráulico para analizar como varían en función de la concentración del flujo de entrada al cuenco.

4.1. Caracterización del flujo en la sección de entrada a la rápida

Toda la batería de ensayos se ha realizado para una apertura de 8 cm en la boquilla al inicio de la rápida. La tabla 3 incluye, para cada uno de los doce ensayos analizados, la presión media en el interior del mezclador previo a la boquilla (P_{MM}), que se ha obtenido mediante un sensor de presiones absolutas (apartado 3.2) y con el que se ha podido determinar la descompresión de la emulsión a la salida a la atmósfera. Con estos datos ha sido posible corregir el caudal de aire real a presión atmosférica (Q_{AER}) y determinar el caudal total de la

mezcla en entrada a la rápida (Q_{TE}), con el que se han calculado los valores de velocidad (v_{ME}) y concentración (C_{ME}) media en la sección inicial.

Ensayos	P_{MM} (m)	Q_{AER} (l/min)	Q_{TE} (l/s)	v_{ME} (m/s)	C_{ME} (%)
1.1	9,81	0,00	155	3,88	0,00
1.2	10,04	1030,79	172,18	4,30	9,98
1.3	10,10	2073,89	189,56	4,74	18,23
2.1	10,32	0,00	200	5	0
2.2	10,53	1080	218	5,45	8,26
2.3	10,67	2188,72	236,47	5,91	15,43
3.1	10,64	0,00	250	6,25	0,00
3.2	10,81	1123,70	268,72	6,72	6,97
3.3	11,04	2295,21	288,36	7,21	13,27
4.1	11,64	0,00	300	7,50	0,00
4.2	11,77	1210,94	320,18	8	6,30
4.3	11,99	2469,232	341,15	8,53	12,06

Tabla 3. Resultados característicos del flujo de entrada en la rápida para todos los ensayos

4.2. Resultados de velocidad al pie de la rápida

Las siguientes tablas y figuras reproducen los perfiles verticales de velocidad de cada uno de los ensayos sobre el eje de la sección de salida de la rápida.

Resultados de velocidades para el escenario 1 ($Q_{WE} = 155$ l/s ($0,31$ m ² /s) y Q_{AE} variable)			
h (cm)	v (m/s) ($Q_{AE} = 0$ l/min)	v (m/s) ($Q_{AE} = 1000$ l/min)	v (m/s) ($Q_{AE} = 2000$ l/min)
0,00	0,00	0,00	0,00
0,80	6,44	6,63	6,77
1,60	6,50	6,68	6,83
2,70	6,60	6,76	6,91
3,50	6,38	6,57	6,71
4,65	5,60	5,56	5,66
5,50	4,82	4,86	4,87
6,60	4,39	4,26	4,26
7,60	3,58	3,55	3,54
8,50	3,06	3,05	3,03

9,50	2,86	2,88	2,87
10,50	2,86	2,89	2,94
11,50	2,79	2,82	2,82
12,50	2,79	2,80	2,80
13,50	2,59	2,61	2,61
14,50	2,59	2,61	2,62

Tabla 4. Resultados de velocidad para el escenario 1 en el pie de la rápida

Figura 73. Perfiles de velocidad para el escenario 1 en el pie de la rápida

Resultados de velocidades para el escenario 2 ($Q_{WE} = 200 \text{ l/s}$ ($0.4 \text{ m}^2/\text{s}$) y Q_{AE} variable)			
h (cm)	v (m/s) ($Q_{AE} = 0 \text{ l/min}$)	v (m/s) ($Q_{AE} = 1000 \text{ l/min}$)	v (m/s) ($Q_{AE} = 2000 \text{ l/min}$)
0,00	0,00	0,00	0,00
0,80	7,20	7,46	7,68
1,60	7,30	7,54	7,75
2,70	7,44	7,66	7,84
3,50	7,21	7,48	7,61
4,65	6,59	6,74	6,89
5,50	5,98	6,13	6,19
6,60	5,54	5,67	5,71
7,60	4,60	4,70	4,71

8,50	4,00	4,10	4,09
9,50	3,19	3,38	3,43
10,50	2,99	3,01	3,03
11,50	2,83	2,82	2,82
12,50	2,81	2,80	2,81
13,50	2,62	2,62	2,61
14,50	2,62	2,62	2,62

Tabla 5. Resultados de velocidad para el escenario 2 en el pie de la rápida

Figura 74. Perfiles de velocidad para el escenario 2 en el pie de la rápida

Resultados de velocidades para el escenario 3 ($Q_{WE} = 250 \text{ l/s}$ ($0,5 \text{ m}^2/\text{s}$) y Q_{AE} variable)			
h (cm)	v (m/s) ($Q_{AE} = 0 \text{ l/min}$)	v (m/s) ($Q_{AE} = 1000 \text{ l/min}$)	v (m/s) ($Q_{AE} = 2000 \text{ l/min}$)
0,00	0,00	0,00	0,00
0,80	8,24	8,55	8,87
1,60	8,20	8,50	8,81
2,70	8,15	8,43	8,73
3,50	7,94	8,30	8,57
4,65	7,49	7,69	7,89
5,50	6,81	7,04	7,44
6,60	6,40	6,63	6,79

7,60	5,49	5,63	5,86
8,50	4,81	4,92	5,28
9,50	4,16	4,30	4,70
10,50	3,27	3,36	3,88
11,50	2,69	2,71	2,73
12,50	2,71	2,71	2,71
13,50	2,70	2,71	2,71
14,50	2,62	2,62	2,62

Tabla 6. Resultados de velocidad para el escenario 3 en el pie de la rápida

Figura 75. Perfiles de velocidad para el escenario 3 en el pie de la rápida

Resultados de velocidades para el escenario 4 ($Q_{WE} = 300 \text{ l/s}$ ($0,6 \text{ m}^2/\text{s}$) y Q_{AE} variable)			
h (cm)	v (m/s) ($Q_{AE} = 0 \text{ l/min}$)	v (m/s) ($Q_{AE} = 1000 \text{ l/min}$)	v (m/s) ($Q_{AE} = 2000 \text{ l/min}$)
0,00	0,00	0,00	0,00
0,80	8,92	9,09	9,35
1,60	8,96	9,19	9,42
2,70	9,02	9,33	9,51
3,50	8,75	8,99	9,19
4,65	8,47	8,68	8,85
5,50	7,61	7,84	7,99

6,60	7,33	7,51	7,68
7,60	6,41	6,61	6,73
8,50	5,77	5,94	6,02
9,50	5,19	5,27	5,32
10,50	3,93	3,99	4,00
11,50	2,89	2,95	3,01
12,50	2,73	2,75	2,76
13,50	2,70	2,71	2,71
14,50	2,74	2,74	2,74

Tabla 7. Resultados de velocidad para el escenario 4 en el pie de la rápida

Figura 76. Perfiles de velocidad para el escenario 4 en el pie de la rápida

4.3. Resultados de concentración al pie de la rápida

Tomando como referencia los mismos caudales de agua y aire del apartado anterior y considerando válidas los resultados de la sonda de conductividad, las siguientes tablas y figuras muestran los perfiles verticales de concentración sobre el eje de la sección de salida de la rápida. En el apartado 5.1 del capítulo de Discusión de los resultados se ha incluido la justificación de la elección de las medidas de la sonda, donde se ha comprobado que cumple la ecuación de continuidad en todos los ensayos al combinar los perfiles de concentración y velocidad.

Resultados de concentraciones para el escenario 1 ($Q_{WE} = 155 \text{ l/s}$ ($0,31 \text{ m}^2/\text{s}$) y Q_{AE} variable)			
$h \text{ (cm)}$	$C \text{ (%)}$ ($Q_{AE} = 0 \text{ l/min}$)	$C \text{ (%)}$ ($Q_{AE} = 1000 \text{ l/min}$)	$C \text{ (%)}$ ($Q_{AE} = 2000 \text{ l/min}$)
0,00	0,00	0,00	0,00
0,80	1,60	2,61	3,60
1,60	3,20	5,22	7,20
2,70	8,78	13,25	15,86
3,50	16,97	21,24	24,44
4,65	29,59	34,35	39,40
5,50	47,91	49,62	52,79
6,60	70,79	70,01	71,29
7,60	83,82	83,88	86,15
8,50	92,84	92,52	93,12
9,50	97,56	97,35	97,37
10,50	99,24	99,01	99,14
11,50	99,80	99,99	99,99
12,50	99,93	99,99	99,99
13,50	99,97	99,99	99,99
14,50	99,99	99,99	99,99

Tabla 8. Resultados de concentraciones para el escenario 1 en el pie de la rápida

Figura 77. Perfiles de concentración para el escenario 1 en el pie de la rápida

Resultados de concentraciones para el escenario 2 ($Q_{WE} = 200$ l/s ($0,4$ m ² /s) y Q_{AE} variable)			
h (cm)	C (%) ($Q_{AE} = 0$ l/min)	C (%) ($Q_{AE} = 1000$ l/min)	C (%) ($Q_{AE} = 2000$ l/min)
0,00	0,00	0,00	0,00
0,80	1,05	1,95	2,42
1,60	2,10	3,90	4,83
2,70	5,90	8,75	11,01
3,50	11,78	15,67	16,94
4,65	21,04	24,19	24,76
5,50	32,22	34,60	35,40
6,60	53,15	53,58	52,16
7,60	71,14	69,06	67,87
8,50	84,60	81,77	79,82
9,50	93,99	91,39	89,69
10,50	97,56	96,96	95,59
11,50	99,17	98,67	97,90
12,50	99,73	99,42	99,25
13,50	99,99	99,99	99,99
14,50	99,99	99,99	99,99

Tabla 9. Resultados de concentraciones para el escenario 2 en el pie de la rápida

Figura 78. Perfiles de concentración para el escenario 2 en el pie de la rápida

Resultados de concentraciones para el escenario 3 ($Q_{WE} = 250 \text{ l/s}$ ($0,5 \text{ m}^2/\text{s}$) y Q_{AE} variable)			
$h \text{ (cm)}$	$C \text{ (%)}$ ($Q_{AE} = 0 \text{ l/min}$)	$C \text{ (%)}$ ($Q_{AE} = 1000 \text{ l/min}$)	$C \text{ (%)}$ ($Q_{AE} = 2000 \text{ l/min}$)
0,00	0,00	0,00	0,00
0,80	0,61	1,12	1,44
1,60	1,22	2,23	2,87
2,70	2,80	5,54	6,80
3,50	5,50	9,44	11,05
4,65	11,07	15,69	18,35
5,50	19,91	23,74	25,79
6,60	34,50	35,98	38,45
7,60	50,05	50,48	51,03
8,50	66,28	65,30	63,80
9,50	80,89	78,72	77,69
10,50	90,04	89,88	87,39
11,50	95,51	95,32	93,00
12,50	98,19	97,72	96,61
13,50	98,99	98,99	98,63
14,50	99,54	99,70	99,32

Tabla 10. Resultados de concentraciones para el escenario 3 en el pie de la rápida

Figura 79. Perfiles de concentración para el escenario 3 en el pie de la rápida

Resultados de concentraciones para el escenario 4 ($Q_{WE} = 300$ l/s ($0,6$ m ² /s) y Q_{AE} variable)			
h (cm)	C (%) ($Q_{AE} = 0$ l/min)	C (%) ($Q_{AE} = 1000$ l/min)	C (%) ($Q_{AE} = 2000$ l/min)
0,00	0,00	0,00	0,00
0,80	0,34	0,58	0,61
1,60	0,67	1,15	1,22
2,70	1,49	2,18	2,62
3,50	2,70	4,15	5,34
4,65	5,61	7,80	8,33
5,50	11,88	11,95	14,81
6,60	21,72	22,90	23,91
7,60	35,19	34,74	35,96
8,50	48,78	48,96	48,29
9,50	65,45	65,53	64,73
10,50	76,67	78,13	77,01
11,50	85,72	86,74	86,75
12,50	91,83	92,74	92,73
13,50	95,47	96,83	96,48
14,50	97,62	98,14	97,97

Tabla 11. Resultados de concentraciones para el escenario 4 en el pie de la rápida

Figura 80. Perfiles de concentración para el escenario 4 en el pie de la rápida

4.4. Resultados de calado en el cuenco

Los resultados obtenidos por los diez captores de presión permiten caracterizar la variación de los calados en el resalto a lo largo del cuenco (L) con diferentes condiciones de aireación. En este análisis ha sido necesario imponer una condición de contorno en la compuerta de salida del canal, cuyo nivel se ha fijado en cada escenario para situar el inicio del resalto justo después la curva de transición con los ensayos sin aireación ($Q_{AE} = 0$ l/min). El objeto este criterio es analizar el desplazamiento del resalto a medida que aumenta la concentración. Las siguientes tablas y figuras recogen los resultados de calado en el cuenco en cada ensayo:

Resultados de calado en el cuenco para el escenario 1 ($Q_{WE} = 155$ l/s ($0,31$ m ² /s) y Q_{AE} variable)			
L (m)	h (m) ($Q_{AE} = 0$ l/min)	h (m) ($Q_{AE} = 1000$ l/min)	h (m) ($Q_{AE} = 2000$ l/min)
0	0,047	0,050	0,053
0,75	0,215	0,183	0,123
1,25	0,304	0,272	0,219
1,75	0,407	0,377	0,332
2,25	0,498	0,474	0,465
3,25	0,595	0,590	0,574
4,25	0,621	0,616	0,608
5,25	0,606	0,604	0,599
6,25	0,622	0,621	0,618
7,25	0,578	0,581	0,582
8,25	0,521	0,526	0,560

Tabla 12. Resultados de calado en el cuenco para el escenario 1

Figura 81. Evolución de calados en el cuenco para el escenario 1

Resultados de calado en el cuenco para el escenario 2 ($Q_{WE} = 200$ l/s ($0,4 \text{ m}^2/\text{s}$) y Q_{AE} variable)			
L (m)	h (m) ($Q_{AE} = 0$ l/min)	h (m) ($Q_{AE} = 1000$ l/min)	h (m) ($Q_{AE} = 2000$ l/min)
0	0,054	0,057	0,060
0,75	0,197	0,155	0,056
1,25	0,309	0,256	0,170
1,75	0,414	0,361	0,263
2,25	0,509	0,462	0,388
3,25	0,667	0,655	0,609
4,25	0,717	0,707	0,687
5,25	0,713	0,710	0,701
6,25	0,729	0,728	0,724
7,25	0,643	0,651	0,647
8,25	0,631	0,642	0,657

Tabla 13. Resultados de calado en el cuenco para el escenario 2

Figura 82. Evolución de calados en el cuenco para el escenario 2

Resultados de calado en el cuenco para el escenario 3 ($Q_{WE} = 250$ l/s ($0,5 \text{ m}^2/\text{s}$) y Q_{AE} variable)			
L (m)	h (m) ($Q_{AE} = 0$ l/min)	h (m) ($Q_{AE} = 1000$ l/min)	h (m) ($Q_{AE} = 2000$ l/min)
0	0,062	0,060	0,059
0,75	0,192	0,023	-0,026
1,25	0,306	0,118	-0,027
1,75	0,452	0,239	0,063
2,25	0,559	0,369	0,156
3,25	0,765	0,672	0,448

4,25	0,813	0,757	0,641
5,25	0,812	0,798	0,749
6,25	0,848	0,841	0,833
7,25	0,781	0,775	0,775
8,25	0,780	0,775	0,777

Tabla 14. Resultados de calado en el cuenco para el escenario 3

Figura 83. Evolución de calados en el cuenco para el escenario 3

Resultados de calado en el cuenco para el escenario 4 ($Q_{WE} = 300 \text{ l/s}$ ($0,6 \text{ m}^2/\text{s}$) y Q_{AE} variable)			
L (m)	h (m) ($Q_{AE} = 0 \text{ l/min}$)	h (m) ($Q_{AE} = 1000 \text{ l/min}$)	h (m) ($Q_{AE} = 2000 \text{ l/min}$)
0	0,075	0,076	0,077
0,75	0,286	0,101	0,015
1,25	0,336	0,152	-0,048
1,75	0,492	0,285	-0,009
2,25	0,606	0,434	0,104
3,25	0,832	0,751	0,369
4,25	0,896	0,855	0,631
5,25	0,917	0,898	0,768
6,25	0,965	0,947	0,903
7,25	0,860	0,843	0,833
8,25	0,721	0,709	0,707

Tabla 15. Resultados de calado en el cuenco para el escenario 4

Figura 84. Evolución de calados en el cuenco para el escenario 4

4.5. Resultados de velocidad en el cuenco

En este apartado se incluyen los perfiles verticales de velocidad en la zona donde el resalto se ha estabilizado. Las condiciones de entrada y de contorno son similares a los ensayos anteriores y la localización de la sonda para el registro de datos se ha ido variando en función de la posición donde se ha estabilizado el calado conjugado. En este caso se han registrado los tres primeros escenarios, correspondientes a caudales de agua de entrada (Q_{AE}) de 155, 200 y 250 l/s. El objetivo de este análisis es caracterizar el perfil promedio de velocidades (v_{XP}) sobre el eje para determinar la velocidad media total (v_{MR}) en la vertical del flujo (h).

Resultados de velocidad en el resalto para el escenario 1 ($Q_{WE} = 155 \text{ l/s}$ ($0,31 \text{ m}^2/\text{s}$) y Q_{AE} variable)						
$h \text{ (m)}$	$v_x \text{ (m/s)}$ ($Q_{AE} = 0 \text{ l/min}$)	$v_{XP} \text{ (m/s)}$ ($Q_{AE} = 0 \text{ l/min}$)	$v_x \text{ (m/s)}$ ($Q_{AE} = 1000 \text{ l/min}$)	$v_{XP} \text{ (m/s)}$ ($Q_{AE} = 1000 \text{ l/min}$)	$v_x \text{ (m/s)}$ ($Q_{AE} = 2000 \text{ l/min}$)	$v_{XP} \text{ (m/s)}$ ($Q_{AE} = 2000 \text{ l/min}$)
0,00	0,00		0,00		0,00	
0,02	0,31		0,28		0,28	
0,09	0,38	0,02	0,35	0,02	0,35	0,02
0,13	0,39	0,02	0,37	0,01	0,35	0,01
0,23	0,44	0,04	0,44	0,04	0,40	0,04
0,33	0,51	0,05	0,50	0,05	0,52	0,05
0,43	0,56	0,05	0,61	0,06	0,63	0,06
0,53	0,58	0,06	0,59	0,06	0,67	0,07
0,62	0,58	0,05	0,59	0,05	0,67	0,06
$V_{MR} \text{ (m/s)}$		0,47		0,47		0,48

Tabla 16. Resultados de velocidad en la salida del resalto para el escenario 1

Figura 85. Perfil de velocidad en la salida del resalto para el escenario 1

Resultados de velocidad en el resalto para el escenario 2 ($Q_{WE} = 200 \text{ l/s}$ ($0,4 \text{ m}^2/\text{s}$) y Q_{AE} variable)						
h (m)	v_x (m/s) ($Q_{AE} = 0$ l/min)	v_{xp} (m/s) ($Q_{AE} = 0$ l/min)	v_x (m/s) ($Q_{AE} = 1000$ l/min)	v_{xp} (m/s) ($Q_{AE} = 1000$ l/min)	v_x (m/s) ($Q_{AE} = 2000$ l/min)	v_{xp} (m/s) ($Q_{AE} = 2000$ l/min)
0,00	0,00		0,00		0,00	
0,02	0,35	0,01	0,28	0,01	0,25	0,01
0,09	0,38	0,01	0,31	0,01	0,19	0,01
0,13	0,42	0,04	0,35	0,03	0,30	0,02
0,23	0,48	0,04	0,49	0,04	0,43	0,04
0,33	0,59	0,05	0,58	0,05,	0,59	0,05
0,43	0,65	0,06	0,72	0,06	0,73	0,07
0,53	0,64	0,06	0,71	0,07	0,61	0,07
0,62	0,64	0,06	0,71	0,07	0,61	0,06
V_{MR} (cm/s)		0,50		0,49		0,45

Tabla 17. Resultados de velocidad en la salida del resalto para el escenario 2

Figura 86. Perfil de velocidad en la salida del resalto para el escenario 2

Resultados de velocidad en el resalto para el escenario 3 ($Q_{WE} = 250 \text{ l/s}$ ($0,5 \text{ m}^2/\text{s}$) y Q_{AE} variable)						
h (m)	$v_x \text{ (m/s)}$ ($Q_{AE} = 0 \text{ l/min}$)	$v_{xp} \text{ (m/s)}$ ($Q_{AE} = 0 \text{ l/min}$)	$v_x \text{ (m/s)}$ ($Q_{AE} = 1000 \text{ l/min}$)	$v_{xp} \text{ (m/s)}$ ($Q_{AE} = 1000 \text{ l/min}$)	$v_x \text{ (m/s)}$ ($Q_{AE} = 2000 \text{ l/min}$)	$v_{xp} \text{ (m/s)}$ ($Q_{AE} = 2000 \text{ l/min}$)
0	0,00		0,00		0,00	
0,09	0,29	0,01	0,25	0,01	0,18	0,01
0,13	0,33	0,01	0,21	0,01	0,19	0,01
0,23	0,35	0,03	0,31	0,03	0,29	0,02
0,33	0,41	0,04	0,44	0,04	0,40	0,03
0,43	0,58	0,05	0,57	0,05	0,53	0,05
0,53	0,67	0,06	0,72	0,06	0,67	0,06
0,63	0,74	0,07	0,82	0,08	0,67	0,07
0,73	0,69	0,07	0,56	0,07	-0,01	0,03
0,83	0,69	0,07	0,56	0,06	-0,01	0,00
$V_{MR} \text{ (cm/s)}$		0,51		0,48		0,34

Tabla 18. Resultados de velocidad en la salida del resalto para el escenario 3

Figura 87. Perfil de velocidad en la salida del resalto para el escenario 3

4.6. Resultados de longitud del resalto en el cuenco

La longitud del resalto en cada ensayo se ha determinado mediante análisis de las fotografías tomadas sobre el lateral del cuenco y comprobando los resultados in situ. El subapartado 2.4.1.2 (Estructura del resalto por aireación natural) define la longitud del resalto (L_R) como la distancia entre el inicio del fenómeno y la entrada de aire hasta la sección donde se estabiliza y alcanza el calado conjugado y se inicia la desaireación. Las siguientes imágenes y la tabla 19 resumen los resultados obtenidos para cada ensayo en la fase experimental:

Fotografía 60. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 1.1

Fotografía 61. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 1.2

Fotografía 62. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 1.3

Fotografía 63. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 2.1

Fotografía 64. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 2.2

Fotografía 65. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 2.3

Fotografía 66. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 3.1

Fotografía 67. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 3.2

Fotografía 68. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 3.3

Fotografía 69. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 4.1

Fotografía 70. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 4.2

Fotografía 71. Longitud del resalto hidráulico para el ensayo 4.3

Resultados de longitud del resalto hidráulico para todos los ensayos			
Ensayos	Longitud del resalto (m)	Ensayos	Longitud del resalto (m)
1.1	3	3.1	3,70
1.2	2,70	3.2	3,60
1.3	2,60	3.3	3,50
2.1	3,30	4.1	3,70
2.2	3,20	4.2	3,60
2.3	3	4.3	3,50

Tabla 19. Resumen de los resultados de longitud del resalto hidráulico para todos los ensayos

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Este capítulo se estructura en tres bloques, de los cuales el primero se centrará en la caracterización del flujo en la rápida y en el análisis de la influencia de la aireación en la disipación de energía en la misma. El segundo apartado estará enfocado al análisis del resalto hidráulico mediante la interpretación de tres variables: la longitud del resalto, el calado conjugado y la energía residual. Por último, el tercer bloque de la discusión tiene por objeto determinar, mediante análisis adimensional, el campo de validez de los resultados de la fase experimental.

También se ha incluido un apartado inicial con la comparativa de los perfiles de concentración del método de decantación y de la sonda de conductividad, donde se analiza el campo de validez del decantador como equipo de medida. Los resultados de la fotointerpretación con láser no se han tenido en cuenta en este estudio porque son claramente distintos a los de la sonda, considerados como referencia en los ensayos.

5.1. Comparativa de sistemas de medida de concentraciones

Las siguientes imágenes incluyen la comparativa del perfil de concentraciones obtenidos por el método de decantación y por la sonda de conductividad para cada uno de los ensayos. El análisis se ha reducido a los primeros 6 cm del perfil vertical, que es la zona donde se han podido obtener resultados representativos con el decantador. La comparación de perfiles muestra que los puntos en la misma cota y similar caudal, aunque muestran discrepancias, son del mismo orden de magnitud.

Figura 88. Comparativa de perfiles de concentración con decantador y sonda de conductividad para el escenario 1

Figura 89. Comparativa de perfiles de concentración con decantador y sonda de conductividad para el escenario 2

Figura 90. Comparativa de perfiles de concentración con decantador y sonda de conductividad para el escenario 3

Figura 91. Comparativa de perfiles de concentración con decantador y sonda de conductividad para el escenario 4

5.2. Análisis del comportamiento del flujo en la rápida

El primer análisis visual de los resultados de velocidad y concentración del flujo en la rápida muestra que, a igualdad de condiciones de todas las variables hidráulicas, una mayor aireación en la rápida se traduce en un aumento de la velocidad media de la mezcla emulsionada. Este efecto indica que el mecanismo de disipación de energía predominante en la rápida es el de fricción y que este se ve reducido por la aireación, incrementando la aceleración del flujo para un mismo caudal de agua. La figura 92 muestra un croquis del perfil longitudinal de la rápida con las dos secciones donde se han tomado las variables hidráulicas que caracterizan el flujo: la entrada al canal de descarga, la salida al pie y la sección intermedia de la rápida, donde se han calculado los valores medios.

Figura 92. Secciones de medida en la rápida

Los resultados de las variables características de la sección de entrada se han incluido en la tabla 3 del apartado 4.1 (Caracterización del flujo de entrada a la rápida). A continuación, las figuras 93, 94, 95 y 96 muestran la evolución conjunta de los perfiles de velocidad y concentración para cada escenario y el valor del h_{90S} (apartado 2.2) para cada ensayo.

Figura 93. Perfiles de velocidad y concentración en la salida de la rápida para el escenario 1

Figura 94. Perfiles de velocidad y concentración en la salida de la rápida para el escenario 2

Figura 95. Perfiles de velocidad y concentración en la salida de la rápida para el escenario 3

Figura 96. Perfiles de velocidad y concentración en la salida de la rápida para el escenario 4

Como resumen, la figura 97 muestra la evolución de todos los perfiles de velocidad y concentración para el conjunto de escenarios analizados. Para permitir una comparación adecuada entre los resultados con diferentes caudales de agua, la representación del eje de

ordenadas es adimensional, donde la profundidad (h) está normalizada por los calados asociados al 90 % de la concentración (h_{90s}) obtenido en cada ensayo.

Figura 97. Perfiles de velocidad y concentración en la salida de la rápida para todos los ensayos

Definidos los perfiles de velocidad y concentración en la salida de la rápida, es posible justificar la elección de la sonda de conductividad y comprobar la validez de sus resultados con ambas variables, que deben cumplir la condición de continuidad (subapartado 3.5.1.4) y el caudal de agua en la salida del canal (Q_{WS}) ha de ser igual al de entrada (Q_{WE}).

$$Q_{WE} = Q_{WS} = v \cdot A \quad [27]$$

donde v es la velocidad del flujo y A el área de la sección

Las siguientes tablas muestran el tratamiento que se ha realizado en cada ensayo para comprobar que se cumple esta condición, donde se ha calculado el caudal de agua que debería haber entre cada punto de vertical (fracción) sin considerar la concentración según la siguiente fórmula:

$$Q_{Wsi} = Q_{Tsi} \cdot (1 - C_i) \quad [28]$$

considerando Q_{TSi} la suma de los caudales de agua y aire en la fracción de salida y C_i la concentración media entre ambos puntos de medida.

Finalmente, para confirmar la condición de continuidad, la suma del caudal de agua en todas las fracciones ha de ser similar al caudal total de agua en la entrada de la rápida.

$$Q_{WE} = \sum_{i=1}^n Q_{WSi} \quad [29]$$

Condición de continuidad para el ensayo 1.1 ($Q_{WE} = 155 \text{ l/s}$ ($0,31 \text{ m}^2/\text{s}$) y $Q_{AE} = 0 \text{ l/min}$)				
h (cm)	v_i (m/s)	C_i (%)	Q_{TSi} (l/s)	Q_{WSi} (l/s)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,80	6,62	1,60	13,24	13,13
1,60	6,50	3,20	26,25	25,62
2,70	6,35	8,78	35,34	33,22
3,50	6,38	16,97	25,46	22,18
4,65	5,60	29,59	34,45	26,43
5,50	4,82	47,91	22,14	13,56
6,60	4,39	70,79	25,33	10,30
7,60	3,58	83,82	19,94	4,52
8,50	3,06	92,84	14,96	1,75
9,50	2,86	97,56	14,82	0,71
10,50	2,86	99,24	14,31	0,23
11,50	2,79	99,80	14,12	0,07
12,50	2,79	99,93	13,95	0,02
13,50	2,59	99,97	13,47	0,01
14,50	2,59	99,99	12,97	0,00
$Q_{WE} = 155 \text{ l/s}$			$Q_{TS} = 300,75 \text{ l/s}$	$Q_{WS} = 151,76 \text{ l/s}$

Tabla 20. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 1.1 ($Q_{WE} = 155 \text{ l/s}$ ($0,31 \text{ m}^2/\text{s}$) y $Q_{AE} = 0 \text{ l/min}$)

Condición de continuidad para el ensayo 1.2 ($Q_{WE} = 155 \text{ l/s}$ ($0,31 \text{ m}^2/\text{s}$) y $Q_{AE} = 1000 \text{ l/min}$)				
h (cm)	v_i (m/s)	C_i (%)	Q_{TSi} (l/s)	Q_{WSi} (l/s)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,80	6,63	2,61	13,26	13,08
1,60	6,68	5,22	26,62	25,58

2,70	6,76	13,25	36,97	33,56
3,50	6,57	21,24	26,66	22,06
4,65	5,56	34,35	34,87	25,18
5,50	4,86	49,62	22,14	12,84
6,60	4,26	70,01	25,06	10,07
7,60	3,55	83,88	19,51	4,50
8,50	3,05	92,52	14,83	1,75
10,50	2,89	99,01	14,43	0,26
11,50	2,82	99,99	14,29	0,07
12,50	2,80	99,99	14,06	0,00
13,50	2,61	99,99	13,52	0,00
14,50	2,61	99,99	13,04	0,00
Q_{WE} = 155 l/s			Q_{TS} = 304,09 l/s	Q_{WS} = 149,72 l/s

Tabla 21. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 1.2 (Q_{WE} = 155 l/s (0,31 m²/s) y Q_{AE} = 1000 l/min)

Condición de continuidad para el ensayo 1.3 (Q _{WE} = 155 l/s (0,31 m ² /s) y Q _{AE} = 2000 l/min)				
h (cm)	v _i (m/s)	C _i (%)	Q _{TSi} (l/s)	Q _{WSi} (l/s)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,80	6,77	3,60	13,54	13,30
1,60	6,83	7,20	27,20	25,73
2,70	6,91	15,86	37,79	33,43
3,50	6,71	24,44	27,24	21,75
4,65	5,66	39,40	35,56	24,21
5,50	4,87	52,79	22,38	12,06
6,60	4,26	71,29	25,11	9,53
7,60	3,54	86,15	19,50	4,15
8,50	3,03	93,12	14,78	1,53
9,50	2,87	97,37	14,75	0,70
11,50	2,82	99,99	14,39	0,06
12,50	2,80	99,99	14,05	0,00
13,50	2,61	99,99	13,54	0,00
14,50	2,62	99,99	13,09	0,00
Q_{WE} = 155 l/s			Q_{TS} = 307,43 l/s	Q_{WS} = 146,72 l/s

Tabla 22. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 1.3 (Q_{WE} = 155 l/s (0,31 m²/s) y Q_{AE} = 2000 l/min)

Condición de continuidad para el ensayo 2.1 ($Q_{WE} = 200 \text{ l/s}$ ($0,4 \text{ m}^2/\text{s}$) y $Q_{AE} = 0 \text{ l/min}$)				
h (cm)	v_i (m/s)	C_i (%)	Q_{TSi} (l/s)	Q_{WSi} (l/s)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,80	7,20	1,05	14,33	14,33
1,60	7,30	2,10	28,55	28,55
2,70	7,44	5,90	38,92	38,92
3,50	7,21	11,78	26,70	26,70
4,65	6,59	21,04	33,17	33,17
5,50	5,98	32,22	19,60	19,60
6,60	5,54	53,15	18,15	18,15
7,60	4,60	71,14	9,60	9,60
8,50	4,00	84,60	4,29	4,29
9,50	3,19	93,99	1,93	1,93
10,50	2,99	97,56	0,65	0,65
11,50	2,83	99,17	0,24	0,24
12,50	2,81	99,73	0,08	0,08
13,50	2,62	99,99	0,02	0,02
14,50	2,62	99,99	0,00	0,00
$Q_{WE} = 200 \text{ l/s}$			$Q_{TS} = 344,76 \text{ l/s}$	$Q_{WS} = 196,22 \text{ l/s}$

Tabla 23. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 2.1 ($Q_{WE} = 200 \text{ l/s}$ ($0,4 \text{ m}^2/\text{s}$) y $Q_{AE} = 0 \text{ l/min}$)

Condición de continuidad para el ensayo 2.2 ($Q_{WE} = 200 \text{ l/s}$ ($0,4 \text{ m}^2/\text{s}$) y $Q_{AE} = 1000 \text{ l/min}$)				
h (cm)	v_i (m/s)	C_i (%)	Q_{TSi} (l/s)	Q_{WSi} (l/s)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,80	7,46	1,95	14,91	14,77
1,60	7,54	3,90	30,00	29,12
2,70	7,66	8,75	41,82	39,18
3,50	7,48	15,67	30,29	26,60
4,65	6,74	24,19	40,90	32,75
5,50	6,13	34,60	27,36	19,32
6,60	5,67	53,58	32,45	18,14
7,60	4,70	69,06	25,92	10,03
8,50	4,10	81,77	19,80	4,87
9,50	3,38	91,39	18,70	2,51

10,50	3,01	96,96	15,99	0,93
11,50	2,82	98,67	14,60	0,32
12,50	2,80	99,42	14,05	0,13
13,50	2,62	99,99	13,53	0,04
14,50	2,62	99,99	13,09	0,00
Q_{WE} = 200 l/s			Q_{TS} = 353,41 l/s	Q_{WS} = 198,70 l/s

Tabla 24. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 2.2 (Q_{WE} = 200 l/s (0,4 m²/s) y Q_{AE} = 1000 l/min)

Condición de continuidad para el ensayo 2.3 (Q _{WE} = 200 l/s (0,4 m ² /s) y Q _{AE} = 2000 l/min)				
h (cm)	v _i (m/s)	C _i (%)	Q _{TSi} (l/s)	Q _{WSi} (l/s)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,80	7,68	2,42	15,37	15,18
1,60	7,75	4,83	30,87	29,75
2,70	7,84	11,01	42,88	39,49
3,50	7,61	16,94	30,90	26,58
4,65	6,89	24,76	41,68	32,99
5,50	6,19	35,40	27,81	19,45
6,60	5,71	52,16	32,74	18,41
7,60	4,71	67,87	26,05	10,42
8,50	4,09	79,82	19,79	5,18
9,50	3,43	89,69	18,80	2,87
10,50	3,03	95,59	16,16	1,19
11,50	2,82	97,90	14,63	0,48
12,50	2,81	99,25	14,07	0,20
13,50	2,61	99,99	13,55	0,05
14,50	2,62	99,99	13,08	0,00
Q_{WE} = 200 l/s			Q_{TS} = 358,38 l/s	Q_{WS} = 202,22 l/s

Tabla 25. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 2.3 (Q_{WE} = 200 l/s (0,4 m²/s) y Q_{AE} = 2000 l/min)

Condición de continuidad para el ensayo 3.1 (Q _{WE} = 250 l/s (0,5 m ² /s) y Q _{AE} = 0 l/min)				
h (cm)	v _i (m/s)	C _i (%)	Q _{TSi} (l/s)	Q _{WSi} (l/s)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,80	8,24	0,61	16,48	16,43
1,60	8,20	1,22	32,89	32,59
2,70	8,15	2,80	44,99	44,08

3,50	7,94	5,50	32,19	30,85
4,65	7,49	11,07	44,37	40,69
5,50	6,81	19,91	30,39	25,68
6,60	6,40	34,50	36,31	26,44
7,60	5,49	50,05	29,73	17,16
8,50	4,81	66,28	23,17	9,69
9,50	4,16	80,89	22,42	5,92
11,50	2,69	95,51	14,92	1,08
12,50	2,71	98,19	13,50	0,43
13,50	2,70	98,99	13,52	0,19
14,50	2,62	99,54	13,30	0,10
Q_{WE} = 250 l/s			Q_{TS} = 386,76 l/s	Q_{WS} = 254,03 l/s

Tabla 26. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 3.1 (Q_{WE} = 250 l/s (0,5 m²/s) y Q_{AE} = 0 l/min)

Condición de continuidad para el ensayo 3.2 (Q_{WE} = 250 l/s (0,5 m²/s) y Q_{AE} = 1000 l/min)				
h (cm)	v_i (m/s)	C_i (%)	Q_{TSi} (l/s)	Q_{WSi} (l/s)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,80	8,55	1,12	17,09	17,00
1,60	8,50	2,23	34,08	33,51
2,70	8,43	5,54	46,54	44,73
3,50	8,30	9,44	33,46	30,95
4,65	7,69	15,69	45,97	40,19
5,50	7,04	23,74	31,29	25,12
6,60	6,63	35,98	37,57	26,35
7,60	5,63	50,48	30,65	17,40
8,50	4,92	65,30	23,73	9,99
9,50	4,30	78,72	23,03	6,45
10,50	3,36	89,88	19,13	3,00
11,50	2,71	95,32	15,16	1,12
12,50	2,71	97,72	13,54	0,47
13,50	2,71	98,99	13,54	0,22
14,50	2,62	99,70	13,31	0,09
Q_{WE} = 250 l/s			Q_{TS} = 398,11 l/s	Q_{WS} = 256,60 l/s

Tabla 27. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 3.2 (Q_{WE} = 250 l/s (0,5 m²/s) y Q_{AE} = 1000 l/min)

Condición de continuidad para el ensayo 3.3 ($Q_{WE} = 250 \text{ l/s}$ ($0,5 \text{ m}^2/\text{s}$) y $Q_{AE} = 2000 \text{ l/min}$)				
h (cm)	v_i (m/s)	C_i (%)	Q_{TSi} (l/s)	Q_{WSi} (l/s)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,80	8,67	1,44	17,35	17,22
1,60	8,61	2,87	34,57	33,83
2,70	8,53	6,80	47,14	44,86
3,50	8,44	11,05	33,94	30,91
4,65	7,83	18,35	46,79	39,91
5,50	7,14	25,79	31,81	24,79
6,60	6,79	38,45	38,30	26,00
7,60	5,66	51,03	31,12	17,20
8,50	4,98	63,80	23,94	10,20
10,50	3,38	87,39	19,22	3,35
11,50	2,73	93,00	15,27	1,50
12,50	2,71	96,61	13,60	0,71
13,50	2,71	98,63	13,55	0,32
14,50	2,62	99,32	13,31	0,14
$Q_{WE} = 250 \text{ l/s}$			$Q_{TS} = 398,11 \text{ l/s}$	$Q_{WS} = 256,60 \text{ l/s}$

Tabla 28. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 3.3 ($Q_{WE} = 250 \text{ l/s}$ ($0,5 \text{ m}^2/\text{s}$) y $Q_{AE} = 2000 \text{ l/min}$)

Condición de continuidad para el ensayo 4.1 ($Q_{WE} = 300 \text{ l/s}$ ($0,6 \text{ m}^2/\text{s}$) y $Q_{AE} = 0 \text{ l/min}$)				
h (cm)	v_i (m/s)	C_i (%)	Q_{TSi} (l/s)	Q_{WSi} (l/s)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,80	8,92	0,34	17,84	17,81
1,60	8,96	0,67	35,77	35,59
2,70	9,02	1,49	49,45	48,91
3,50	8,75	2,70	35,53	34,79
4,65	8,47	5,61	49,51	47,45
5,50	7,61	11,88	34,18	31,19
6,60	7,33	21,72	41,08	34,18
7,60	6,41	35,19	34,33	24,56
8,50	5,77	48,78	27,39	15,89
9,50	5,19	65,45	27,38	11,74
10,50	3,93	76,67	22,79	6,60

11,50	2,89	85,72	17,06	3,21
12,50	2,73	91,83	14,07	1,58
13,50	2,70	95,47	13,58	0,86
14,50	2,74	97,62	13,59	0,47
Q_{WE} = 300 l/s			Q_{TS} = 433,55 l/s	Q_{WS} = 314,83 l/s

Tabla 29. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 4.1 (Q_{WE} = 300 l/s (0,6 m²/s) y Q_{AE} = 0 l/min)

Condición de continuidad para el ensayo 3.2 (Q_{WE} = 300 l/s (0,6 m²/s) y Q_{AE} = 1000 l/min)				
h (cm)	v_i (m/s)	C_i (%)	Q_{TSi} (l/s)	Q_{WSi} (l/s)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,80	9,09	0,58	18,17	18,12
1,60	9,19	1,15	36,54	36,23
2,70	9,33	2,18	50,91	50,06
3,50	8,99	4,15	36,64	35,48
4,65	8,68	7,80	50,81	47,77
5,50	7,84	11,95	35,10	31,63
6,60	7,51	22,90	42,21	34,86
7,60	6,61	34,74	35,30	25,12
8,50	5,94	48,96	28,22	16,41
9,50	5,27	65,53	28,01	11,98
10,50	3,99	78,13	23,15	6,52
11,50	2,95	86,74	17,36	3,05
12,50	2,75	92,74	14,26	1,46
13,50	2,71	96,83	13,65	0,71
14,50	2,74	98,14	13,61	0,34
Q_{WE} = 300 l/s			Q_{TS} = 443,94 l/s	Q_{WS} = 319,75 l/s

Tabla 30. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 4.2 (Q_{WE} = 300 l/s (0,6 m²/s) y Q_{AE} = 1000 l/min)

Condición de continuidad para el ensayo 3.3 (Q_{WE} = 300 l/s (0,6 m²/s) y Q_{AE} = 2000 l/min)				
h (cm)	v_i (m/s)	C_i (%)	Q_{TSi} (l/s)	Q_{WSi} (l/s)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,80	9,35	0,61	18,71	18,65
1,60	9,42	1,22	37,55	37,21
2,70	9,51	2,62	52,07	51,07
3,50	9,19	5,34	37,41	35,92

4,65	8,85	8,33	51,87	48,33
5,50	7,99	14,81	35,80	31,66
6,60	7,68	23,91	43,10	34,75
7,60	6,73	35,96	36,01	25,23
8,50	6,02	48,29	28,68	16,60
9,50	5,32	64,73	28,35	12,33
10,50	4,00	77,01	23,31	6,79
11,50	3,01	86,75	17,53	3,18
12,50	2,76	92,73	14,43	1,48
13,50	2,71	96,48	13,68	0,74
14,50	2,74	97,97	13,61	0,38
$Q_{WE} = 300 \text{ l/s}$			$Q_{TS} = 452,11 \text{ l/s}$	$Q_{WS} = 324,31 \text{ l/s}$

Tabla 31. Comprobación de la condición de continuidad en el ensayo 4.3 ($Q_{WE} = 300 \text{ l/s}$ ($0,6 \text{ m}^2/\text{s}$) y $Q_{AE} = 2000 \text{ l/min}$)

Como se puede comprobar, el caudal de agua de entrada (Q_{WE}) apenas difiere del de salida (Q_{WS}) en todos los ensayos, por lo que se cumple la ecuación de continuidad y se pueden considerar como válidos los perfiles de concentración. La tabla 32 resume los valores medios de velocidad (v_{MS}) y concentración (C_{MS}) al pie de la rápida, además de los valores de h_{90s} y el número de Froude, obtenido a partir del calado equivalente ($h_{Neto s}$) sin concentración, en esta sección de toma para cada ensayo.

Ensayos	$v_{MS} \text{ (m/s)}$	$C_{MS} \text{ (\%)}$	$h_{90s} \text{ (cm)}$	$h_{Neto s} \text{ (cm)}$	Fr
1.1	5,19	29,28	8,2	6,0	6,78
1.2	5,24	31,30	8,2	5,9	6,88
1.3	5,35	33,03	8,1	5,8	7,10
2.1	5,88	27,05	9,1	6,8	7,20
2.2	5,98	29,54	9,3	6,7	7,38
2.3	6,03	30,37	9,6	6,6	7,48
3.1	6,32	23,90	10,5	7,9	7,17
3.2	6,52	25,71	10,5	7,7	7,52
3.3	6,69	27,89	11,0	7,5	7,81
4.1	6,59	22,16	12,2	9,1	6,97
4.2	6,81	22,46	12,0	8,8	7,33
4.3	6,95	22,88	12,0	8,6	7,55

Tabla 32. Resultados característicos del flujo de salida en la rápida para todos los ensayos

Analizando esta información se aprecia que la tendencia común en todos los ensayos es el incremento de la velocidad con el aumento de la concentración, que se desarrolla principalmente en la parte inferior del perfil.

En el primer escenario ($Q_{WE} = 155$ l/s), los efectos de la aireación sobre la velocidad tienen lugar en los primeros 4,5 cm del perfil. Ambas variables aumentan con la subida del caudal de aire en la entrada y alcanza el mayor incremento a 2,7 cm de la base. La velocidad en este punto pasa de 6,6 m/s con 8,7 % a 6,9 con 15,8 % de concentración. El h_{90s} se mantiene constante en todos los ensayos con pequeñas variaciones de milímetros.

El escenario 2, correspondiente a un caudal de agua de entrada de 200 l/s, muestra una tendencia similar a los ensayos anteriores. Debido al incremento del caudal, el efecto de la aireación sobre el perfil de velocidades se eleva hasta los 5,5 cm, pero la mayor evolución de velocidades sigue estando a 2,7 cm de la base. En estos ensayos, la velocidad pasa de 7,4 m/s con 5,9 % de concentración en el ensayo 2.1 a 7,8 m/s con un 11 % en el ensayo 2.3. El valor del h_{90s} aumenta en 1 cm, con un valor máximo de 9,55 cm en el ensayo 2.3.

El tercer escenario sigue la misma evolución, con una zona de influencia por la aireación que alcanza los 6,5 cm. Las mayores variaciones en la velocidad de la mezcla se dan a una altura de 1,6 cm, donde pasa de 8,2 m/s con 1,2 % de concentración a 8,8 con 2,9 %. También coincide con los otros dos escenarios en la evolución del valor de h_{90s} , que alcanza el máximo de 11 cm para un caudal de aire de 2000 l/min.

En el último escenario ($Q_{WE} = 300$ l/s) es donde se producen las mayores variaciones de velocidad, con una evolución de los 9 m/s con concentración de 1,5 % a 9,5 con 2,6 %. También se aprecia la variación de los valores de h_{90s} , que llega a alcanzar los 12,2 cm en el ensayo sin aportación de aireación forzada.

Con este tratamiento de los resultados obtenidos en la campaña experimental, se dan las condiciones para poder caracterizar el comportamiento del flujo emulsionado en base a criterios de disipación de energía. Como se ha indicado en el apartado 2.6 del Estado del arte, existen tres efectos generados por la aireación que pueden tener una alta influencia sobre los mecanismos de disipación. En el caso de las rápidas en régimen supercrítico como la analizada en este estudio, con calados de poca entidad por las altas velocidades del flujo, el efecto principal que interviene en la disipación de energía es la fricción. Considerando todos los métodos para cuantificar esta variable, se ha seleccionado la ecuación de Manning (1891) por ser una formulación ampliamente conocida y de extensa aplicación en el ámbito

de la ingeniería hidráulica. Esta fórmula determina la pendiente de fricción (I_f) y la velocidad (v) en función de un coeficiente de rugosidad (n) característico del material [19].

Tomando los perfiles de velocidad y concentración en las secciones de entrada (tabla 3) y salida (tabla 32) del canal de descarga, se han obtenido los valores medios característicos del flujo en la rápida (V_{MM} , C_{MM} y $h_{90\ s}$) y la pendiente de fricción para cada uno de los ensayos. Incluyendo estos datos en la fórmula de Manning es posible calcular el coeficiente de rugosidad asociado (n) y la tasa de reducción en % respecto a la rugosidad teórica sin aireación (Δn). La figura 98 muestra los coeficientes de rugosidad de Manning con cada concentración y tabla 33 incluye los valores medios de los resultados experimentales.

Figura 98. Evolución del coeficiente de Manning con respecto a la concentración para todos los escenarios

Ensayo	v_{MM} (m/s)	C_{MM} (%)	$h_{90\ M}$ (cm)	$h_{Neto\ M}$ (cm)	n ($s \cdot m^{-1/3}$)	Δn (%)
1.1	4,53	14,64	8,1	6,9	0,0199	9,81
1.2	4,77	20,64	8,1	6,6	0,0192	13,02
1.3	5,05	25,63	8	6,2	0,0183	17,05
2.1	5,44	13,52	8,5	7,4	0,0173	5,06
2.2	5,71	18,90	8,7	7	0,0169	7,19
2.3	5,97	22,90	8,8	6,7	0,0166	8,58
3.1	6,28	11,95	9,2	7,9	0,0163	5,58

3.2	6,62	16,34	9,3	7,6	0,0157	8,86
3.3	6,95	20,58	9,5	7,2	0,0155	10,24
4.1	7,05	11,08	10,1	8,5	0,0162	7,86
4.2	7,41	14,38	10	8,2	0,0156	11
4.3	7,74	17,47	10	7,8	0,0153	12,52

Tabla 33. Resultados característicos del flujo en la sección media de la rápida para todos los ensayos

A partir de estos resultados también se pueden obtener los valores medios de la pendiente de fricción en cada ensayo, cuyo comportamiento en función de la concentración concuerda con la rugosidad de Manning (figura 99).

Figura 99. Evolución de la pendiente de fricción con respecto a la concentración para todos los escenarios

Analizando los resultados de la figura 94 y la tabla 3, resulta claro que los coeficientes de Manning también decrecen con el incremento del caudal de agua. Este efecto era esperado ya que la influencia de la condición de fricción es más baja con calados mayores. También se aprecia que la tendencia de reducción del coeficiente de rugosidad con respecto a la concentración es muy similar en los cuatro escenarios, con un pendiente media de $-9 \cdot 10^{-5} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$.

En base a esta singularidad, se ha propuesto una relación para caracterizar la variación del coeficiente de Manning (n) en función de la concentración media (C_{MM}) en un flujo emulsionado a partir de la expresión:

$$n(C_{MM}) = n_0 - 9 \cdot 10^{-5} \cdot C_{MM}(\%) \quad [30]$$

donde n_0 representa el número de Manning en el caso de no haber contenido de aire en el flujo ($n(C_{MM} = 0)$).

La ecuación anterior considera el calado emulsionado (h_{90M}) para determinar la variación de la rugosidad. Este mismo análisis se puede plantear con el calado neto medio (h_{NetoM}) que correspondería al caudal teórico sin aire [31].

$$n(C_{MM}) = n_0 - 12,8 \cdot 10^{-5} \cdot C_{MM}(\%) \quad [31]$$

5.3. Análisis del comportamiento del flujo en el cuenco de resalto

Las variables que caracterizan el resalto hidráulico son el calado conjugado (y_2) y su longitud (L_R). Aplicando los principios de continuidad y de conservación de la cantidad de movimiento se puede obtener el equilibrio de fuerzas que define el fenómeno (figura 100) y determinar el valor del calado conjugado en función de las variables del flujo de entrada: calado (y_1) y velocidad (v). Para este análisis se ha considerado que el resalto se produce en un canal rectangular.

Figura 100. Esquema de equilibrio de fuerzas en el resalto hidráulico

Donde ρ es la densidad del agua, Q el caudal circulante, v_1 y v_2 representan las velocidades de entrada y salida del resalto, y_1 y y_2 el calado de entrada y el conjugado respectivamente, P la distribución de presiones hidrostática y S la superficie de la vertical sobre la que actúa.

Este esquema, desarrollado por Bélanger [13] y donde no interviene la concentración de aire del flujo de entrada, permite obtener la ecuación para determinar el calado conjugado. Con este dato es posible plantear dos números adimensionales que caractericen el resalto hidráulico, que son el número de Froude de entrada (Fr_1) y la relación entre el calado de entrada y su conjugado (y_2/y_1).

El objetivo de este apartado de discusión es analizar, en base a los resultados obtenidos, si la concentración del flujo entrante al cuenco tiene alguna influencia sobre las siguientes variables características del resalto: calado conjugado (y_2), longitud del resalto (L_R) y energía residual (ΔE).

5.3.1. Influencia de la concentración sobre el calado conjugado

La tabla 34 muestra las variables características del resalto hidráulico para cada ensayo e incluye los resultados del calado conjugado obtenidos de forma teórica ($y_{2 \text{ Neto}}$) mediante la ecuación de Bélanger y experimentales ($y_{2 \text{ Exp}}$). Considerando que la velocidad media del flujo en la sección inicial del resalto es la misma que en el pie de la rápida (v_{MS}), se ha determinado el calado teórico de entrada al cuenco ($y_{1 \text{ Neto}}$). Este valor representa el calado neto del flujo sin aire (calado equivalente), que se obtiene de dividir el caudal de agua entre la velocidad y el ancho del cuenco (0,5 m), y es independiente de la concentración. También se ha incluido en la tabla los resultados del número de Froude teórico en la entrada ($Fr_{1 \text{ Neto}}$).

Ensayo	Q_{AE} (l/s)	v_{MS} (m/s)	C_{MS} (%)	$y_{1 \text{ Neto}}$ (m)	$Fr_{1 \text{ Neto}}$	$y_{2 \text{ Exp}}$ (m)	$y_{2 \text{ Neto}}$ (m)
1.1	155	5,19	29,28	0,060	6,78	0,622	0,544
1.2	155	5,24	31,3	0,059	6,88	0,621	0,547
1.3	155	5,35	33,03	0,058	7,10	0,618	0,553
2.1	200	5,88	27,05	0,068	7,20	0,729	0,659
2.2	200	5,98	29,54	0,067	7,38	0,728	0,666
2.3	200	6,03	30,37	0,066	7,48	0,724	0,669
3.1	250	6,32	23,9	0,079	7,17	0,848	0,764
3.2	250	6,52	25,71	0,077	7,52	0,841	0,778
3.3	250	6,69	27,89	0,075	7,81	0,833	0,789
4.1	300	6,59	22,16	0,091	6,97	0,965	0,853
4.2	300	6,81	22,46	0,088	7,33	0,947	0,870
4.3	300	6,95	22,88	0,086	7,55	0,903	0,880

Tabla 34. Variables características del flujo asociadas al calado conjugado para todos los ensayos

Para poder analizar la influencia de la concentración sobre el calado conjugado se deben relacionar dos variables independientes, por lo que se han tomado como referencia los cocientes de los conjugados teóricos y experimentales entre el calado de entrada neto ($y_{2\text{ Exp}}/y_{1\text{ Neto}}$ e $y_{2\text{ Neto}}/y_{1\text{ Neto}}$) y, a su vez, se han dividido entre el número de Froude en la entrada ($Fr_{1\text{ Neto}}$) (tabla 35).

Ensayos	$y_{2\text{ Neto}} / y_{1\text{ Neto}}$	$y_{2\text{ Exp}} / y_{1\text{ Neto}}$	$y_{2\text{ Neto}} / y_{1\text{ Neto}} / Fr_{1\text{ Neto}}$	$y_{2\text{ Exp}} / y_{1\text{ Neto}} / Fr_{1\text{ Neto}}$
1.1	9,10	10,41	1,34	1,54
1.2	9,24	10,50	1,34	1,53
1.3	9,55	10,67	1,35	1,50
2.1	9,69	10,71	1,35	1,49
2.2	9,95	10,88	1,35	1,47
2.3	10,08	10,92	1,35	1,46
3.1	9,66	10,72	1,35	1,50
3.2	10,14	10,96	1,35	1,46
3.3	10,56	11,14	1,35	1,42
4.1	9,37	10,60	1,34	1,52
4.2	9,87	10,75	1,35	1,47
4.3	10,19	10,46	1,35	1,39

Tabla 35. Variables adimensionales asociadas al calado conjugado para todos los ensayos

La figura 101 muestra la relación entre la concentración de aire en el flujo de entrada al cuenco (abscisas) y el cociente de los números adimensionales del resalto en términos de calados (ordenadas).

En primer lugar, la relación adimensional de los valores teóricos ($y_{2\text{ Neto}} / y_{1\text{ Neto}} / Fr_{1\text{ Neto}}$), cuyo calado conjugado se obtiene a partir de la ecuación de Bélanger, es constante (1,34) para cualquier concentración de aire del flujo de entrada, ya que este dato no interviene en la formulación.

La segunda serie corresponde a los resultados experimentales y presenta cierta dispersión, que se puede atribuir a las imprecisiones durante la toma de datos durante las medidas en el modelo físico. En cualquier caso, la tendencia general de los puntos en el gráfico es horizontal y no se aprecia una dependencia de la concentración.

Figura 101. Relación entre las variables adimensionales asociadas al calado conjugado y la concentración

Viendo la evolución de los resultados, debe existir otra variable que explique las diferencias entre las pendientes constantes de ambas series (1,34 y 1,49 de valor medio), que será analizada en el apartado 5.2.4 de este capítulo.

5.3.2. Influencia de la concentración sobre la longitud del resalto

De manera análoga al apartado anterior, se ha realizado un análisis sobre la influencia de la concentración en la evolución de la longitud del resalto para cada uno de los ensayos. En este caso se ha empleado un numero adimensional que relaciona la longitud media del resalto (L_R), obtenida en el apartado 4.6 (Resultados de la longitud del resalto en el cuenco), con el calado equivalente del flujo de entrada (y_1 Neto) y el número de Froude en la sección inicial (Fr_1 Neto). La tabla 36 incluye los resultados característicos del resalto para cada ensayo:

Ensayo	Q_{AE} (l/s)	v_{MS} (m/s)	C_{MS} (%)	y_1 Neto (m)	Fr_1 Neto	L_R (m)
1.1	155	5,19	29,28	0,060	6,78	3
1.2	155	5,24	31,3	0,059	6,88	2,70
1.3	155	5,35	33,03	0,058	7,10	2,60
2.1	200	5,88	27,05	0,068	7,20	3,30
2.2	200	5,98	29,54	0,067	7,38	3,20

2.3	200	6,03	30,37	0,066	7,48	3
3.1	250	6,32	23,9	0,079	7,17	3,70
3.2	250	6,52	25,71	0,077	7,52	3,60
3.3	250	6,69	27,89	0,075	7,81	3,50
4.1	300	6,59	22,16	0,091	6,97	3,70
4.2	300	6,81	22,46	0,088	7,33	3,60
4.3	300	6,95	22,88	0,086	7,55	3,50

Tabla 36. Variables características del flujo asociadas a la longitud del resalto para todos los ensayos

En este caso, se ha estudiado la influencia de la concentración sobre la longitud del resalto tomando como referencia los cocientes entre la longitud y el calado de entrada teórico ($L_R/y_{1\text{ Neto}}$). Posteriormente, este valor independiente se han dividido de nuevo entre el número de Froude teórico ($Fr_{1\text{ Neto}}$) (tabla 37).

Ensayos	$L_R / y_{1\text{ Neto}}$	$L_R / y_{1\text{ Neto}} / Fr_{1\text{ Neto}}$
1.1	50,23	7,41
1.2	45,64	6,64
1.3	44,87	6,32
2.1	48,51	6,74
2.2	47,84	6,48
2.3	45,23	6,05
3.1	46,77	6,52
3.2	46,94	6,24
3.3	46,83	5,99
4.1	40,64	5,83
4.2	40,86	5,58
4.3	40,54	5,37

Tabla 37. Variables adimensionales asociadas a la longitud del resalto para todos los ensayos

La figura 102 muestra los resultados adimensionales en función de la concentración del flujo de entrada. Se aprecia una cierta dispersión de los resultados, aunque la tendencia en todas las series es similar e independiente de la concentración.

Figura 102. Relación entre las variables adimensionales asociadas a la longitud del resalto y la concentración

5.3.3. Influencia de la concentración sobre la energía residual

Para realizar este análisis se ha adimensionalizado la energía aguas abajo del resalto (E_2) con el calado neto de entrada (y_1 Neto). En la tabla 38 se han incluido las variables características del flujo asociadas a la energía tras el resalto para todos los ensayos. En este caso no se han podido obtener los resultados de la velocidad media en la sección de salida del escenario 4, por lo que el estudio se realizará con nueve puntos (escenarios 1, 2 y 3).

Ensayo	Q_{AE} (l/s)	v_{MS} (m/s)	C_{MS} (%)	y_2 Exp (m)	v_2 Exp (m/s)	y_1 Neto (m)	Fr_1 Neto	E_2 (m)
1.1	155	5,19	29,28	0,622	0,498	0,060	6,78	0,635
1.2	155	5,24	31,3	0,621	0,499	0,059	6,88	0,634
1.3	155	5,35	33,03	0,618	0,501	0,058	7,10	0,631
2.1	200	5,88	27,05	0,729	0,549	0,068	7,20	0,744
2.2	200	5,98	29,54	0,728	0,550	0,067	7,38	0,743
2.3	200	6,03	30,37	0,724	0,552	0,066	7,48	0,740
3.1	250	6,32	23,9	0,848	0,589	0,079	7,17	0,866
3.2	250	6,52	250	0,841	0,595	0,077	7,52	0,859
3.3	250	6,69	250	0,833	0,600	0,075	7,81	0,851

Tabla 38. Variables características del flujo asociadas a la energía tras el resalto para todos los ensayos

El objetivo de este análisis es comprobar la influencia de la concentración sobre el número adimensional resultante de dividir la energía entre el calado experimental tras el resalto y el número de Froude de entrada teórico ($E_2/y_{2\text{ Exp}}/Fr_{1\text{ Neto}}$). La tabla 39 y la figura 103 muestran esta relación donde, al igual que en los apartados anteriores, no se puede establecer una dependencia entre la energía residual y la concentración.

Ensayos	$E_2 / y_{1\text{ Neto}}$	$E_2 / y_{1\text{ Neto}} / Fr_{1\text{ Neto}}$
1.1	10,63	1,57
1.2	10,71	1,56
1.3	10,89	1,53
2.1	10,93	1,52
2.2	11,11	1,51
2.3	11,15	1,49
3.1	10,95	1,53
3.2	11,20	1,49
3.3	11,39	1,46

Tabla 39. Variables adimensionales asociadas a la energía tras el resalto para todos los ensayos

Figura 103. Relación entre las variables adimensionales asociadas a la energía tras el resalto y la concentración

5.3.4. Análisis de la desviación de los resultados experimentales con respecto a la formulación teórica de Bélanger

En el apartado 5.2.1 se ha podido constatar que la constante que resulta de dividir la relación entre calados conjugados del resalto y el número de Froude en la sección de entrada con la formulación teórica de Bélanger es distinta de la obtenida en los resultados experimentales. Esta diferencia también se evidencia en la tabla 40 y la figura 104, que relaciona el cociente entre el calado de entrada (y_1 Neto) y el conjugado teórico y experimental (y_2 Neto y y_2 Exp) con el número de Froude teórico (Fr_1 Neto).

Ensayo	Fr_1 Neto	y_2 Neto / y_1 Neto	y_2 Exp / y_1 Neto	Ensayo	Fr_1 Neto	y_2 Neto / y_1 Neto	y_2 Exp / y_1 Neto
1.1	6,78	9,10	10,41	3.1	7,17	9,66	10,72
1.2	6,88	9,24	10,50	3.2	7,52	10,14	10,96
1.3	7,10	9,55	10,67	3.3	7,81	10,56	11,14
2.1	7,20	9,69	10,71	4.1	6,97	9,37	10,60
2.2	7,38	9,95	10,88	4.2	7,33	9,87	10,75
2.3	7,48	10,08	10,92	4.3	7,55	10,19	10,46

Tabla 40. Variables adimensionales asociadas a los calados conjugados teórico y experimental

Figura 104. Relación experimental y teórica de calados adimensionales y Fr_1 el resalto hidráulico

Estos resultados parecen constatar que no existe influencia de la aireación en la desviación de los datos, al menos para el rango de concentraciones que se han obtenido en los ensayos. Así mismo también se puede descartar los efectos de la fricción por los contornos, ya que la longitud del resalto es muy pequeña y hace despreciable la fricción de las paredes con el flujo en comparación con el resto de fuerzas que entran en juego en el equilibrio dinámico de un resalto.

Para justificar esta desviación, se ha introducido en este punto una nueva formulación que incluye en el equilibrio de fuerzas de la ecuación 32 un nuevo término denominado Fuerza de Reacción del Resalto (F_{RR}), que aparece reflejada en la figura 105.

Figura 105. Esquema de equilibrio de fuerzas en el resalto hidráulico con la fuerza de reacción (F_{RR})

$$\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2 + 2Fr_1^2 \cdot \left(\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^{-1} - 1\right) - \frac{2F_{RR}}{\gamma_w \cdot y_1^2} - 1 = 0 \quad [32]$$

donde F_{RR} es la Fuerza de Reacción y γ_w incluye el peso específico del agua en la ecuación.

Haciendo el ajuste potencial de los resultados experimentales se obtiene una relación entre el cociente de calados conjugados y el número de Froude de entrada al cuenco (figura 104):

$$\frac{y_2}{y_1} = 4,26 \cdot Fr_1^{0,47} \quad [33]$$

Esta relación tiene una dependencia lineal de la Fuerza de Reacción, por lo que sustituyendo este término en la ecuación 32, se obtienen la expresión para dicha fuerza [34].

$$F_{RR} = \gamma_w \frac{y_1^2}{2} \cdot (1 + 2Fr_1^2 - 18,15Fr_1^{0,94} - 0,46Fr_1^{1,53}) \quad [34]$$

Se ha calculado la Fuerza de Reacción para cada uno de los ensayos y los resultados aparecen en la tabla 41, donde también se han incluido las fuerzas de entrada (desestabilizadoras) y salida (equilibrantes) en el resalto. Se puede comprobar que la entidad de esta fuerza lógicamente no es despreciable y llega a alcanzar hasta un 20 % de la aportación en el esquema dinámico para el número de Froude más bajo.

Ensayos	Fr_1 Neto	$\rho Q v_1$ (N)	$P_1 S_1$ (N)	$\rho Q v_2$ (N)	$P_2 S_2$ (N)	$\rho Q v_2 + P_2 S_2$ (N)	F_{RR} (N)	% F_{RR} fuerzas equilibrantes
1.1	6,78	804,45	8,74	77,24	948,03	1025,28	212,85	20,76
1.2	6,88	812,20	8,57	77,36	945,16	1022,52	202,13	19,77
1.3	7,10	829,25	8,23	77,72	936,50	1014,21	176,66	17,42
2.1	7,20	1176	11,34	85,11	1300,28	1385,38	223,20	16,11
2.2	7,38	1196	10,96	85,18	1298,14	1383,32	202,85	14,66
2.3	7,48	1206	10,78	85,60	1285,22	1370,82	178,55	13,02
3.1	7,17	1580	15,33	91,35	1763,22	1854,58	318,26	17,16
3.2	7,52	1630	14,41	92,18	1731,83	1824,00	236,47	12,96
3.3	7,81	1672,50	13,69	93,06	1699,18	1792,24	165,82	9,25

Tabla 41. Esquema dinámico del resalto para cada ensayo considerando F_{RR}

Se aprecia que la Fuerza de Reacción al resalto disminuye a medida que aumenta el número de Froude y se prevé que llegue a anularse cuando se alcance un valor en torno a 8 (figura 106), donde los resultados experimentales tienden a coincidir con los obtenidos de manera teórica con la formulación de Bélanger. A partir de este umbral esta fuerza cambiará de sentido en dirección a la entrada del resalto, convirtiéndose en estabilizadora.

Figura 106. Reducción del peso de F_{RR} sobre las fuerzas equilibrantes en función de Fr_1

La naturaleza de esta fuerza de reacción puede deberse a diferentes razones y su análisis supone una de las futuras líneas de trabajo de esta investigación. Uno de los motivos podría estar asociado al intercambio de la cantidad de movimiento a través de la superficie libre en el frente del resalto, aunque parece más plausible el efecto de la reacción de los cajeros por la expansión lateral del chorro al verse frenado en el interior del resalto

5.4. Análisis de semejanza

En la tabla 42 se han incluido los valores adimensionales de los números Froude, Reynolds, y Weber en el pie de la rápida para cada uno de los ensayos, que permiten definir las condiciones del flujo a la entrada del resalto. En todos los valores se ha tomado el dato del equivalente sin considerar la concentración.

Ensayos	Fr	Re·10 ⁶	We
1.1	6,78	1,70	214,41
1.2	6,88	1,73	216,60
1.3	7,10	1,73	221,30
2.1	7,20	2,13	331,67
2.2	7,38	2,24	318,88
2.3	7,48	2,30	321,36
3.1	7,17	2,65	421,08
3.2	7,52	2,74	434,53
3.3	7,81	2,93	445,67
4.1	6,97	3,22	527,51
4.2	7,33	3,28	545,09
4.3	7,55	3,35	555,83

Tabla 42. Resultados adimensionales del flujo al pie de la rápida para todos los ensayos

Se ha comprobado que los números de Reynolds y Weber obtenidos durante la fase experimental garantizan la representatividad de los resultados sin efectos de escala. Aplicando la semejanza de Froude y considerando unos valores mínimos de Reynolds y Weber de 40000 y 110 respectivamente, lo cual hace despreciables los efectos de escala, la representatividad de estos resultados estaría garantizada para prototipos con dimensiones geométricas diez veces mayores.

6. CONCLUSIONES Y APORTACIONES ORIGINALES

A partir de los resultados obtenidos durante la fase experimental y su discusión, se han extraído un conjunto de conclusiones acerca de los efectos que produce la aireación sobre el flujo en rápidas y cuencos de resalto. El análisis de este fenómeno en ambas estructuras del modelo también ha permitido profundizar en la caracterización del comportamiento de la mezcla emulsionada y abrir nuevas líneas de trabajo para mejorar su comprensión.

Además de las conclusiones sobre los efectos de la aireación, también se han obtenido importantes avances en el diseño de la instalación experimental y en las metodologías para determinar las variables del flujo. En este sentido es importante señalar la dificultad que conlleva la medida de la concentración de aire, para la que se han empleado cuatro métodos diferentes en los ensayos.

Las restricciones impuestas por los equipos de alimentación de los caudales de agua y aire han sido un aspecto que ha limitado el volumen de resultados y la posibilidad de caracterizar con más detalle el funcionamiento del flujo emulsionado.

En base a todo esto, las conclusiones principales obtenidas de las investigaciones realizadas en esta tesis son las siguientes y se han estructurado de acuerdo con los objetivos planteados en la tesis:

- Las variables fundamentales que caracterizan el comportamiento de la mezcla son la velocidad, el calado y la concentración. Para determinar el segunda existen multitud de dispositivos cuyos resultados han sido ampliamente calibrados. La medida de concentración de aire requiere instrumental y un desarrollo mucho más complejo.
- De los cuatro métodos de medida de concentración de aire que se han utilizado durante la fase experimental, el más preciso y validado es la sonda óptica, pero se trata de un dispositivo excesivamente delicado, lo que los inhabilita para la medida de concentración en modelo de grandes dimensiones como el LS-EMULSIONA.

Las medidas para determinar la aireación con el sistema de decantación presentan resultados adecuados en zonas de flujo con concentraciones bajas y alta velocidad. Superados ciertos umbrales, este dispositivo no consigue obtener muestras representativas, ya que se pierde continuidad en la conducción y parte del aire es expulsado sin que pueda llegar al cilindro de decantación.

El sistema de análisis de imágenes aún requiere una fase de mejora en la parte de postproceso que permita diferenciar correctamente la parte líquida de las burbujas de aire y obtener perfiles representativos.

Finalmente, el método de la sonda de conductividad proporciona resultados tan precisos como el de la sonda óptica y cuenta con la ventaja de ser un equipo más robusto. Este sistema es el que se ha empleado para la realización de la campaña experimental y la bondad de los resultados se ha contrastado al satisfacer la condición de continuidad en todos los ensayos.

- Los resultados experimentales en la rápida aireada muestran que, a igualdad de condiciones de otras variables hidráulicas, una mayor aireación se traduce en una aceleración del flujo. En este sentido, se ha comprobado que un aumento de concentración de aire en el canal de descarga supone una reducción de la fricción con los contornos. Se ha propuesto, como aportación original en esta tesis, una formulación para caracterizar este fenómeno que permite cuantificar el efecto de la concentración sobre el coeficiente de rugosidad de Manning.
- Se ha comprobado en el resalto hidráulico que, en un rango de números de Froude del flujo de entrada comprendidos entre 6 y 8 y con concentraciones de aire entre 22 y 33 % en el pie de la rápida, no se ha observado ninguna relación del calado conjugado con la aireación.

Tampoco se observa dependencia de la longitud del resalto con la concentración y, por tanto, no se aprecian mejoras en el rendimiento de la amortiguación de energía con mayor aireación del flujo de entrada en el cuenco. Uno de los objetivos de futuros trabajos será comprobar si se da esta dependencia en ensayos con números de Froude mayores y concentraciones más altas.

- En base a los resultados experimentales se ha analizado el esquema dinámico en el resalto hidráulico y se ha comprobado un desequilibrio de fuerzas con respecto a los resultados teóricos de Bélanger. Para contrarrestar este efecto, se ha incluido un nuevo término en la ecuación de equilibrio denominada Fuerza de Reacción del Resalto, que garantiza la estabilidad de acuerdo a los resultados experimentales obtenidos. También se ha propuesto una expresión que permite cuantificar esta fuerza en función del calado y el número de Froude del flujo de entrada, y que supone una nueva aportación original de esta investigación.

- El análisis de esta nueva expresión muestra que esta fuerza tiende a desestabilizar el resalto con números de Froude inferiores a 8, forzando calados conjugados mayores que los de Bélanger. Para valores mayores, cambia de dirección y toma el sentido de salida del resalto, convirtiéndose en estabilizadora.

El origen de la Fuerza de Reacción puede deberse a diferentes razones y podría estar asociada al intercambio de cantidad de movimiento a través de la superficie libre, aunque parece más probable una relación con el efecto de la reacción de los cajeros por la expansión del flujo en cuencos de sección estrecha.

7. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Una vez definidas las principales conclusiones que se deducen de este estudio, se proponen las siguientes líneas de investigación que podrían complementar los trabajos de esta tesis:

- Aumentar el número de ensayos con flujos con mayor concentración en el pie de rápida. Estos escenarios permitirían generar un flujo con una mayor aireación en la entrada del cuenco y comprobar si existe dependencia del resalto hidráulico para rangos de concentración superiores.
- Ampliar el rango de escenarios con números de Froude superiores a 8 en la entrada del cuenco y extender el campo de validez de los resultados. La figura 107 muestra los resultados de ensayos que se han tomado en la campaña donde se han medido velocidades medias al pie de la rápida pero no concentraciones. En este grafico se puede comprobar el cambio de comportamiento del calado conjugado con números de Froude mayores a ocho, que quedan por debajo de la relación teórica de Bélanger.

Figura 107. Ampliación de la relación experimental y teórica de calados adimensionales y Fr_1 el resalto hidráulico

Estos datos no se han incluido en los resultados de esta tesis porque no están asociados a valores de concentración y quedan fuera de su objetivo inicial.

- El Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX está trabajando actualmente en la incorporación del fenómeno de aireación al modelo lagrangiano SPHERIMENTAL, desarrollado por David López. Este trabajo, aún en fase preliminar, pretende utilizar las conclusiones obtenidas en este estudio para desarrollar y calibrar el módulo hidrodinámico para flujos aireados (figura 103).

Figura 108. Análisis del funcionamiento del resalto hidráulico en el modelo físico y numérico (SPHERIMENTAL)

- Analizar con el modelo numérico SPHERIMENTAL la influencia de la anchura del cuenco de amortiguamiento sobre la Fuerza de Reacción del Resalto (F_{RR}) y cuantificar la magnitud de la desviación de los resultados experimentales con los teóricos de Bélanger.

8. REFERENCIAS

ABB. <<https://new.abb.com/es>>

BACZEWSKI, B. (1985). Development of a laser-fluorometer for local concentration measurements in flows. *XXI IAHR World Congress*, vol.5, pp.1-6, Melbourne (Australia).

BAI, R., ZHANG, F., LIU, S., WANG, W. (2016). Air concentration and bubble characteristics downstream of a chute aerator. *International Journal of Multiphase Flow*. 87, pp. 156–166.

BAI, R., ZHANG, F., LIU, S., WANG, W. (2018). Experiments on Turbulence Intensity and Bubble Frequency in Self-Aerated Open Channel Flows. *Water*, Vol. 10, pp. 1201. (<https://doi.org/10.3390/w10091201>).

BAYÓN BARRACHINA, A.B. (2015). Generación de resaltos hidráulicos de alto número de Froude a partir de regímenes rápidos emulsionados. Una investigación experimental. *Revista Ingeniería del Agua*, Madrid (España).

BÉLANGER, J.B. (1841). Notes sur l'Hydraulique. *Ecole Royale des Ponts et Chaussées*, Paris (Francia), session 1841-1842, 223.

BOES, R.M. (2000). Scale effects in modelling two-phase stepped spillway flow. *Balkema Publ.*, pp. 53–60, Rotterdam (Países Bajos).

BOMBARDELLI, F. A., BUSCAGLIA, G. C., REHMANN, C. R., RINCÓN, L. E., AND GARCÍA, M. H. (2007). Modelling and scaling of aeration bubble plumes: a two-phase flow analysis. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 45(5), pp. 617-630.

BOURDARIAS, C., ERSOY, M., GERBI, S. (2009). Air entrainment in transient flows in closed water pipes: A two-layer approach. *ESAIM Mathematical Modelling and Numerical Analysis*, 47. (<https://doi.org/10.1051/m2an/2012036>).

BUNG, D.B. (2011). Non-intrusive Measuring of Air-water Flow Properties in Self-aerated Stepped Spillway Flow. *Proceedings of the XXXIV IAHR World*, Brisbane (Australia).

BUNG, D.B., VALERO, D. (2016). Development of the interfacial air layer in the non-aerated region of high-velocity spillway flows. Instabilities growth, entrapped air and influence on the self-aeration onset. *International Journal of Multiphase Flow*. 84. pp.66-74.

BUREAU OF RECLAMATION (1960). Diseño de Presas Pequeñas. *US Department of the Interior*. 3ª Ed (1977). Washington (US).

BÜRKERT IBÉRICA SAU: <<https://www.burkert.es/es/Empresa-y-carrera/Empresa/>>

BUSCAGLIA, G., BOMBARDELLI, F., GARCIA, M. (2002). Numerical modeling of large-scale bubble plumes accounting for mass transfer effects. *International Journal of Multiphase flow*, 28(11), pp.1763– 1785.

CAIN, P., WOOD, I.R. (1981). Measurements of Self-aerated Flow on a Spillway. *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, 107, HY11, pp. 1425-1444, Nueva York (USA).

CARRILLO, J. M. (2014). Metodología numérica y experimental para el diseño de los cuencos de disipación en el sobrevertido de presas de fábrica. Ph.D. Thesis, *Universidad Politécnica de Cartagena*, Cartagena (España).

CARRILLO, J. M., CASTILLO, L. G., GARCÍA, J. T., MARCO, F. (2017). Resaltos hidráulicos al pie de aliviaderos de vertido libre. *V Jornadas de Ingeniería del Agua*, ISBN 978-84-9749-670-4, Universidad da Coruña, A Coruña (España).

CASTILLO, L. G. (2006). Aerated jets and pressure fluctuation in plunge pools. *VII Int. Conf. on Hydrosience and Engineering (ICHE-2006)*, Philadelphia (USA).

CHANSON, H. (1990). Study of air demand on spillway aerator. *Journal of Fluids Engineering*, 112, pp. 343–350.

CHANSON, H. (1992a). Air Entrainment in Chutes and Spillways. *Research Report No. CE 133*, Department of Civil Engineering, University of Queensland (Australia).

CHANSON, H. (1992b). Uniform Aerated Chute Flow. Discussion. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 118(6), pp. 944-945.

CHANSON, H. (2002). Air-water measurements with intrusive phase–detection probes: Can we improve their interpretation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128, pp. 252–255, Nueva York (USA).

CHANSON, H. (2008). Advective Diffusion of Air Bubbles in Turbulent Water Flows. *Fluid Mechanics of Environmental Interfaces*, Taylor & Francis, Chapter 7, pp. 163-196, C. Gualtieri and D.T. Mihailovic Editors, Leiden (Países Bajos).

- CHANSON, H. (2009). Development of the Bélanger equation and backwater equation by JeanBaptiste Bélanger (1828). *Journal of Hydraulic Engineer*, 135(3), pp. 159-163.
- CHANSON, H. (2013). Hydraulics of aerated flows: qui pro quo? *Journal of Hydraulic Research*. 51, pp. 223-243.
- CHANSON, H., CHACHEREAU, Y. (2015). Scale Effects Affecting Two-Phase Flow Properties in Hydraulic Jump with Small Inflow Froude Number. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 45, pp. 234–242.
- CONCELLO DO PEREIRO DE AGUIAR. <<http://www.concelloperreiro.com/>>
- DOUMA, J.H. (1940). Testing theoretical losses in open channel flow 1: Superelevation at bends. *Civil Engineering*, 12(11), pp. 613-615.
- EHRENBERGER, R. (1926). Wasserbewegung in steilen Rinnen (Susstennen) mit besonderer Berücksichtigung der Selbstbelüftung. Zeitschrift des Österreichischer Ingenieur und Architektverein. No. 78 (15/16) and 155-160 (17/18). (Movimiento de agua en rápidas con grandes pendientes teniendo en cuenta el arrastre de aire).
- ERVINE, D.A. (1976). The entrainment of air in water. *International Water Power and Dam Construction*, 28(12), pp. 27– 30.
- FALVEY, H. T. (1979). Mean air concentration of self-aerated flows. *Journal of the Hydraulics Division*, 1979. 105 (1), pp. 91-96.
- FALVEY, H. (1980). Air-water flow in hydraulic structures. *NASA STI / Recon Technical Report*, N. 81.
- FALVEY, H. (1990). Cavitation in Chutes and Spillways. *U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation*. Denver (USA).
- FERNÁNDEZ-BONO, J.F., VALLÉS-MORÁN, F.J. (2006). Criterios metodológicos de adaptación del diseño de cuencos de disipación de energía a pie de presa con resalto hidráulico a caudales superiores a los de diseño. *IAHR XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Ciudad Guayana (Venezuela).
- FERNÁNDEZ-LÓPEZ, C. (2013). Estudio estadístico del inicio del movimiento en las protecciones contra la erosión en obras fluviales. Diseño de las instalaciones y experimentos

con aplicación a pilas de puente y protección de orillas. Master's Thesis, *Universitat Politècnica de Catalunya*, Barcelona (España).

FOROEMBALSES. <<https://foroembales.net/>>

FRANKOVICH, A. (1953). Head loss and air entrainment by flowing water in steep chutes. *Proceedings IAHR*, pp. 467-476, Rotterdam (Países Bajos).

GID PERSONAL PRE AND POST PROCESSOR: <<https://www.gidhome.com/>>

GUTIÉRREZ SERRET, J.R. (1994). Aireación en las Estructuras Hidráulicas de las Presas: Aplicación a Aliviaderos. Ph.D. Thesis, *Universidad Politécnica de Madrid*, Documento 360718, Madrid (España).

GUTIÉRREZ SERRET, J.R., PALMA VILLALON, A. (1995). Aireación en las estructuras hidráulicas de las presas: aliviaderos y desagües profundos. *Premio José Torán*, CNE, ICOLD, Madrid (España).

HAGER, W. H. (1992). Energy Dissipators and Hydraulic Jump. *Water Science and Technology Library*, Kluwer Academic Publishers, Rotterdam (Países Bajos).

HALL, L. S. (1943). Open Channel Flow at High Velocities. *Transactions ASCE*, Paper No. 2205, Vol. 108, pp. 1394.

HAY, N. Y WHITE, P.R.S. (1975). Effects of air pollutants on the performance of stilling basins. XVI IAHR World Congress, vol. 2. 2, pp.363-372, Sao Paulo (Brasil).

HERBRAND, K. (1969). Der Wechselsprung unter dem Einfluss der Luftbeimischung (El resalto hidráulico bajo la influencia de mezclas con aire). *Die Wasser wirtschaft*, pp. 254-260, Berlín (Alemania).

HICKOX, G.H. (1945). Air Entrainment in Spillway Faces. *U.S. Civil Engineering*, 15(12), pp. 562-563.

HINZE, J.O., MILBORN, H. (1950). Atomization of liquids by means of a rotating cup. *Journal of Applied Mechanics*, 17, pp. 145–153.

HOUK, I. E., (1927). New design features in Willwood diversion Dam. *Engineering News-Record* 99(17), pp. 660-664, Nueva York (USA).

- HOPPING, P.N., MASS, G. R. (1987). Cavitation Damage on the Karun Dam. 9(3). pp. 41-48.
- HYDRAULIC INSITUTE (1998). American national standard for centrifugal and vertical pump intake design (ANSI/HI 9.8). *Hydraulic Institute Ed.*, ISBN: 1880952262, Nueva Jersey (USA).
- INCYTH (1985). Incorporation de Aire y presiones fluctuantes en el aliviadero de la Presa Alicura. *LHA-055-01-85*, Ezeiza (Argentina).
- INGEOEXPERT. <<https://ingeoexpert.com/articulo/sistema-hidraulico-presas/>>
- JACOBS, M.L. (1997). Air Concentration Meter Electronics Package Manual; Project Notes 8450-98-01 1997. *U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation*. Denver (USA).
- JEVDJEVICH, V., LEVIN, L. (1953). Entrainment of Air in flowing Water and Technical Problems connected with it. *V IAHR World Congress, IAHR-ASCE*, Minnesota (USA).
- KILLEN, J. M. AND ANDERSON, A.G. (1969). A Study of the Air Water Interface in Air Entrained Flow in Open Channels. *Proceeding XIII Congress of International Association for Hydraulic Research*, Pp. 229-247, Tokio (Japón).
- KOBUS, H. (1984). Local air entrainment and detrainment. *IAHR/DVWK Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures*, 4(10), pp.1–10, Esslingen (Germany).
- KOEN, J. (2017). Artificial Aeration on Stepped Spillways with Piers and Flares to Mitigate Cavitation Damage. Master's Thesis, *Stellenbosch University*, Stellenbosch (Sudáfrica).
- KRAMER, K., HAGER, W. (2005). Air Transport in chute flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 31, pp. 1181–1197.
- LAMB, O. P., KILLEN, J. M. (1950). An Electrical Method for Measuring Air Concentration in Flowing Air-Water Mixtures. *St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory*. Retrieved from the University of Minnesota Digital Conservancy, <http://hdl.handle.net/11299/107905>, Minnesota (USA).
- LANE, E. W., (1936). Recent Studies on Flow Conditions in Steep Chutes. *Engineering News-Record*, Vol. 116 (1), pp. 5-7, Nueva York (USA).
- LEANDRO, J., LOPES, P., SHUCKSMITH, J., CARVALHO, R., RUBINATO, M. (2014). Air-entrainment characterization and velocities profiles in a scaled circular manhole. *XIII International Conference on Urban Drainage*, At Sarawak (Malasia).

LEVIN, L. (1995). Quelques reflexions sur la mecanique de léncoulement des melanges d'eau et d'air. *La Houille blanche*, 11 (8), pp 555-558, Paris (Francia).

LUDIN, A. (1928). Estudio y proyecto de las centrales Ryburg- Schwörstadt (Alemania).

LUNA-BAHENA, J.C., POZOS-ESTRADA, O., ORTIZ-MARTÍNEZ, V.M., GRACIA-SÁNCHEZ, J. (2018). Experimental Investigation of Artificial Aeration on a Smooth Spillway with a Crest Pier. *Water* 2018, 10, pp.1383, (<https://doi.org/10.3390/w10101383>).

MANNING, R. (1891). On the flow of water in open channels and pipes. *Institution of Civil Engineers of Ireland*, 20, 161–207, Dublín (Irlanda).

MARCANO, A., CASTILLEJO, H. (1984). Model-prototype comparison of aeration devices of Guri Spillway. *Proceedings of the Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures*, Kobus, H., Ed., Technische Akademie Esslingen, Esslingen am Neckar (Alemania).

MARCANO, M. (2005). Minimum operating level for the Guri reservoir. *International journal on hydropower and dams*, ISSN 1352-2523, 5, 2005, pp. 47-51.

MATEOS, C. (1991). Aireación y Cavitación en Obras de Desagüe. *Curso sobre comportamiento hidráulico de las estructuras de desagües de presas*, CEDEX, Madrid (España).

MATEOS, C., ELVIRO, V. (1998). Estudio y ensayo en modelo reducido de los aliviaderos escalonados. *Informe CEDEX*, Clave: 41-492-1-028, Madrid (España)

MATOS, J. (2002). Roller compacted concrete and stepped spillways. From new dams to dam rehabilitation. Preprints of the International Congress on Conservation and Rehabilitation of Dams, Balkema Ed., pp.553-560, Madrid (España).

MOÑINO, A., RIERA, J. (2002). On incipient aerated flow in chutes and spillways. *Journal of Hydraulic Research*. 40(1), 95–97.

MURZYN, F., CHANSON, H. (2009). Free-Surface Fluctuations in Hydraulic Jumps: Experimental Observations. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33(7), pp. 1055-1064 . (DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2009.06.003) (ISSN: 0894-1777).

NORTEK ESPAÑA. <<http://www.nortek-es.com/es/producto/velocimetros/vectrino-ii>>

OXFORD LASER: <<https://www.oxfordlasers.com/>>

PFISTER, M.; CHANSON, H. (2014). Two-phase air-water flows: Scale effects in physical modelling. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014, 26, pp. 291–298.

PINTO, N.L.DE S. (1989). Designing aerators for high velocity flow. *International Water Power and Dam Construction*, pp. 44-48, Londres (Reino Unido).

RAJARATNAM, N. (1967). Hydraulics jumps. *Advances in Hydrosience, Ven Te Chow Ed.*, Academic Press, 4, pp. 197-281. ISSN 0065-2768 (<https://doi.org/10.1016/B978-1-4831-9935-1.50011-2>), Londres (Reino Unido).

RAO, S.G., RAMAPRASAD (1966). Application if Momentum Equation in the Hydraulic Jump. *La Houille Blanche*, 21(4). 451-453, Paris (Francia).

RAO, N., KOBUS, H. (1975). Characteristics of self-aerated free-surface flows. *Water Waste Water Current Research and Practice*, Nº 10 (Resumido por Lencastre 1985).

RBI-INSTRUMENTATION: <<http://rbi-instrumentation.com/probes.html>>

REBOLLO, J.J., LÓPEZ, D., GARROTE, L., RAMOS, T., DÍAZ, R., HERRERO, R. (2019). Experimental Analysis of the Influence of Aeration in the Energy Dissipation of Supercritical Channel Flows. *Water*. Vol. 11(3), (<https://doi.org/10.3390/w11030576>).

RIERA, J. (1988). Soluciones técnicas en los órganos de desagüe de la presa de Canales (Granada). *II Jornadas Técnicas Españolas de Presas*. Comité Nacional Español de Grandes Presas, MOPU, DGOH, Tomo II. pp .194-215, Sevilla (España).

RS-COMPONENTS LTD: <<https://es.rs-online.com/>>

SEMENKOV, V. M., LENTJAEV, L. D., (1973). Spillway Dams with Aeration of the Flow over Spillways, *International Commission on Large Dams, XI Congress*, Madrid (España).

SMC CORPORATION: <<https://www.smc.eu/>>

STRAUB, L.G. Y ANDERSON A. G. (1958). Mecánica de los fluidos. *Mc Graw-Hill*. México DC (México)

TECHNOINDUSTRIA. <<https://technoindustria.wordpress.com/>>

THOMAS, H.H. (1976). The Engineering of Large Dams. John Wiley & Sons, Volumen 2, Londres (Reino Unido).

VAIDELIENĖ, A., TERVYDIS, P. (2012). Measurement of Air Bubbles Concentration in the Water by Means of Digital Image Processing. *Electronics and Electrical Engineering*. 19. (<https://doi.org/10.5755/j01.eee.19.4.1846>).

VALERO, D., FULLANA, O., GACÍA-BARTUAL R., ANDRÉS-DOMENECH, I., VALLES, F. (2014). Analytical formulation for the aerated hydraulic jump and physical modelling comparison. III IAHR European Congress, Porto (Portugal).

VALLÉS-MORÁN, F.J., VALERO HUERTA, D., MARCO SEGURA, J.B. (2015). La aireación forzada del flujo en la rápida como herramienta para la adaptación de los cuencos amortiguadores a mayores caudales de diseño. *X Jornadas Españolas de Presas*, SPANCOLD, Sevilla (España)

VIPARELLI, M. 1951. Premessa ad una ricerca sulle corrent rapide. *L'Energia Elettrica*, 31 (6), pp. 393-405.

VOLKART, P. (1980). The mechanism of air bubble entrainment in self-aerated flow. *International Journal of Multiphase Flow*, ISSN: 0301-9322, 6(5), pp. 411-423 ([https://doi.org/10.1016/0301-9322\(80\)90003-8](https://doi.org/10.1016/0301-9322(80)90003-8)).

VOLKART, PETER. (1982). Self-aerated flow in steep, partially filled pipes. *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, 108, pp.1029-1046.

WOOD, I.R. (1983). Uniform Region of Self-Aerated Flow. *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE, 109(3), pp. 447-461, Nueva York (USA).

WOOD, I.R. (1983). Uniform Region of Self-Aerated Flow. *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE, 109(3), pp. 447-461.

WOOD, I. R. (1991). Air Entrainment in Free-Surface Flows. *IAHR Hydraulic Structures Design Manual No. 4*, Hydraulic Design Considerations, Balkema Publ., Rotterdam (Países Bajos).

XIANGYANG, L., CHAO, Y., SHIFANG, Y. GUOZHENG L. (2012). Fiber-Optical Sensors: Basics and Applications in Multiphase Reactors. *Sensors*, 12, 12519-12544; ISSN 1424-8220 (<https://doi.org/10.3390/s120912519>).