

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

“ESTUDIO EN MODELO FÍSICO SOBRE VÓRTICES DE SUPERFICIE LIBRE AFECTADOS POR EL PERFIL DE ENTRADA EN TOMAS HORIZONTALES SUMERGIDAS”

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR:

ÁNGEL MARTÍN RINCÓN RODRÍGUEZ

ASESOR:

Dr. ING. JULIO MARTÍN KUROIWA ZEVALLOS

Lima – Perú

2023

© 2023, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir de la Tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos.”**

Rincón Rodríguez, Ángel Martín

angel.rincon.r@uni.pe

969734177

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mi madre, por demostrarme siempre su amor y apoyo incondicional a lo largo de esta travesía. A mis hermanas por alegrar mis días y motivarme a seguir adelante. A mi padre, a pesar de nuestra distancia física, siento que ésta conmigo siempre y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos, sé que este momento hubiera sido tan especial para él como lo es para mí.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por brindarme fuerzas para superar obstáculos y dificultades a lo largo de mi vida, por haberme dado la familia que tengo, de quienes valoro el apoyo incondicional en cada decisión que he tomado.

En relación al plano académico quiero expresar que la investigación pocas veces se debe al trabajo individual, más detrás existe siempre una importante labor de otras personas, que aportan su experiencia y colaboración. Son numerosas las personas que de una u otra forma han contribuido a la elaboración de esta Tesis, resultando una tarea difícil enumerarlas a todas, sin embargo, no puedo dejar de mencionar al Dr. Julio Martín Kuroiwa Zevallos, director del Laboratorio Nacional de Hidráulica durante la realización de la presente investigación, por su valiosa orientación y asesoramiento durante todo el proceso de desarrollo de la tesis a través de su amplia experiencia como Ingeniero e Investigador, al Ing. Erick Claros Chagua por el gran apoyo brindado para el desarrollo de la tesis.

Al Laboratorio Nacional de Hidráulica “Alfonso Alcedán la Cruz” de la Universidad Nacional de Ingeniería por el apoyo brindado para el desarrollo de la presente investigación que surgió en colaboración con el proyecto titulado: “Evaluación de dispositivos para la reducción de vórtices en una toma sumergida de centrales hidroeléctricas”, registrado con el número de expediente 50535-2020 y financiado por el Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería.

ÍNDICE

RESUMEN	4
ABSTRACT	6
PRÓLOGO	8
LISTA DE TABLAS	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	15
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	16
1.1 ANTECEDENTES	16
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.3 OBJETIVOS	20
1.3.1 Objetivo General	20
1.3.2 Objetivos Específicos	20
1.4 HIPÓTESIS	20
1.5 METODOLOGÍA DE TRABAJO	20
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	23
2.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES	23
2.1.1 Vórtices	23
2.1.2 Tipo de vórtices	24
2.1.3 Circulación (Γ)	25
2.1.4 Vorticidad (ω)	26
2.1.5 Sumersión (S)	26
2.1.6 Perfiles de entrada en tomas sumergidas	26
2.1.7 Toma sumergida	26
2.2 PRINCIPALES EXPRESIONES DE CÁLCULO	26
2.2.1 Vorticidad (ω)	26
2.2.2 Número de Froude (Fr)	27
2.2.3 Número de Reynolds (Re)	27
2.2.4 Número de Weber (We)	27
2.2.5 Criterios para el cálculo de sumersión	28
2.2.5.1 <i>Criterio de Gordon (1970)</i>	28
2.2.5.2 <i>Criterio de Pennino y Hecker (1980)</i>	28
2.2.5.3 <i>Criterio de Knauss (1987)</i>	29

2.2.5.4	<i>Criterio de Gulliver, Rindels y Lindblom (1984)</i>	29
2.2.5.5	<i>Criterio de Zubiatur (2011)</i>	30
2.2.5.6	<i>Criterio de Apaza (2012)</i>	30
2.3	ANÁLISIS DIMENSIONAL DE VARIABLES	31
2.4	EFFECTOS DE ESCALA	32
2.5	PÉRDIDA DE CARGA	34
2.5.1	Pérdida de carga continua (h_f)	35
2.5.2	Pérdida de carga local (h_L)	36
2.5.2.1	<i>Entrada a tubería sumergida</i>	36
CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO		41
3.1	DESCRIPCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA	41
3.1.1	Funcionamiento Hidráulico	43
3.2	EQUIPOS	44
3.3	PERFILES DE LA TOMA SUMERGIDA	45
3.3.1	Perfil de arista viva	45
3.3.2	Perfil acampanado	46
CAPÍTULO IV: EJECUCIÓN DE ENSAYOS Y RECOLECCIÓN DE DATOS		49
4.1	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	49
4.2	ENSAYOS UTILIZANDO EL PERFIL DE ARISTA VIVA (RECTO)	50
4.2.1	Clasificación de vórtices	51
4.2.2	Registro de sumersión relativa	59
4.2.3	Pérdida de carga local	62
4.3	ENSAYOS UTILIZANDO EL PERFIL ACAMPANADO	64
4.3.1	Clasificación de vórtices	65
4.3.2	Registro de sumersión relativa	72
4.3.3	Pérdida de carga local	75
CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		77
5.1	RESPECTO A LA CLASIFICACIÓN DE VÓRTICES	77
5.2	RESPECTO A LA RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE FROUDE Y LA SUMERSIÓN RELATIVA.	79
5.3	RESPECTO A INVESTIGACIONES PASADAS.	81
5.3.1	Criterio de Gordon (1970)	81

5.3.2	Criterio de Pennino y Hecker (1980)	82
5.3.3	Criterio de Knauss (1987)	82
5.3.4	Criterio de Zubiaur (2011)	83
5.3.5	Criterio de Apaza (2012)	86
5.4	RESPECTO A EFECTOS DE ESCALA	87
5.5	RESPECTO AL COEFICIENTE DE PÉRDIDA LOCAL	89
	CONCLUSIONES	93
	RECOMENDACIONES	95
	BIBLIOGRAFÍA	96
	ANEXO A: TABLAS DE DETALLES	99
	ANEXO B: VIDEOS GRABADOS	103

RESUMEN

Se realizó un estudio experimental para evaluar la influencia de la geometría del perfil de entrada a una toma sumergida sobre la formación de vórtices que arrastran aire.

Se instalaron dos perfiles diferentes de tomas en un tanque rectangular y transparente. El primero era una entrada de arista viva, mientras que el segundo era una entrada de perfil acampanado.

En el diseño del modelo experimental se consideraron las recomendaciones de Anwar (1968), Daggett & Keulegan (1974) y Jain et al. (1978) para evitar los efectos de escala.

El caudal y la sumersión se variaron a lo largo de las pruebas para obtener una amplia gama de números de Froude y de sumersiones relativas. El número de Froude en la tubería se definió como la relación entre la velocidad media de la tubería forzada y la raíz del producto de la aceleración de la gravedad por el diámetro o dimensión característica de la tubería forzada. La sumersión relativa se consideró como la relación entre la sumersión (profundidad medida desde la superficie del agua hasta la parte superior de la tubería forzada) y el diámetro interno de la toma sumergida.

Los resultados finales se visualizaron en diagramas adimensionales del número de Froude frente a la sumersión relativa. En cada ensayo se evaluaron los vórtices según la clasificación planteada por Sarkardeh et al. (2010). El vórtice tipo C sólo forma una depresión ligeramente perceptible en la superficie del agua y no arrastra aire hacia la toma sumergida. Siempre que se observó este tipo de vórtice durante los ensayos, o no se observó ninguna depresión, en el diagrama de sumersión relativa frente al número de Froude se consideró que las condiciones de flujo se encontraban dentro de la zona segura de vórtices que no arrastran aire.

Se concluyó que la geometría del ingreso a la toma sumergida influye en la formación de vórtices que arrastran aire hacia la toma forzada. Cuando se compararon los resultados de los experimentos realizados con entradas de arista viva y entradas de perfil acampanado, se necesitaron mayores sumersiones relativas para evitar la formación de vórtices que arrastran aire cuando se instaló una entrada de arista viva para el mismo rango de números de Froude.

Además, se midió la caída de presión causado por la geometría del perfil de entrada a la tubería forzada con la finalidad de calcular el coeficiente de pérdida de carga local. Los valores determinados de los coeficientes de pérdida de carga local, para las entradas de arista viva y de perfil acampanado, fueron de 0,70 y 0,15, respectivamente.

ABSTRACT

An experimental study was carried out to evaluate the influence of the geometry of the inlet profile to a submerged intake on the formation of vortices that entrain air.

Two different intake profiles were installed in a rectangular and transparent tank. The first was a sharp-edged doorway, while the second was a bell-shaped doorway.

In the design of the experimental model, the recommendations of Anwar (1968), Daggett & Keulegan (1974) and Jain et al (1978) were considered to avoid scale effects.

Flow and submergence were varied throughout the tests to obtain a wide range of Froude numbers and relative submergences. The Froude number in the pipeline was defined as the ratio between the mean velocity of the penstock and the root of the product of the acceleration of gravity multiply by the diameter or characteristic dimension of the penstock. Relative submergence was considered as the ratio between submergence (depth measured from the water surface to the top of the penstock) and the internal diameter of the submerged intake.

The final results were visualized in dimensionless plots of the Froude number versus relative submergence. In each trial, the vortices were evaluated according to the classification proposed by Sarkardeh et al. (2010). The Type C vortex forms only a slightly perceptible depression in the water surface and does not draw air into the submerged intake. Whenever this type of vortex was observed during testing, or no depression was observed, the flow conditions were considered to be within the safe zone for non-entraining vortices on the relative submergence vs. Froude number plot.

It was concluded that the geometry of the entrance to the submerged intake influences the formation of vortices that drag air towards the forced intake. When comparing the results of experiments performed with sharp-edged and flared inlets, higher relative submergences were needed to prevent the formation of entraining vortices when a sharp-edged inlet was installed for the same range of Froude numbers.

In addition, the pressure drop caused by the geometry of the penstock inlet profile was measured in order to calculate the local pressure loss coefficient. The determined values of the local pressure loss coefficients, for the sharp edge and flared profile entries, were 0,70 and 0,15, respectively.

PRÓLOGO

Uno de los problemas que se puede presentar en una central hidroeléctrica es el ingreso de burbujas de aire a la tubería forzada y que, al implosionar cerca de las paredes de la tubería o de otros componentes de la central puede generar presiones en el orden de Gigapascales y causar daños serios y pérdidas económicas.

Se han desarrollado algunas investigaciones relacionadas a prevenir la formación de vórtices y que estaban orientadas a determinar el sumergimiento mínimo que impide la formación de vórtices. Asimismo, se ha investigado el uso de dispositivos para reducir la formación de éstos en la entrada de tomas sumergidas, incluyendo algunas desarrolladas en el Laboratorio Nacional de Hidráulica de la UNI. Poco se ha investigado sobre la influencia de la geometría de la toma en la formación de vórtices.

La presente tesis ha sido desarrollada por el bachiller Ángel Martín Rincón Rodríguez para comparar el efecto de la forma de la entrada del conducto y la geometría de la toma, en general, en la formación de vórtices en un estudio experimental. Se compara una entrada de tipo redondeada (llamada abocinada) con una entrada de arista viva. En la tesis desarrollada por el Sr. Rincón se ha evidenciado una diferencia en el comportamiento de ambas geometrías. Asimismo, se ha estimado el coeficiente de pérdida de carga en cada geometría.

El autor de este prólogo espera que esta investigación pueda sea difundida internacionalmente y sirva como base para mejorar los diseños en las centrales hidroeléctricas.

Dr. Julio M. Kuroiwa Zevallos
Docente Principal TC
Departamento Académico de Hidráulica e
Hidrología – Facultad de Ingeniería Civil -
UNI

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
N°	Título	N°
1	Clasificación de vórtices generados en los ensayos con el perfil de arista viva. (Fuente: Elaboración propia)	51
2	Registro de datos correspondiente a los ensayos con el perfil de arista viva. (Fuente: Elaboración propia)	60
3	Registro de presiones en los ensayos con el perfil de arista viva. (Fuente: Elaboración propia)	63
4	Clasificación de vórtices generados en los ensayos con el perfil acampanado. (Fuente: Elaboración propia)	65
5	Registro de datos correspondiente a los ensayos con el perfil acampanado. (Fuente: Elaboración propia)	73
6	Registro de presiones en los ensayos con el perfil acampanado. (Fuente: Elaboración propia)	75
7	Comparación de resultados de acuerdo al criterio de Gordon (1970)	81
8	Comparación de resultados de acuerdo al criterio de Pennino y Hecker (1980)	82
9	Comparación de resultados de acuerdo al criterio de Knauss (1987)	83
10	Comparación de resultados de acuerdo al criterio de Zubiaur (2011)	84
11	Comparación de resultados de acuerdo al criterio de Apaza (2012)	87
12	Comparación entre coeficientes de pérdida carga local en la entrada a la toma sumergida	92

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
N°	Título	N°
1	Clasificación de vórtices tipo A, B y C. Extraído y Traducido de Sarkardeh et al. (2010)	17
2	Esquema de sumersión Crítica.	19
3	Campo de velocidades en una toma horizontal sumergida	23
4	Vórtice tipo 1, remolino superficial. Hecker (1981)	24
5	Vórtice tipo 2, superficie con hoyuelo. Hecker (1981)	24
6	Vórtice tipo 3, superficie con hoyuelo y remolino. Hecker (1981)	24
7	Vórtice tipo 4, con arrastre de material flotante, pero no aire. Hecker (1981)	24
8	Vórtice tipo 5, con arrastre de burbujas de aire. Hecker (1981)	25
9	Vórtice tipo 6, con entrada completa de un núcleo de aire. Hecker (1981)	25
10	Esquema típico de sumersión (S). Rindels and Gulliver (1983)	26
11	Pérdida de carga (H).	35
12	Abaco de Moody	36
13	Esquema de entrada a una tubería sumergida.	37
14	Diagrama para determinar coeficiente de pérdida de carga local. Entrada de arista viva. Fuente: Idel’Cik (1969)	38
15	Diagrama para determinar coeficiente de pérdida de carga local. Entrada Acampanada Fuente: Idel’Cik (1969)	40
16	Esquema del modelo hidráulico.	42
17	Dimensiones del perfil de arista viva (recto)	45

Figura N°	Título	Página N°
18	Dimensiones del perfil acampanado.	47
19	Fr vs S/D. Clasificación de vórtices (perfil de arista viva).	53
20	Registro del vórtice generado con una sumersión de 17.3 cm para un caudal de 10.46 l/s (ensayo con perfil de arista viva)	54
21	Registro del vórtice generado con una sumersión de 13.6 cm para un caudal de 10.75 l/s (ensayo con perfil de arista viva)	54
22	Registro del vórtice generado con una sumersión de 20.8 cm para un caudal de 10.75 l/s (ensayo con perfil de arista viva)	55
23	Registro del vórtice generado con una sumersión de 17.3 cm para un caudal de 11.77 l/s (ensayo con perfil de arista viva)	55
24	Registro del vórtice generado con una sumersión de 29.4 cm para un caudal de 11.77 l/s (ensayo con perfil de arista viva)	56
25	Registro del vórtice generado con una sumersión de 18.9 cm para un caudal de 15.18 l/s (ensayo con perfil de arista viva)	56
26	Registro del vórtice generado con una sumersión de 31.8 cm para un caudal de 15.18 l/s (ensayo con perfil de arista viva)	57
27	Registro del vórtice generado con una sumersión de 21.9 cm para un caudal de 16.99 l/s (ensayo con perfil de arista viva)	57
28	Registro del vórtice generado con una sumersión de 29.4 cm para un caudal de 16.99 l/s (ensayo con perfil de arista viva)	58

Figura N°	Título	Página N°
29	Registro del vórtice generado con una sumersión de 19.6 cm para un caudal de 19.94 l/s (ensayo con perfil de arista viva)	58
30	Registro del vórtice generado con una sumersión de 25.3 cm para un caudal de 20.98 l/s (ensayo con perfil de arista viva)	59
31	Registro del vórtice generado con una sumersión de 29.2 cm para un caudal de 20.98 l/s (ensayo con perfil de arista viva)	59
32	Fr vs S/D. Registro de Ingreso de aire (perfil de arista viva).	61
33	Esquema de ubicación de piezómetros.	62
34	Relación entre la variación de presión vs la presión dinámica (perfil de arista viva)	64
35	Fr vs S/D. Clasificación de vórtices (perfil acampanado)	66
36	Registro del vórtice generado con una sumersión de 16.9 cm para un caudal de 10.46 l/s (ensayo con perfil acampanado)	67
37	Registro del vórtice generado con una sumersión de 12.8 cm para un caudal de 10.75 l/s (ensayo con perfil acampanado)	68
38	Registro del vórtice generado con una sumersión de 20.1 cm para un caudal de 10.75 l/s (ensayo con perfil acampanado)	68
39	Registro del vórtice generado con una sumersión de 28.5 cm para un caudal de 11.77 l/s (ensayo con perfil acampanado)	69
40	Registro del vórtice generado con una sumersión de 11.5 cm para un caudal de 13.98 l/s (ensayo con perfil acampanado)	69

Figura N°	Título	Página N°
41	Registro del vórtice generado con una sumersión de 17.4 cm para un caudal de 15.18 l/s (ensayo con perfil acampanado)	70
42	Registro del vórtice generado con una sumersión de 30.2 cm para un caudal de 15.18 l/s (ensayo con perfil acampanado)	70
43	Registro del vórtice generado con una sumersión de 20.1 cm para un caudal de 16.99 l/s (ensayo con perfil acampanado)	71
44	Registro del vórtice generado con una sumersión de 27.4 cm para un caudal de 16.99 l/s (ensayo con perfil acampanado)	71
45	Registro del vórtice generado con una sumersión de 17.3 cm para un caudal de 19.94 l/s (ensayo con perfil acampanado)	72
46	Registro del vórtice generado con una sumersión de 23 cm para un caudal de 20.98 l/s (ensayo con perfil acampanado)	72
47	Fr vs S/D. Registro de Ingreso de aire (perfil acampanado)	74
48	Relación entre la variación de presión vs la presión dinámica (perfil acampanado).	76
49	Tipo de vórtice. (Relación Fr vs S/D)	77
50	Evaluación de vórtices tipo B durante 10 min. (Relación Fr y S/D)	78
51	Evaluación de vórtices tipo B durante 10 min. (Relación Fr y porcentaje de tiempo con ingreso de aire)	79
52	Determinación de zonas donde no se generan vórtices con arrastre de aire hacia la toma sumergida. (Relación Fr vs S/D)	80

Figura N°	Título	Página N°
53	Vista en planta de las naves del desarenador, la cámara de carga y el conducto de baja presión. Las medidas se expresan en metros. Fuente: Zubiaur & Kuroiwa (2012)	85
54	Vista en perfil de la toma sumergida. Las medidas se expresan en metros. Fuente: Zubiaur & Kuroiwa (2012)	86
55	Vista de sección de las tuberías ensayadas. Las medidas se expresan en metros. Fuente: Zubiaur & Kuroiwa (2012)	86
56	Esquema de la tubería sumergida con entrada de arista viva (recto).	89
57	Caída de energía en la entrada de la toma sumergida experimental.	91

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

B	: Distancia desde la entrada a la pared de empotramiento (m)
D	: Diámetro interior de la tubería sumergida (m)
D_H	: Diámetro hidráulico (m), cuatro veces el Radio Hidráulico. Para el caso de una tubería sumergida, $D_H = D_0$
D_0	: Diámetro interno de la tubería (m)
f	: Coeficiente de fricción de Darcy
Fr	: Número de Froude
F_0	: Área de la sección interior de la tubería (m ²)
g	: Aceleración de la gravedad (m/s ²)
h	: Distancia desde la entrada a la pared en frente (m)
h_f	: Pérdida de carga continua o pérdida de carga por fricción (m)
h_L	: Pérdida de carga local (m)
k	: Coeficiente de pérdida de carga local
L	: Longitud de la tubería (m)
Q	: Caudal (l/s)
r	: Radio de curvatura de la sección de entrada (m)
Re	: Número de Reynolds
S	: Sumersión (m)
V	: Velocidad media del flujo (m/s)
We	: Número de Weber
Δh	: Variación total de la carga (m)
δ_1	: Espesor de la pared del tubo (m)
μ	: Viscosidad dinámica (kg/m-s)
ν	: Viscosidad cinemática del agua (m ² /s)
ρ	: Densidad del fluido (kg/m ³)
σ	: Tensión superficial del fluido (N/m)
ω_0	: Velocidad media del flujo (m/s), cociente del caudal sobre área.
ASCE	: American Society of Civil Engineers
PLA	: Ácido poliláctico

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Desde la segunda mitad del siglo pasado un grupo de investigadores ha llevado a cabo una serie de estudios experimentales con el objetivo de dilucidar la complejidad asociada a la estructura y la dinámica del vórtice de superficie libre. Los vórtices de superficie libre en las tomas sumergidas y que atrapan aire en las centrales hidroeléctricas son uno de los temas que han llamado la atención durante décadas de los investigadores por los problemas que pueden causar en los conductos. En las instalaciones hidroeléctricas, el riesgo de aparición de vórtices debe examinarse debido a los efectos perjudiciales para el funcionamiento del sistema. Según la American Society of Civil Engineers (ASCE, 1995), los principales riesgos de formación de vórtices se generan cuando se presentan condiciones como la separación del flujo y la formación de remolinos, las condiciones de aproximación no simétricas, la inmersión insuficiente, la velocidad del flujo de aproximación superior a 0.65 m/s y el cambio repentino de la dirección del flujo.

Los vórtices pueden formarse con diferentes intensidades y propiedades. En la clasificación más reciente de Sarkardeh, Zarrati y Roshan (2010), los vórtices se dividen en tres clases, de acuerdo a sus propiedades, tal como se muestra en la Figura 1. Los vórtices de la clase C son considerados vórtices seguros, en los que se puede observar una débil rotación del flujo o una pequeña depresión en la superficie del agua. En los vórtices de clase B, la rotación del flujo se extiende hasta la entrada de la toma y puede arrastrar escombros o basura hacia la toma. Los vórtices de la clase A se consideran peligrosos y deben evitarse. En esta última clase, las burbujas de aire son arrastradas desde la superficie del agua y son transportadas hasta la toma sumergida, mediante la formación de un núcleo de aire estable en el centro del vórtice.

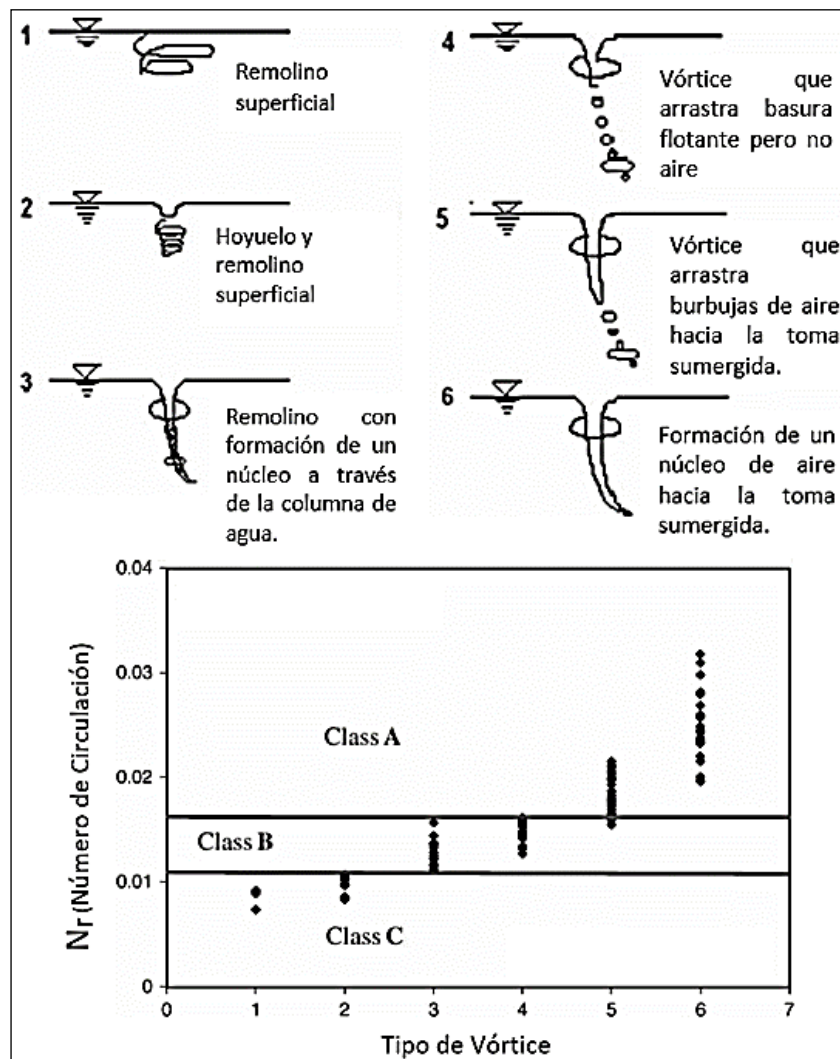


Figura 1: Clasificación de vórtices tipo A, B y C. Extraído y Traducido de Sarkardeh et al. (2010)

Para evitar el arrastre de aire hacia la tubería forzada, la toma sumergida debe situarse a una profundidad suficiente por debajo de la superficie de agua, denominada profundidad crítica de sumersión (S_c). Este último término, es la definición para la profundidad de inicio del arrastre de aire, es decir, la profundidad de sumergimiento medida a partir de la superficie libre del agua hasta la clave de la tubería de toma (Gordon, 1970). Sarkardeh et al. (2010) consideraron la sumersión crítica como la profundidad mínima que impide la formación de vórtices con núcleo de aire. Por lo tanto, de las definiciones dadas por los distintos autores, parece que el consenso general sobre la definición de sumersión crítica es que el vórtice generado debe ser claramente perceptible y también debe arrastrar aire.

Los criterios para hallar la sumersión crítica se desarrollaron principalmente para el tipo de toma cilíndrica, colocada hacia abajo, hacia arriba o en horizontal (Daggett y Keulegan, 1974; Jain, Garde y Ranga Raju, 1978; Knauss, 1987; Hite Jr y Mih, 1994; Borgheei y Kabiri, 2010).

Los estudios sobre la dependencia de la sumersión crítica y los perfiles de entrada en tomas sumergidas horizontales son escasos. Además de la proximidad a los límites (paredes), los perfiles de entrada parecen ser un factor que contribuyen en la formación de vórtices.

Anwar, Weller y Amphlett (1978) realizaron experimentos con la finalidad de determinar el valor de los parámetros adimensionales (Reynolds y Weber) que influyen en la formación de vórtices en una toma sumergida horizontalmente con y sin entrada tipo acampanada, concluyendo que las condiciones de flujo para vórtices de superficie libre en tomas sumergidas sin entrada acampanada, no se ven afectadas por la tensión superficial y la viscosidad del fluido cuando el número de Reynolds y el número de Weber son mayores que 30000 y 10000 respectivamente. Asimismo, las mediciones realizadas con la entrada tipo acampanadas muestran mínimas variaciones, pudiendo considerarse como valores similares en el rendimiento de la formación de vórtices en tomas sumergidas horizontalmente.

Yang, Liu, Bottacin y Lin (2014) estudiaron los efectos de perfiles de entrada en tomas verticales sobre la formación de vórtices de superficie libre, concluyendo que, si se modifica la geometría del ingreso a la toma mediante el redondeo o el corte de los bordes, se producen efectos hidrodinámicos, causando una menor pérdida de carga al ingreso de la toma y un mejor patrón de flujo.

Tastan y Yildirim (2018) investigaron los efectos de diferentes geometrías de entrada en tomas sumergidas sobre la sumersión crítica, concluyendo que cada flujo y condición geométrica genera sus propias distribuciones de vorticidad y velocidad. Por lo tanto, la magnitud de la circulación, la aparición de vórtices y la sumersión crítica difieren para diferentes condiciones de flujo y geometría.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La formación de vórtices que atrapan aire es un problema recurrente en grandes presas y cámaras de carga de centrales hidroeléctricas. Las burbujas de aire que

ingresan a los sistemas presurizados, como las tomas sumergidas, pueden generar serias consecuencias sobre la operatividad y seguridad del sistema y máquinas hidráulicas.

Estos efectos pueden incluir una reducción en la eficiencia de las turbinas y bombas, un comportamiento inestable del flujo, una reducción en el flujo de toma por la presencia de burbujas de aire y, en algunos casos, el daño por cavitación, vibración y corrosión de elementos del sistema. Möller, Detert y Boes (2015) manifestaron que una tasa de arrastre de aire del 1.5 % de ingreso hacia las tomas sumergidas conllevan una reducción de la eficiencia del sistema de hasta 16 %.

Si la sumersión crítica (S_{cr}) se define como la profundidad de agua medida desde la parte superior de la toma (clave de la tubería) hasta la superficie libre del agua para que comience el ingreso de aire hacia la toma sumergida a través de vórtices, entonces la sumersión crítica representa un parámetro clave en la evaluación de estructuras con tomas sumergidas, tal como se muestra en la Figura 2.

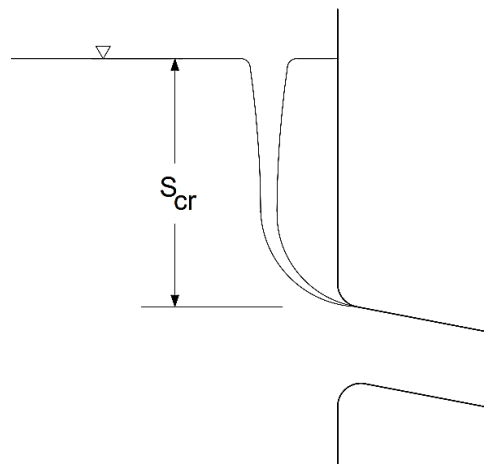


Figura 2: Esquema de sumersión Crítica.

Dado que el arrastre de aire en las tomas sumergidas es generalmente sensible a las condiciones geométricas (Suerich–Gulick, Gaskin, Villeneuve y Parkinson, 2014), la presente investigación plantea evaluar el efecto de la variación del perfil de entrada en tomas sumergidas horizontales sobre la formación de vórtices de superficie libre. Asimismo, estos ensayos serán realizados bajo diferentes condiciones de flujo, por lo que el número de Froude dentro de la tubería será variable. Este se define como la velocidad dividida entre la raíz del producto de la

aceleración de la gravedad por el diámetro o dimensión característica de la tubería.

Por otro lado, los resultados experimentales obtenidos serán comparados con los resultados de otros estudios. El tipo de vórtice será el indicador que permitirá conocer la intensidad de los vórtices y evaluar la sumersión. Todo ello será realizado dentro de una cámara de acrílico transparente, para tener una mejor visualización del fenómeno y poder medir las variables de interés.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el efecto en la formación de vórtices de superficie libre debido a la variación del perfil de entrada en tomas horizontales sumergidas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Clasificar el tipo de vórtice superficial que se forma para dos tipos de perfiles de entrada en tomas horizontales sumergidas.
- Determinar experimentalmente la relación entre la sumersión relativa y el número de Froude en la formación de vórtices, para dos tipos de perfiles de entrada en tomas horizontales sumergidas.
- Determinar el coeficiente de pérdida de carga local de dos tipos de perfiles de entrada en tomas horizontales sumergidas.

1.4 HIPÓTESIS

Investigaciones realizadas sobre tomas verticales (Yang et al, 2014) concluyen que modificar la geometría del ingreso a la toma mediante el redondeo o corte de los bordes producen efectos hidrodinámicos.

Por lo anteriormente descrito se espera que, al evaluar el perfil acampanado, se obtenga una menor pérdida de carga local en comparación con el perfil de arista viva (recto), lo que contribuiría a la formación de vórtices que se relaciona con la sumersión y las variaciones del perfil de entrada en tomas horizontales sumergidas.

1.5 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para realizar la parte experimental de la presente investigación se aprovechará parte de la infraestructura presente en el área didáctica del Laboratorio Nacional

de Hidráulica. Los ensayos serán realizados en un canal de prueba de 4500 mm de largo y con una sección de 1500 mm x 1500 mm, la parte final es enteramente de acrílico transparente. La primera parte del canal será de madera, con una capa de pintura impermeabilizante.

Para minimizar los efectos de las paredes en la formación de vórtices se recomienda una distancia mínima de $4D$ (640 mm) entre las paredes laterales y el eje de la tubería (Anwar et al., 1978), para los experimentos programados se proyectará una distancia de 750 mm, la cual cumple con la recomendación mínima. Asimismo, es recomendable considerar una distancia entre la pared delantera y el inicio de la toma sumergida con el fin de simular el comportamiento del volumen muerto que hay sobre la tubería debido a la inclinación de la pared en presas (Amiri, Zarrati, Roshan y Sarkardeh, 2011), así que siguiendo las relaciones planteadas por Möller et al. (2015) se considerará una distancia de $2D$ (320 mm). De la misma forma, se ha previsto una distancia de $1D$ (160 mm) entre el eje de la tubería y el fondo del canal.

Para poder grabar los diferentes tipos de vórtices superficiales formados, se utilizarán dos cámaras en posición frontal y lateral del canal.

Se ensayará el modelo bajo diferentes perfiles de entrada de la toma sumergida, una sin perfil acampanado y otro con perfil acampanado. El chaflán será de ácido poliláctico (PLA) obtenido mediante impresión 3D, el cual tendrá un diámetro exterior de 279 mm con una transición circular hacia la toma sumergida hasta alcanzar el diámetro externo de 159 mm, la longitud de dicha transición circular será de 62 mm y, además, se incluirá una sección recta de 200 mm que se introducirá en la toma sumergida. Para evaluar la influencia de esta variable, estos ensayos seguirán el plan de caudales y sumersiones propuestas a continuación:

Los ensayos serán realizados considerando una serie de caudales en el rango de 6 L/s a 21 L/s, mientras que las sumersiones relativas (S/D) a ser probadas por cada ensayo estarán en el rango de 0.3 a 2.5.

En cada ensayo realizado se obtendrá como resultado el tipo de vórtice formado, el cual será evaluado según la clasificación planteada por Sarkardeh et al. (2010). Los vórtices según su intensidad se dividen en tres clases generales: los de clase C considerados seguros y en los que se puede observar una débil rotación del

flujo; los de clase B en los cuales la rotación del flujo se extiende hasta la entrada de la toma pudiendo arrastrar escombros o basura hacia la toma, y finalmente los de clase A en los que las burbujas de aire son arrastradas desde la superficie del agua hasta el interior de la toma sumergida, mediante la formación de un núcleo de aire estable en el centro del vórtice. Asimismo, se medirá la pérdida de carga de la toma sumergida para obtener el coeficiente de pérdida de carga de los distintos perfiles de entrada evaluados.

Una vez obtenidos todos los datos de cada ensayo, los resultados finales podrán visualizarse en gráficas adimensionales Número de Froude vs Sumersión Relativa (Fr vs S/D) con una identificación por colores de los tipos de vórtices formados. Los resúmenes de resultados se presentarán en tablas y se obtendrán ecuaciones empíricas a partir de los resultados de los ensayos.

Es importante además comparar nuestra data con investigaciones previas, por ello se probarán 3 ecuaciones ampliamente usadas para estimar la sumersión crítica en diseños de centrales hidroeléctricas, estas serán las propuestas por Gordon (1970), Pennino y Hecker (1980) y Knauss (1987).

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

2.1.1 Vórtices

Es un flujo turbulento en rotación espiral con trayectoria de corriente cerrada. En dinámica de fluidos el movimiento de un fluido puede decirse que es arremolinado si el fluido se mueve alrededor de un círculo o si tiende a una espiral alrededor de un eje imaginario. Tal movimiento también se denomina solenoidal.

Un vórtice puede definirse como una región de flujo que gira alrededor de un eje que puede ser recto o curvo. La formación de vórtices se produce cuando la transición del flujo de canal abierto (superficie libre) al flujo a presión no es suave y uniforme. Cuando el flujo no mantiene transiciones graduales que intentan mantener una distribución de la velocidad y una aceleración uniformes, como se muestra en la Figura 3, entonces pueden producirse vórtices (Bottazzi, Floreale y Molina, 2008).

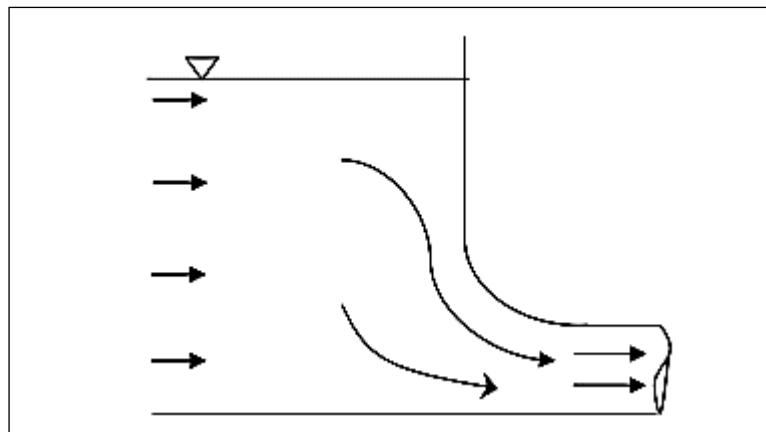


Figura 3: Campo de velocidades en una toma horizontal sumergida

ASCE (1995), manifiesta que un vórtice tiene su origen en la rotación de una masa de fluido causada por la aceleración no uniforme del flujo respecto a un punto, debido a las siguientes condiciones:

- Aproximación asimétrica.
- Irregularidades en la geometría de la superficie.
- Inadecuada sumersión (S).
- Separación de flujo y formación de remolinos.
- Velocidades de aproximación mayores a 0.6 m/s.

- Cambios abruptos de dirección del flujo.
- Obstrucciones.
- Condiciones transitorias del flujo por mal manejo de las compuertas o por acción del viento.

2.1.2 Tipo de vórtices

Un forma de clasificar a los vórtices es la representada por Hecker (1981), quien clasifica a los vórtices en 6 tipos, siendo el vórtice tipo 1 descrito como un hoyuelo en la superficie del agua sin capacidad para arrastras aire, mientras que el tipo 6 es descrito como un vórtice con un núcleo de aire bien definido a través del cual se realiza el arrastre de aire desde la superficie del agua hasta la toma sumergida, como se muestra de la Figura 4 hasta la Figura 9.

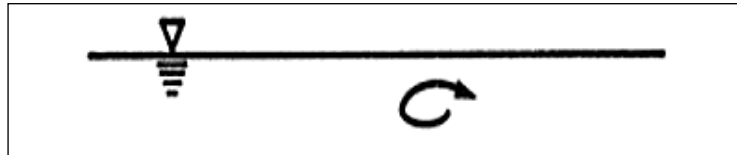


Figura 4: Vórtice tipo 1, remolino superficial. Hecker (1981)

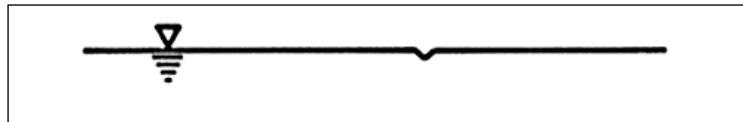


Figura 5: Vórtice tipo 2, superficie con hoyuelo. Hecker (1981)

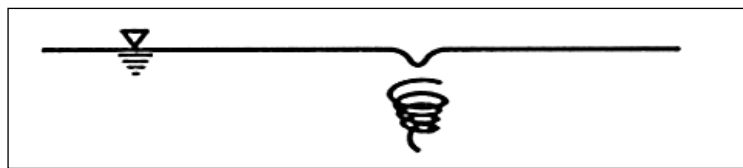


Figura 6: Vórtice tipo 3, superficie con hoyuelo y remolino. Hecker (1981)

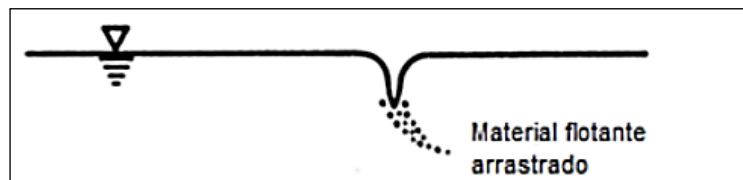


Figura 7: Vórtice tipo 4, con arrastre de material flotante, pero no aire. Hecker (1981)

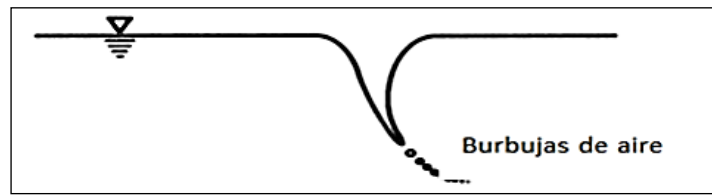


Figura 8: Vórtice tipo 5, con arrastre de burbujas de aire. Hecker (1981)

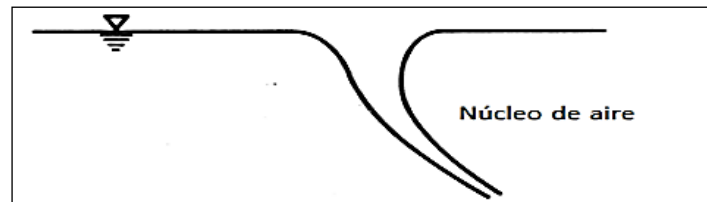


Figura 9: Vórtice tipo 6, con entrada completa de un núcleo de aire. Hecker (1981)

En este sentido, una clasificación más reciente de Sarkardeh et al. (2010), divide a los vórtices en tres clases de acuerdo a sus propiedades. En los vórtices de clase C, considerados seguros, se puede observar una débil rotación del flujo o una pequeña gota en la superficie del agua. En los vórtices de clase B, la rotación del flujo se extiende hasta la entrada de la toma y puede arrastrar escombros o basura hacia la toma. Los vórtices de clase A se consideran peligrosos y deben evitarse. En esta última clase, las burbujas de aire son arrastradas desde la superficie del agua y son transportadas hacia la toma sumergida, mediante la formación de un núcleo de aire estable en el centro del vórtice. Cuando las burbujas de aire ingresan a una zona de presión muy alta, como las que se presentan en una tubería forzada, la implosión genera presiones concentradas muy altas que pueden dañar las paredes de la tubería. En relación con las implicaciones expuestas, el vórtice tipo A debe evitarse durante la operación del sistema.

2.1.3 Circulación (Γ)

La circulación es una magnitud cinemática que ayuda a interpretar el movimiento del fluido y está relacionada con la existencia o no de rotación.

La circulación se define como la integral lineal de la velocidad “V” a lo largo de una trayectoria cerrada “L”, es decir:

$$\Gamma = \oint_L \mathbf{V} \cdot d\mathbf{L} \quad (2-1)$$

2.1.4 Vorticidad (ω)

Se define como la circulación por unidad de área en un punto del flujo.

2.1.5 Sumersión (S)

Columna de agua medida desde la superficie libre del agua en la cámara de carga hasta la clave de la tubería de toma sumergida, como se muestra en la Figura 10.

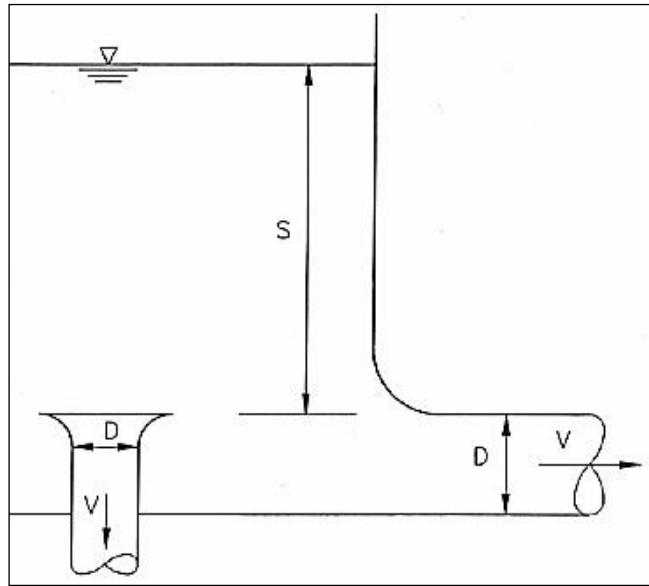


Figura 10: Esquema típico de sumersión (S). Rindels and Gulliver (1983)

2.1.6 Perfiles de entrada en tomas sumergidas

Los perfiles hacen referencia a la geometría de la entrada en tomas sumergidas. Existe una serie de investigaciones donde consideran perfiles cuadrados, circulares, rectangulares, en forma de estrella, etc. y concluyen que para cada geométrica establecida se generan distintas condiciones en la formación de vórtices.

2.1.7 Toma sumergida

Es el orificio de captación de la tubería de aducción que siempre se encuentra sumergida.

2.2 PRINCIPALES EXPRESIONES DE CÁLCULO

2.2.1 Vorticidad (ω)

Matemáticamente se define como:

$$\omega = \Delta xV \quad (2-2)$$

donde:

Δ : Operador nabla

V : Velocidad del fluido

2.2.2 Número de Froude (Fr)

Representa la relación entre fuerzas inerciales y las fuerzas gravitatorias.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (2-3)$$

donde:

V : Velocidad media del flujo (m/s)

g : Aceleración de la gravedad (m/s²)

L : Longitud característica (m)

2.2.3 Número de Reynolds (Re)

Representa la relación entre fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas.

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (2-4)$$

donde:

ρ : Densidad del fluido (kg/m³)

V : Velocidad media del flujo, es el cociente de caudal sobre área (m/s)

D : Diámetro interior de la tubería (m)

μ : Viscosidad dinámica (kg/m-s)

2.2.4 Número de Weber (We)

Es la relación entre las fuerzas dinámicas o de inercia y las fuerzas de tensión superficial

$$We = \frac{\rho V^2 D}{\sigma} \quad (2-5)$$

donde:

ρ : Densidad del fluido (kg/m³)

V : Velocidad media del flujo (m/s)

- D : Diámetro interior de la tubería (m)
 σ : Tensión superficial del fluido (N/m)

2.2.5 Criterios para el cálculo de sumersión

Existen varios criterios propuestos para determinar la sumersión, con la finalidad de evitar la formación de vórtices, entre los principales tenemos:

2.2.5.1 Criterio de Gordon (1970)

Para flujos de aproximación simétrica y asimétrica, se planteó la siguiente ecuación:

$$S = kV\sqrt{D} \quad (2-6)$$

donde:

- S : Profundidad de sumersión medida a partir de la superficie libre del agua hasta la clave de la tubería de toma (pies)
k : 0.3 (condiciones simétricas de flujo) y 0.4 (condiciones asimétricas de flujo)
V : Velocidad media del flujo en la tubería (pies/s)
D : Diámetro interior de la tubería (pies)

2.2.5.2 Criterio de Pennino y Hecker (1980)

Debido a la influencia de la geometría en el flujo de aproximación. Se plantearon las siguientes ecuaciones que minimiza el riesgo de ingreso de aire a la toma sumergida a través de los vórtices:

$$\frac{V}{\sqrt{gS}} < 0.23 \quad (2-7)$$

$$\frac{S}{D} > 0.5 \quad (2-8)$$

donde:

- V : Velocidad en la entrada de la toma sumergida (m/s)
g : aceleración de la gravedad (m/s²)

- S : Profundidad de sumersión, medida desde la superficie libre del agua hasta el eje de la tubería (m)
D : Diámetro interior de la tubería (m)

2.2.5.3 Criterio de Knauss (1987)

Planteó las siguientes ecuaciones:

$$S/D = \begin{cases} 1.5, Fr < 0.5 \\ 2Fr + 0.5, Fr > 0.5 \end{cases} \quad (2-9)$$

donde:

- S : Profundidad de sumersión, medida desde la superficie libre del agua hasta el eje de la tubería (m)
D : Diámetro interno de la tubería sumergida (m)
Fr : Número de Froude en la toma sumergida

2.2.5.4 Criterio de Gulliver, Rindels y Lindblom (1984)

Para una región donde no se producen vórtices, se plantearon las siguientes ecuaciones:

$$\frac{V}{\sqrt{gD}} > 0.5 \quad (2-10)$$

$$S > 0.7D \quad (2-11)$$

donde:

- S : Profundidad de sumersión, medida desde la superficie libre del agua hasta la clave de la tubería sumergida (m)
D : Diámetro interior mínimo de la tubería (m)
V : Velocidad media correspondiente al diámetro mínimo de la tubería (m/s)
g : aceleración de la gravedad (m/s²)

2.2.5.5 Criterio de Zubiaur (2011)

Durante el estudio del uso de rejillas como dispositivos antivórtices en tomas sumergidas, se planteó para los ensayos realizados sin rejillas las siguientes ecuaciones:

- Para una región donde no se producen vórtices:

$$Fr \leq 0.27 \quad (2-12)$$

$$\frac{S}{D} \geq 0.67 \quad (2-13)$$

- Para una región de formación de vórtices con ingreso de burbujas de aire:

$$Fr \geq 0.39 \quad (2-14)$$

$$\frac{S}{D} \leq 2.28 \quad (2-15)$$

donde:

S : Profundidad de sumersión, medida desde la superficie libre del agua hasta la clave de la tubería sumergida (m)

D : Diámetro interior de la tubería (m)

Fr : Número de Froude

2.2.5.6 Criterio de Apaza (2012)

Durante la investigación sobre la influencia del espaciamiento entre las láminas de rejillas usadas como elementos de disipación de vórtices en tomas de agua sumergidas, se planteó para los ensayos realizados sin rejillas las siguientes ecuaciones:

- Para una región donde no se producen vórtices:

$$Fr \leq 0.27 \quad (2-16)$$

$$\frac{S}{D} \geq 1.81 \quad (2-17)$$

- Para una región de formación de vórtices con ingreso de burbujas de aire:

$$Fr \geq 0.39 \quad (2-18)$$

$$\frac{S}{D} \leq 2.20 \quad (2-19)$$

donde:

- S : Profundidad de sumersión, medida desde la superficie libre del agua hasta la clave de la tubería sumergida (m)
- D : Diámetro interior de la tubería (m)
- Fr : Número de Froude

2.3 ANÁLISIS DIMENSIONAL DE VARIABLES

Distintas variables están involucradas en la formación de vórtices, entre ellas podemos nombrar las siguientes:

- Velocidades del agua en la tubería: V
- Diámetro interno de la tubería: D
- Sumersión: S
- Viscosidad dinámica del agua: μ
- Tensión superficial del agua: σ
- Densidad del agua: ρ
- Aceleración de la gravedad: g

Variabes	V	D	S	μ	σ	ρ	g
Dimensiones	LT ⁻¹	L	L	ML ⁻¹ T ⁻¹	MT ⁻²	ML ⁻³	LT ⁻²

El teorema Π de Buckingham establece que un problema físico en el que intervienen n magnitudes denominadas variables, en las que se tiene m dimensiones independientes, las n magnitudes pueden agruparse en n-m parámetros adimensionales, conformados con las variables originales. Este teorema proporciona un método de construcción de parámetros adimensionales incluso cuando la forma de la ecuación es desconocida.

De acuerdo al teorema mencionado, se podría establecer 4 parámetros adimensionales que influyen en la formación de vórtices.

Seleccionando como variables repetitivas a V, D y ρ ; los parámetros adimensionales serían de la siguiente manera:

- $\Pi_1 = SV^{X_1}D^{Y_1}\rho^{Z_1}$

- $\Pi_2 = \mu V^{X_2} D^{Y_2} \rho^{Z_2}$
- $\Pi_3 = g V^{X_3} D^{Y_3} \rho^{Z_3}$
- $\Pi_4 = \sigma V^{X_4} D^{Y_4} \rho^{Z_4}$

Resolviendo, se obtienen las siguientes expresiones:

- $\Pi_1 = \frac{S}{D}$: Sumersión relativa
- $\Pi_2 = \frac{VD\rho}{\mu}$: Número de Reynolds (Re)
- $\Pi_3 = \frac{V^2}{gD}$: Número de Froude (Fr)
- $\Pi_4 = \frac{\rho V^2 D}{\sigma}$: Número de Weber (We)

La formación de vórtices de acuerdo con el Teorema Π de Buckingham depende de los parámetros adimensionales de sumersión relativa, Número de Reynolds, Número de Froude y del Número de Weber por lo que es recomendable analizar la influencia de estos parámetros en la formación de vórtices.

2.4 EFECTOS DE ESCALA

Muchos investigadores brindan como recomendación no solo considerar las fuerzas inerciales y de gravedad en los estudios de vórtices, sino también considerar las fuerzas viscosas y de tensión superficial como participes de la formación de estos, ya que debido a los efectos de escala suelen incrementar su influencia sobre las características del flujo en el modelo y distorsionar lo que podría ocurrir en el prototipo.

Hecker (1981) presentó un resumen de los resultados de una serie de investigaciones realizadas en modelos hidráulicos, las cuales brindan conclusiones sobre los efectos de escala y la eficacia de la utilización de la similitud de Froude para el estudio de los vórtices. Señala que los vórtices están sujetos a errores de predicción debido a que todas las fuerzas que participan se les afecta por un mismo factor (Similitud dinámica de Froude) y que “las fuerzas viscosas y de tensión superficial no pueden reducirse al máximo simultáneamente” resultando en efecto de escala.

Anwar (1968) y también Daggett y Keulegan (1974) afirman que los efectos de viscosidad se pueden despreciar siempre y cuando el valor de Reynolds de la toma cumpla lo siguiente:

$$Re = \frac{VD}{\nu} \geq 3 \times 10^4 \quad (2-20)$$

donde:

- Re : Número de Reynolds.
- V : Velocidad media en la tubería (m/s)
- D : Diámetro interior de la tubería (m)
- ν : Viscosidad cinemática del agua (m²/s)

Jain et al. (1978), realizaron ensayos con agua y agua diluida con carboxilo metil celulosa, con la finalidad de comparar fluidos con la misma viscosidad cinemática, pero diferente tensión superficial, concluyendo que la tensión superficial no afecta el desarrollo de los vórtices con incorporación de aire cuando se cumple lo siguiente:

$$120 \leq We = \frac{\rho V^2 D}{\sigma} \leq 3.4 \times 10^4 \quad (2-21)$$

donde:

- We : Número de Weber.
- ρ : Densidad del agua (kg/m³)
- V : Velocidad del agua (m/s)
- D : Diámetro interior de la tubería (m)
- σ : Tensión superficial del agua (N/s)

Incluso, determinaron que los efectos viscosos son despreciables cuando la relación entre el número de Reynolds de la toma en el modelo y el número de Froude de la toma (N_v) cumple la siguiente condición:

$$N_v = \frac{Re}{Fr} \geq 5 \times 10^4 \quad (2-22)$$

donde:

- N_v : Relación entre el número de Reynolds (Re) en el modelo y el número de Froude (Fr).

Hecker (1981), como resultado de sus investigaciones en modelos - prototipos, concluye que en gran número de casos la intensidad de vórtice en el modelo no siempre representa la intensidad del vórtice que se genera en el prototipo. Algunas comparaciones observadas, revela que, en algunos casos para modelos con semejanza dinámica dada por la igualdad en el número de Froude, el vórtice observado en el prototipo era más intenso que en el modelo, sin embargo, nunca se generó un vórtice débil (tipo 1) en el modelo que correspondiera a un vórtice de gran intensidad como el tipo 5 en el prototipo.

Hecker (1981) recomendó que un vórtice tipo 3 (Superficie con hoyuelo y remolino) sea usado como límite de diseño en los estudios de modelos hidráulicos. En tal sentido, considerando la clasificación de Sarkardeh et al. (2010), el vórtice tipo C es el criterio que será considerado en el presente estudio.

2.5 PÉRDIDA DE CARGA

Según la adaptación de Rocha (2007) a las investigaciones realizadas por Weisbach (1845) y Darcy (1857), al trasladarse un fluido de un punto a otro en una tubería, parte de la energía de este flujo se disipa en forma de pérdidas de carga continua (h_f) o local (h_L), el primer tipo de pérdida estaría representado por la disipación de energía por fricción y se calcula mediante de la fórmula de Darcy - Weisbach:

$$h_f = f \frac{LV^2}{D2g} \quad (2-23)$$

donde:

- f : Coeficiente de fricción de Darcy.
- L : Longitud de la tubería (m).
- V : Velocidad media del flujo (m/s).
- D : Diámetro interior de la tubería (m).
- g : Aceleración de la gravedad (m/s^2).

Mientras que el segundo estaría representado por la pérdida de energía debido a accesorios, tal como se muestra en la Figura 11.

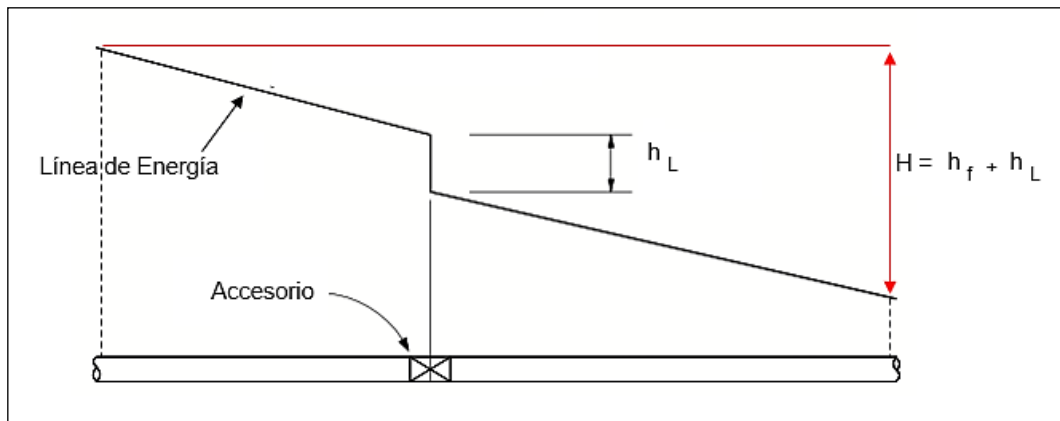


Figura 11: Pérdida de carga (H).

2.5.1 Pérdida de carga continua (h_f)

Para determinar la pérdida de carga continua por medio de la ecuación de Darcy, se debe primero establecer el valor del coeficiente de pérdida de carga (f), el cual está en función de la rugosidad relativa de la tubería (K/D) y del número de Reynolds del flujo que atraviesa la tubería.

Para poder obtener el valor de dicho coeficiente de pérdida, se utiliza convenientemente el Abaco de Moody (ver Figura 12), el cual fue establecido a partir del estudio experimental de la pérdida de carga en tuberías.

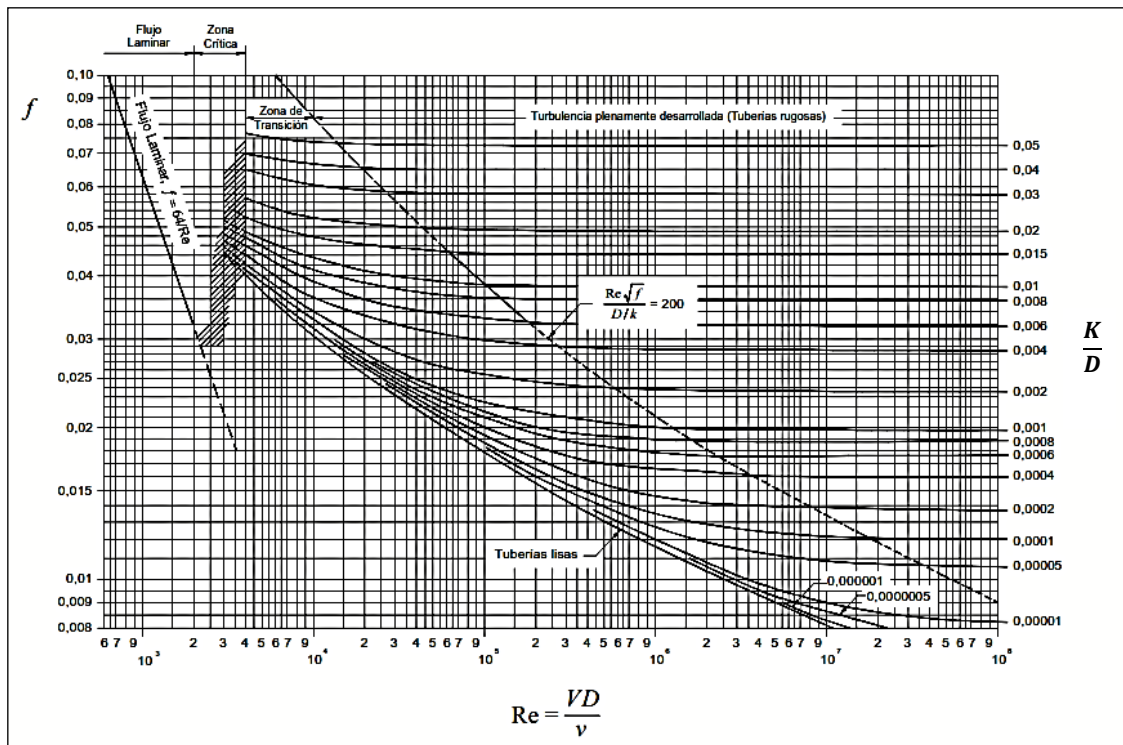


Figura 12: Abaco de Moody

2.5.2 Pérdida de carga local (h_L)

Las pérdidas de carga local se representan mediante la siguiente fórmula:

$$h_L = k \frac{V^2}{2g} \quad (2-24)$$

donde:

V : Velocidad media del flujo (m/s), cociente del caudal sobre área.

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2)

k : coeficiente de pérdida de carga local.

Dicho coeficiente de pérdida depende de las características de los accesorios (reducción, válvulas, etc.) además del número de Reynolds del flujo y de la rugosidad del accesorio.

2.5.2.1 Entrada a tubería sumergida

Representada por una tubería que sale de un tanque, tal como muestra la Figura 13.

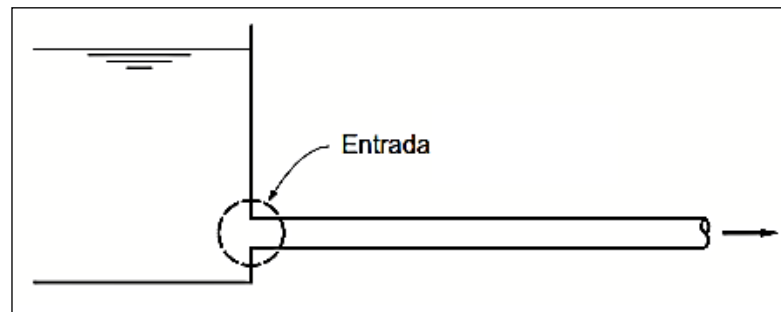
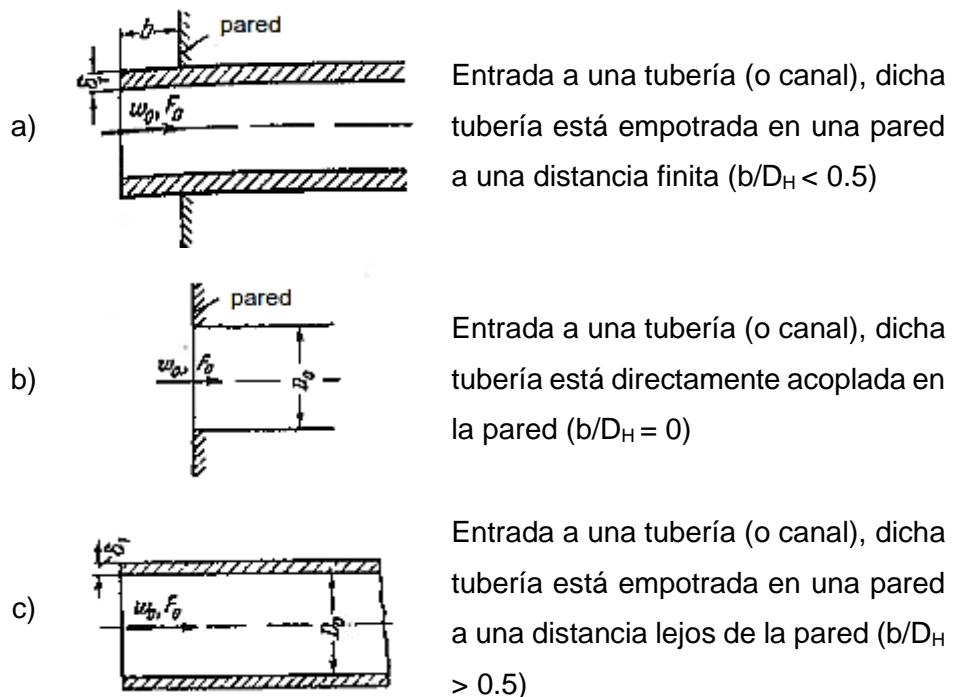


Figura 13: Esquema de entrada a una tubería sumergida.

En la entrada de la tubería se genera una pérdida de carga local, debido a la contracción de fluido. El valor del coeficiente de pérdida de carga (k) está en función de las características geométricas de la entrada, tal como lo muestra Idel'Chik (1969) en los siguientes diagramas de coeficientes de pérdida de carga:

- Para el tipo de entrada en una tubería con sección transversal constante ($Re > 10^4$) – Entrada de arista viva (recto), se muestra el respectivo diagrama en la Figura 14:



donde:

w_0 : Velocidad media del flujo (m/s), cociente del caudal sobre área.

F_0 : Área de la sección interior de la tubería (m^2).

- δ_1 : Espesor de la pared del tubo (m).
- D_H : Diámetro hidráulico (m), cuatro veces el Radio hidráulico (relación entre el área de la sección interior de la tubería y el perímetro mojado). Para el caso de una tubería sumergida $D_H = D_0$.
- D_0 : Diámetro interno de la tubería (m).
- b : Distancia desde la entrada a la pared de empotramiento (m).
- k : Coeficiente de pérdida de carga local.

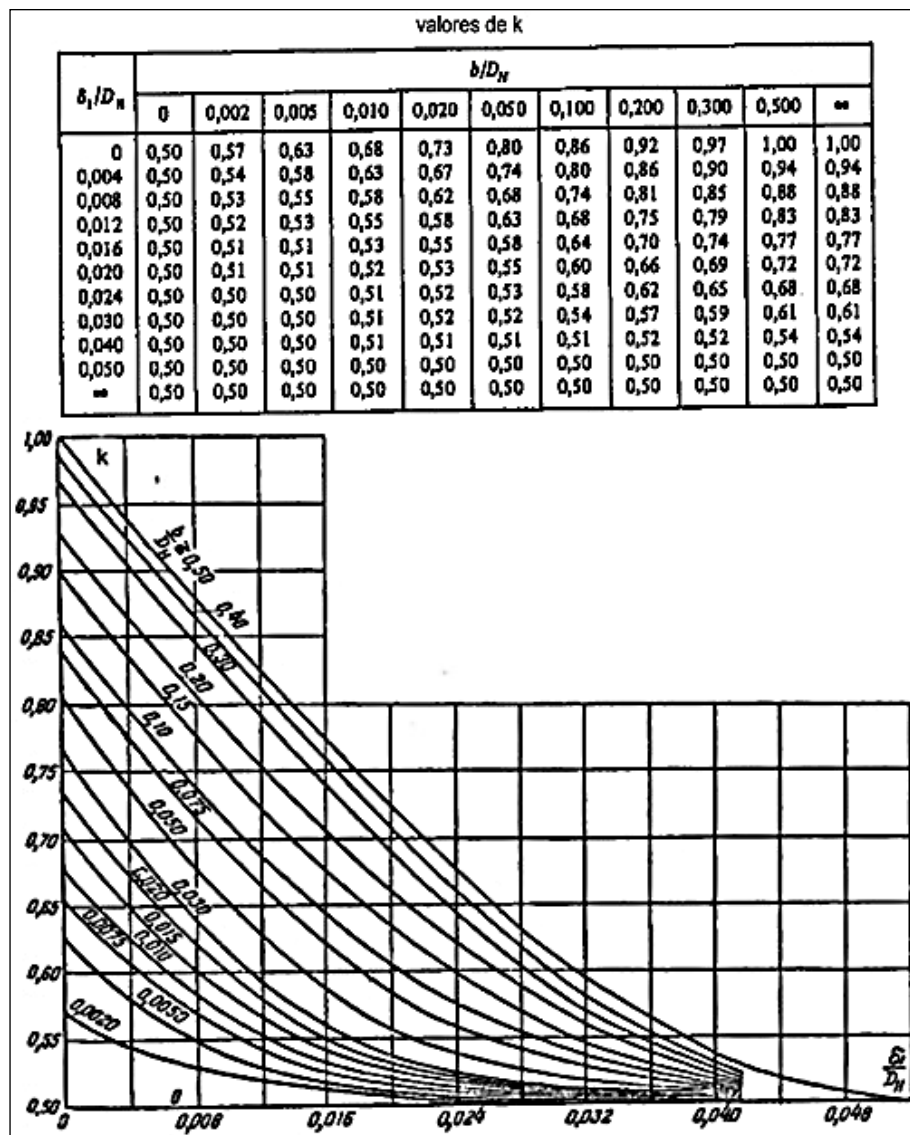
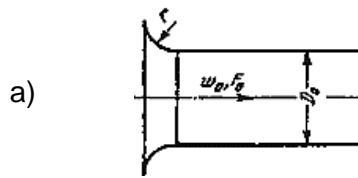


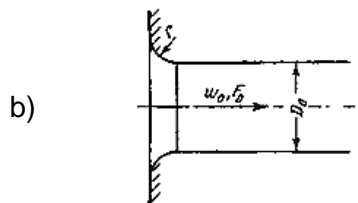
Figura 14: Diagrama para determinar coeficiente de pérdida de carga local. Entrada de arista viva.

Fuente: Idel'Chik (1969)

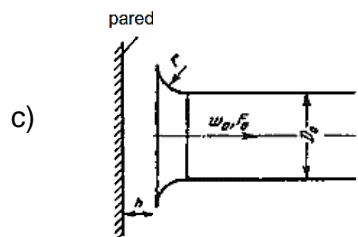
- Para el tipo de entrada curva (tipo arco de círculo) en una tubería con sección transversal constante ($Re > 10^4$) – Entrada Acampanada, se muestra el respectivo diagrama en la Figura 15:



Entrada acampanada a una tubería (o canal), dicha tubería está empotrada en una pared a una distancia finita.



Entrada acampanada a una tubería (o canal), dicha tubería está directamente acoplada a una pared.



Pared en frente de una entrada acampanada a una tubería (o canal), dicha tubería está empotrada en una pared a una distancia finita.

donde:

- ω_0 : Velocidad media del flujo (m/s), cociente del caudal sobre área.
- F_0 : Área de la sección interior de la tubería (m^2).
- D_H : Diámetro hidráulico (m), cuatro veces el Radio hidráulico (relación entre el área de la sección interior de la tubería y el perímetro mojado). Para el caso de una tubería sumergida $D_H = D_0$.
- D_0 : Diámetro interno de la tubería (m).
- h : Distancia desde la entrada a la pared en frente (m).
- r : Radio de curvatura de la sección de entrada (m).
- k : Coeficiente de pérdida de carga local.

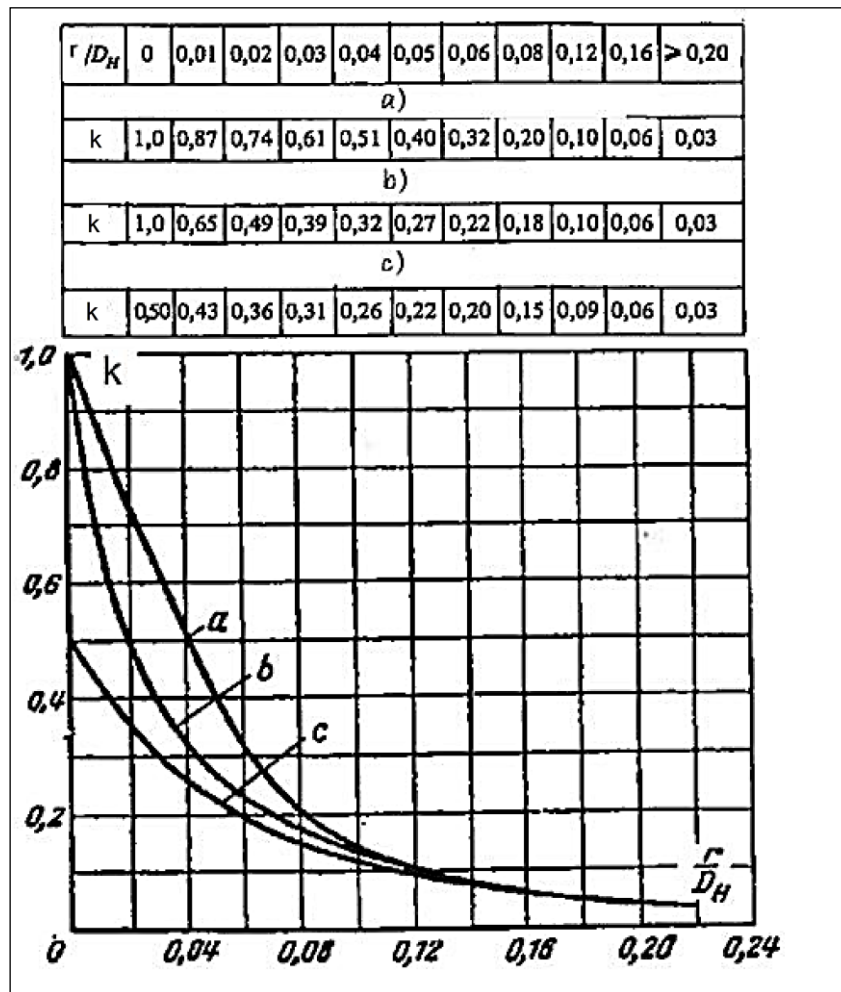


Figura 15: Diagrama para determinar coeficiente de pérdida de carga local. Entrada Acampanada

Fuente: Idel'Chik (1969)

CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO

El presente estudio se realizó en el área didáctica del Laboratorio Nacional de Hidráulica (LNH) de la Universidad Nacional de Ingeniería.

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA

El modelo físico donde se realizaron los ensayos de vórtices, tal como se muestra en la Foto 1 y Figura 16 , está conformado por los siguientes componentes:

- Una bomba de 18 HP
- Una cámara de carga de 4500 mm de largo y con una sección de 1500 mm x 1500 mm
- Una tubería a presión de diámetro interno 160 mm
- Dos válvulas mariposas
- Un tanque metálico con vertedero triangular de 53° 08'



Foto 1: Vista de la toma sumergida, donde se indica el sentido del flujo.

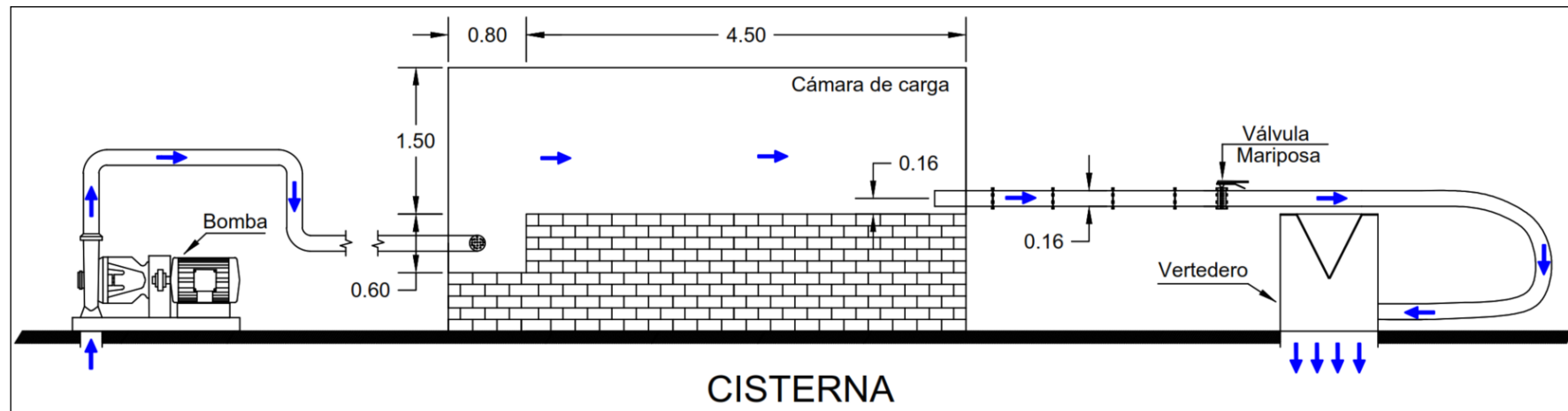


Figura 16: Esquema del modelo hidráulico.

3.1.1 Funcionamiento Hidráulico

El modelo físico, tal como se muestra desde la Foto 2 hasta la Foto 4, está conformado de una tubería de PVC DN 160 mm por donde se traslada el agua que se bombea desde una cisterna de 80 m³ hacia una cámara de transición y disipación de energía que al llenarse alimenta por rebose la cámara de carga. A la salida de la cámara de carga se tiene una toma sumergida que consta de una tubería de acrílico transparente con diámetro interno de 160 mm, dicha tubería tiene instalada aguas abajo una válvula mariposa que permite regular el nivel del agua en la cámara de carga, el agua que discurre por esta tubería desemboca hacia un tanque metálico que tiene instalado un vertedero de pared delgada de 53° 08' mediante el cual se puede determinar el caudal de agua que atraviesa el sistema, finalmente el caudal que sale del vertedero regresa a la cisterna desde donde se hace recircular el agua hacia el modelo.



Foto 2: Entrada de flujo hacia la cámara de transición y disipación de energía.



Foto 3: Cámara de carga



Foto 4: Toma sumergida a la salida de la cámara de carga.

3.2 EQUIPOS

La siguiente lista muestra las herramientas y equipos utilizados durante la etapa de ensayos:

- Bomba de 18 HP, que impulsa el agua desde la cisterna subterránea hasta el canal de prueba.
- Tanque metálico con vertedero triangular de pared delgada de 53° 08' marca Neyrpic, el cual se instaló al final del modelo con la finalidad de medir el caudal de cada ensayo.
- Limnómetro de punta marca Neyrpic, instalado en el tanque metálico con vertedero, el cual permitía medir los niveles en el vertedero triangular de pared delgada.
- Cámaras digitales marca Canon para documentar mediante fotos y videos la formación de vórtices.
- Cinta métrica flexible doble escala de 150 cm marca Butterfly, instalado en la cámara de carga, el cual permitía medir los niveles de la superficie del agua.
- Termómetro digital marca Traceable para medir la temperatura del agua en los ensayos.
- Cronómetro digital kk-613D marca GN para medir la duración de cada ensayo.

3.3 PERFILES DE LA TOMA SUMERGIDA

Los perfiles de la toma sumergida hacen referencia a la geometría de la entrada a la tubería forzada que se encuentra ubicada a la salida de la cámara de carga.

3.3.1 Perfil de arista viva

El perfil de arista viva es de material acrílico transparente. Este perfil posee una geometría circular con diámetro interno de 160 mm que se extiende por una longitud de 320 mm como parte de la tubería forzada hasta intersectar la pantalla acrílica de la cámara de carga, tal como se muestra en la Figura 17 y Foto 5.

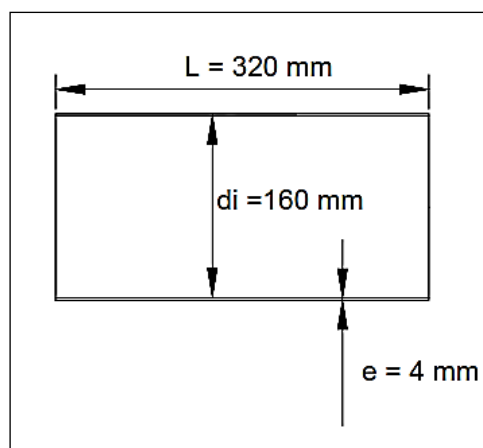


Figura 17: Dimensiones del perfil de arista viva (recto)

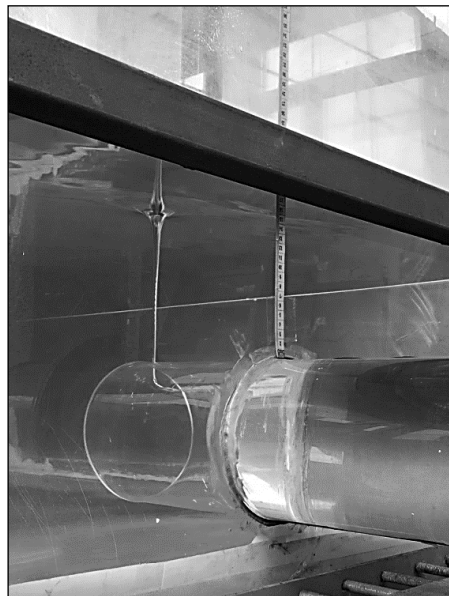


Foto 5: Ensayo con el perfil de arista viva (recto).

3.3.2 Perfil acampanado

El perfil acampanado es de ácido poliláctico (PLA) obtenido mediante impresión 3D. Este perfil posee un diámetro exterior de 279 mm con una transición circular hacia la toma sumergida hasta alcanzar el diámetro externo de 159 mm, la extensión longitudinal de la transición circular es de 62 mm y, además, la sección de menor diámetro externo se mantiene constante a lo largo de una longitud de 200 mm, la cual se introducirá en la tubería forzada, tal como se muestra desde la Foto 6 hasta la Foto 8 y en la Figura 18.

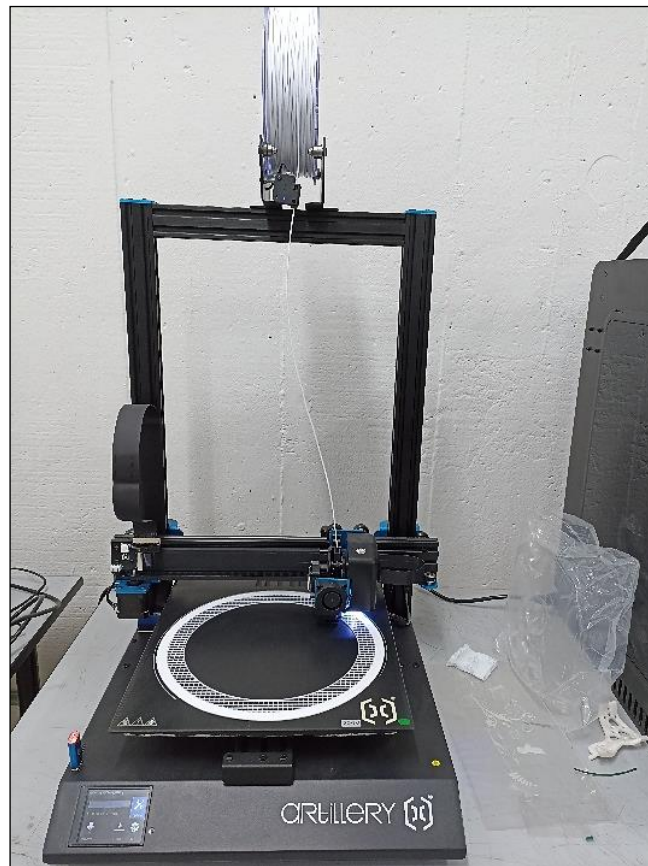


Foto 6: Impresión 3D del perfil acampanado

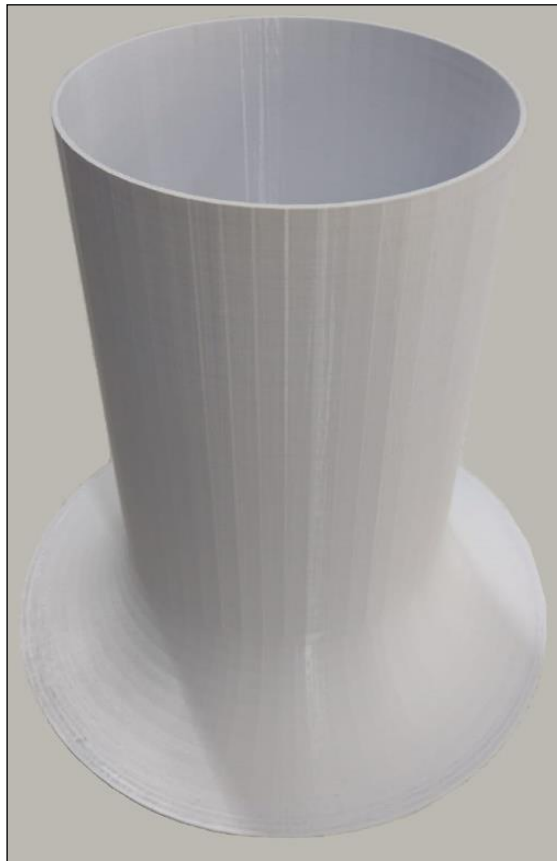


Foto 7: Perfil acampanado de ácido poliláctico (PLA)

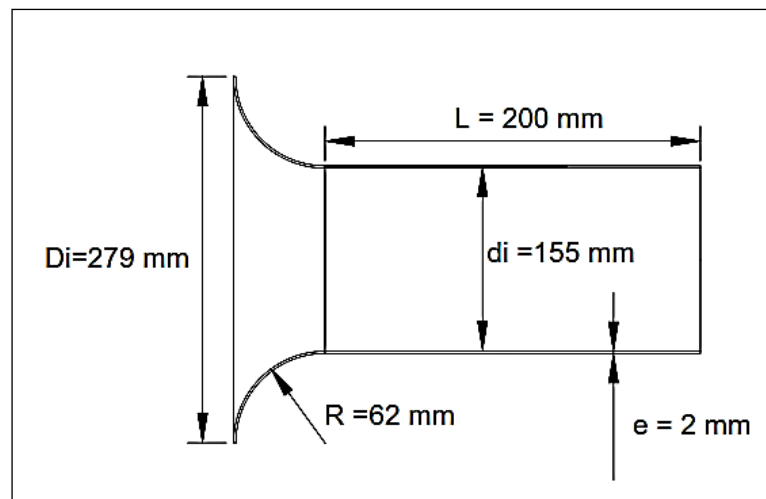


Figura 18: Dimensiones del perfil acampanado.

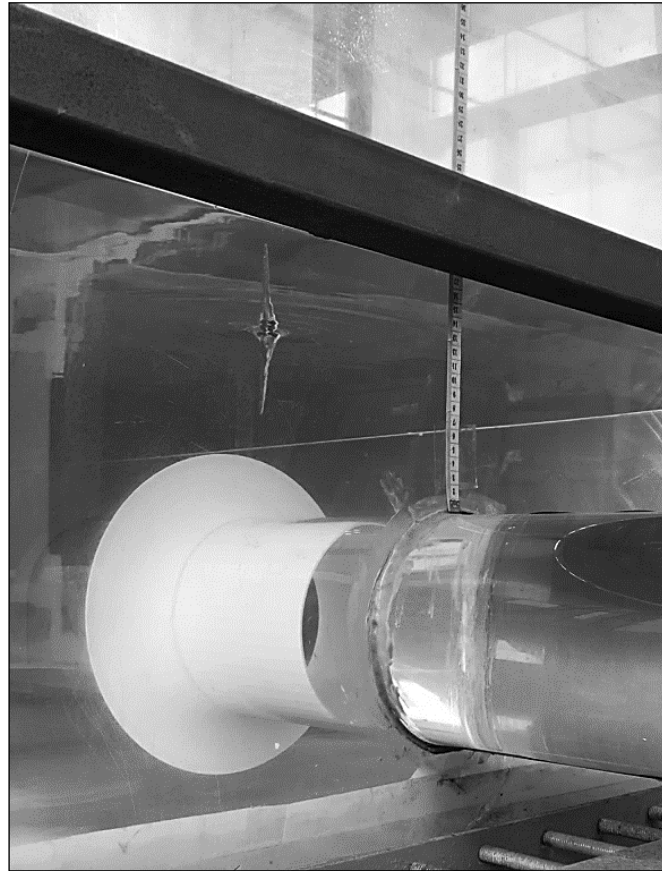


Foto 8: Ensayo con el perfil acampanado

CAPÍTULO IV: EJECUCIÓN DE ENSAYOS Y RECOLECCIÓN DE DATOS

4.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El presente capítulo muestra el procedimiento que se siguió para realizar los ensayos.

Inicialmente se encendió la bomba para impulsar el agua desde la cisterna subterránea hasta el modelo donde se realizaron los ensayos y las respectivas tomas de datos. Mediante una válvula de compuerta se reguló el caudal impulsado por la bomba y se esperó a que el nivel del agua en la cámara de carga se estabilice para poder tomar registro de dicho caudal mediante el limnómetro instalado en el tanque metálico que dispone de un vertedero triangular de pared delgada.

A continuación, se realizó el ensayo con el perfil de arista viva (recto), para ello una vez que el nivel de agua dentro de la cámara de carga estaba estabilizado, se podía visualizar si se generaban vórtices para proceder con el registro de la sumersión a través del limnómetro instalado en la pared de la cámara de carga. Luego se colocó el perfil acampanado y se esperó nuevamente hasta que el flujo dentro de la cámara de carga estuviera estable, debido a que al cambiar el perfil de entrada a la tubería forzada se varió el flujo en la toma, al tener un flujo de agua estable se continuó con la visualización de vórtice y el registro de sumersión.

Manteniendo el caudal, se modificó la sumersión en la cámara de carga a través de la apertura o cierre de la válvula mariposa instalada aguas abajo de la tubería forzada y se procedió a realizar los ensayos con los diferentes perfiles de acuerdo a lo mencionado anteriormente.

Finalmente, luego de haber realizado todos los registros de datos para distintas sumersiones se procedió a variar el caudal mediante el cierre o apertura de la válvula compuerta que regula el flujo impulsado por la bomba, estos pasos se repitieron hasta culminar las pruebas con todos los caudales y sumersiones programadas.

Las variables que se registraron en cada ensayo fueron las siguientes: Tipo de perfil ensayado, lectura de limnómetro del vertedero, caudal, sumersión, temperatura del agua, tipo de vórtices formado, también se incluyeron fotos y grabaciones de los ensayos realizados.

Con la finalidad de analizar los parámetros adimensionales sobre la formación de vórtices, se registraron:

- Sumersión relativa: $\frac{S}{D}$
- Número de Froude: $Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}$
- Número de Reynolds: $Re = \frac{VD}{\nu}$
- Número de Weber: $We = \frac{\rho V^2 D}{\sigma}$

Donde:

- S : sumersión (m), distancia desde la superficie libre del agua hasta la clave de la tubería forzada.
- D : Diámetro interno de la tubería forzada (D).
- V : Velocidad media del agua (m/s), cociente del caudal sobre área.
- g : Aceleración de la gravedad (m/s²).
- ν : Viscosidad cinemática del agua (m²/s).
- ρ : Densidad del agua (kg/m³).
- σ : Tensión superficial del agua (N/m).

4.2 ENSAYOS UTILIZANDO EL PERFIL DE ARISTA VIVA (RECTO)

Los ensayos con el perfil de arista viva (recto) fueron realizados con caudales de 6 l/s a 21 l/s. En cada prueba se midió la temperatura del agua para determinar mediante tablas las propiedades físicas como densidad, viscosidad cinemática y tensión superficial (Ver ANEXO A).

Se programó realizar dos grupos de ensayos, el primer grupo de pruebas se realizó con la finalidad de clasificar el tipo de vórtice que se generaba en las distintas pruebas, así como determinar y establecer la relación adimensional existente entre la sumersión relativa y el número de Froude; por otro lado, el segundo grupo de pruebas se realizó con la finalidad de determinar el coeficiente de pérdida de carga del perfil de arista viva (recto), para ello se instaló un piezómetro a la salida de la tubería forzada de la cámara de carga, dicho registro de datos tomado con el piezómetro se comparó con las lecturas obtenidas de un

transmisor de presión marca Yokogawa modelo EJA110E, tal como se muestra en la Foto 9, resultando valores aceptables.



Foto 9: Toma de datos con transmisor de presión.

4.2.1 Clasificación de vórtices

Se realizó la clasificación de los vórtices que se visualizaron en los ensayos con el perfil de arista viva, dicha clasificación se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Clasificación de vórtices generados en los ensayos con el perfil de arista viva. (Fuente: Elaboración propia)

D (m)	Q (l/s)	V (m/s)	S (m)	S/D	Fr	Re	We	Tipo de vórtice
0.16	20.98	1.043	0.21	1.313	0.833	1.63E+05	2367.16	A
0.16	19.93	0.991	0.183	1.144	0.791	1.55E+05	2136.55	A
0.16	19.52	0.971	0.163	1.019	0.775	1.52E+05	2049.94	A
0.16	18.13	0.902	0.065	0.406	0.720	1.38E+05	1765.70	A
0.16	17.55	0.873	0.108	0.675	0.697	1.36E+05	1656.42	A
0.16	13.98	0.695	0.13	0.813	0.555	1.09E+05	1051.67	A
0.16	7.54	0.375	0.055	0.344	0.299	5.88E+04	305.86	A
0.16	20.98	1.043	0.292	1.825	0.833	1.64E+05	2368.06	B
0.16	20.98	1.043	0.253	1.581	0.833	1.63E+05	2367.61	B
0.16	19.94	0.992	0.326	2.038	0.792	1.56E+05	2139.10	B
0.16	19.94	0.992	0.196	1.225	0.792	1.55E+05	2138.70	B
0.16	19.93	0.991	0.283	1.769	0.791	1.55E+05	2136.55	B

D (m)	Q (l/s)	V (m/s)	S (m)	S/D	Fr	Re	We	Tipo de vórtice
0.16	18.72	0.931	0.213	1.331	0.743	1.45E+05	1884.64	B
0.16	18.13	0.902	0.236	1.475	0.720	1.37E+05	1764.36	B
0.16	16.99	0.845	0.219	1.369	0.674	1.33E+05	1553.58	B
0.16	16.99	0.845	0.294	1.838	0.674	1.33E+05	1553.28	B
0.16	15.18	0.755	0.189	1.181	0.603	1.19E+05	1240.19	B
0.16	15.18	0.755	0.318	1.988	0.603	1.19E+05	1239.96	B
0.16	11.77	0.585	0.173	1.081	0.467	9.21E+04	745.45	B
0.16	11.77	0.585	0.294	1.838	0.467	9.19E+04	745.30	B
0.16	10.75	0.535	0.136	0.850	0.427	8.41E+04	621.84	B
0.16	10.75	0.535	0.208	1.300	0.427	8.39E+04	621.72	B
0.16	10.46	0.520	0.173	1.081	0.415	8.16E+04	588.63	B
0.16	10.46	0.520	0.131	0.819	0.415	8.14E+04	588.52	B
0.16	10.75	0.535	0.321	2.006	0.427	8.44E+04	621.96	C
0.16	7.54	0.375	0.142	0.888	0.299	5.85E+04	305.74	C
0.16	10.46	0.520	0.29	1.813	0.415	8.14E+04	588.52	C
0.16	6.87	0.342	0.29	1.813	0.273	5.36E+04	253.92	C
0.16	6.87	0.342	0.212	1.325	0.273	5.39E+04	254.01	C
0.16	6.87	0.342	0.151	0.944	0.273	5.38E+04	253.97	C
0.16	22.28	1.108	0.403	2.519	0.884	1.74E+05	2670.62	-
0.16	20.98	1.043	0.422	2.638	0.833	1.63E+05	2367.61	-
0.16	18.13	0.902	0.382	2.388	0.720	1.38E+05	1765.03	-
0.16	16.99	0.845	0.419	2.619	0.674	1.33E+05	1553.58	-
0.16	15.18	0.755	0.384	2.400	0.603	1.18E+05	1239.72	-

Los datos recolectados en la Tabla 1 permitieron generar el gráfico que se muestra en la Figura 19, donde se muestra la relación entre el número de Froude (Fr) y la sumersión relativa (S/D), asimismo se realizó una clasificación de los vórtices formados en los ensayos con el perfil de arista viva (recto) de acuerdo a lo propuesto por Sarkardeh et al. (2010), donde los vórtices tipo A son considerados de mayor intensidad, mientras que los vórtices tipo C son vórtices seguros, donde se puede observar una débil rotación del flujo.

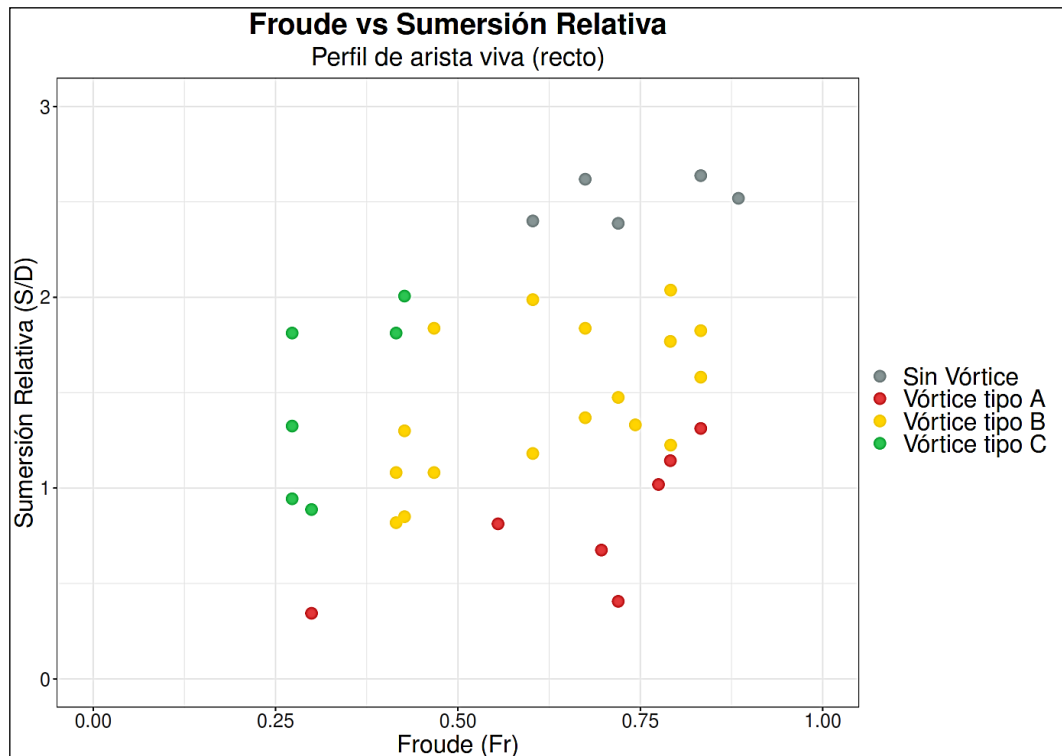


Figura 19: Fr vs S/D. Clasificación de vórtices (perfil de arista viva).

La Figura 19 muestra los tipos de vórtices originados durante los ensayos con el perfil de arista viva, siendo estos de clase A, B y C. Cabe mencionar que para valores de Froude entre 0.273 y 0.427 existe la probabilidad de formación de vórtices tipo C (representados por hoyuelos de baja intensidad sin arrastre de aire hacia la toma sumergida). Además, se grabaron mediante dos (02) cámaras digitales escenas de la formación y desarrollo de los vórtices desde distintos puntos de enfoque, dichas grabaciones se realizaron a los vórtices tipo B, con la finalidad de analizar el arrastre de aire durante un tiempo de 10 minutos.

Desde la Figura 20 hasta la Figura 31 se muestran los registros de arrastre de aire hacia la toma sumergida, de acuerdo a las grabaciones (10 min) de los vórtices tipo B formados durante los ensayos.

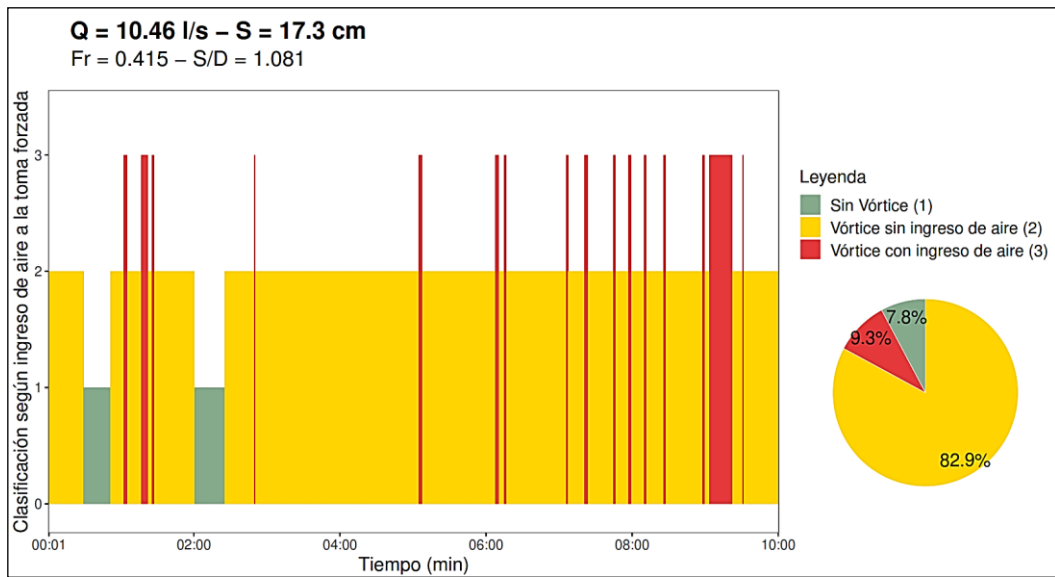


Figura 20: Registro del vórtice generado con una sumersión de 17.3 cm para un caudal de 10.46 l/s (ensayo con perfil de arista viva)

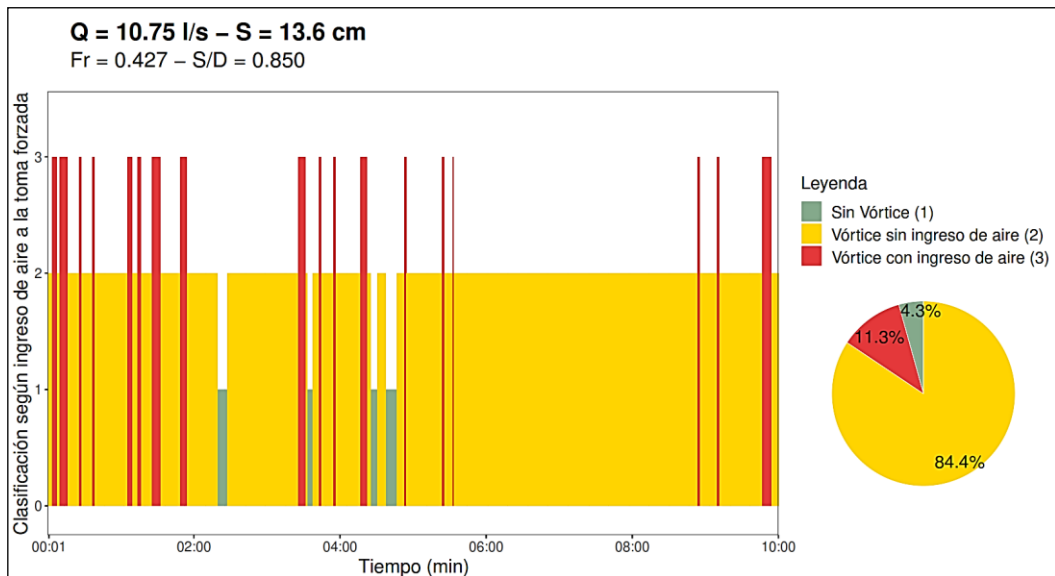


Figura 21: Registro del vórtice generado con una sumersión de 13.6 cm para un caudal de 10.75 l/s (ensayo con perfil de arista viva)

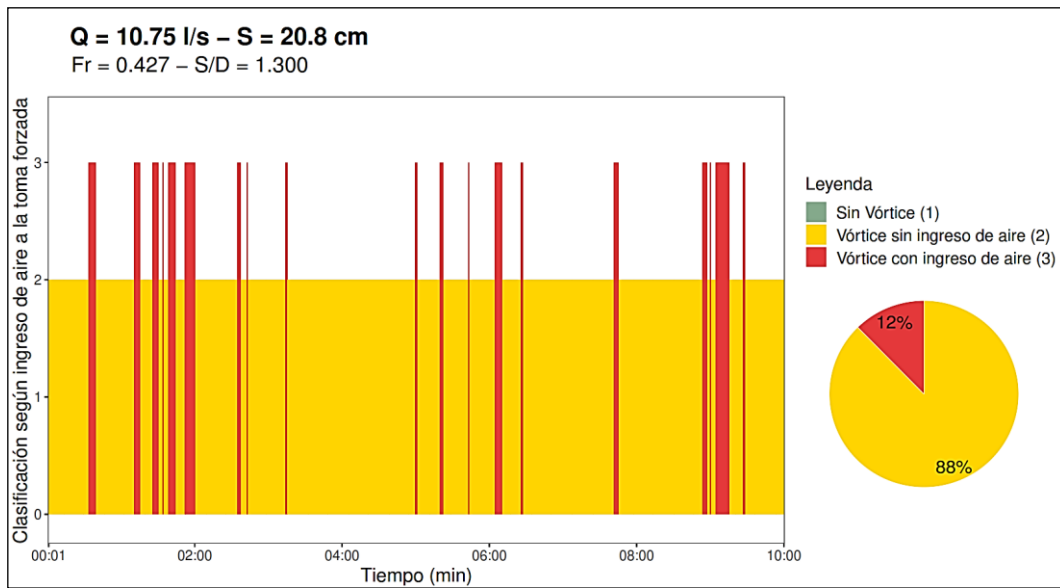


Figura 22: Registro del vórtice generado con una sumersión de 20.8 cm para un caudal de 10.75 l/s (ensayo con perfil de arista viva)

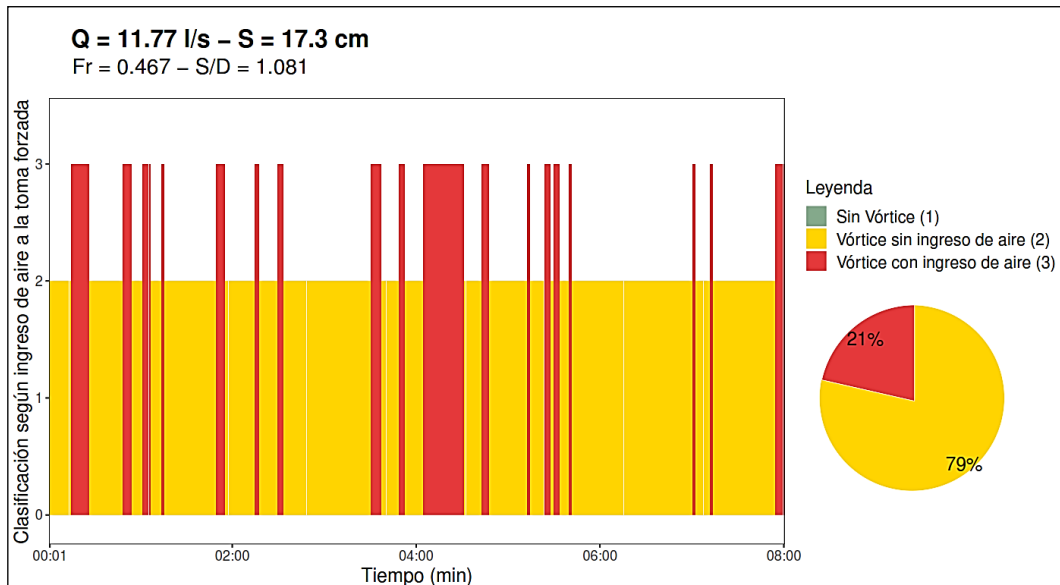


Figura 23: Registro del vórtice generado con una sumersión de 17.3 cm para un caudal de 11.77 l/s (ensayo con perfil de arista viva)

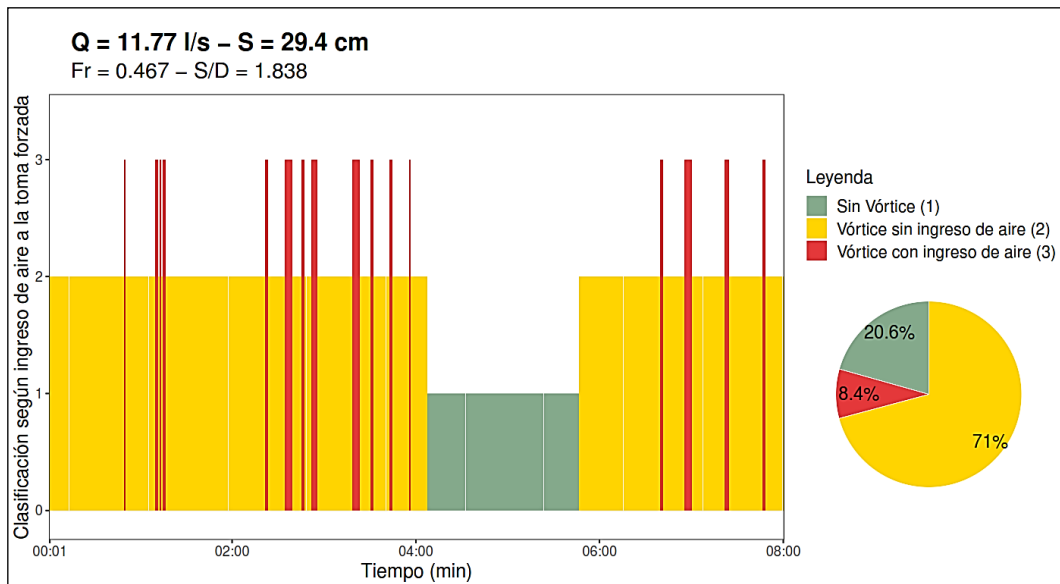


Figura 24: Registro del vórtice generado con una sumersión de 29.4 cm para un caudal de 11.77 l/s (ensayo con perfil de arista viva)

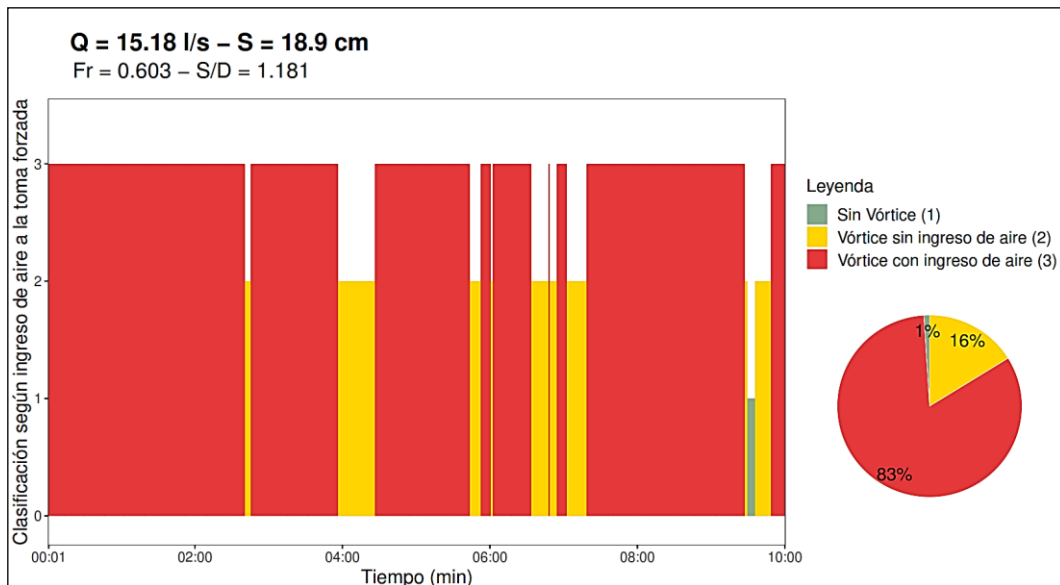


Figura 25: Registro del vórtice generado con una sumersión de 18.9 cm para un caudal de 15.18 l/s (ensayo con perfil de arista viva)

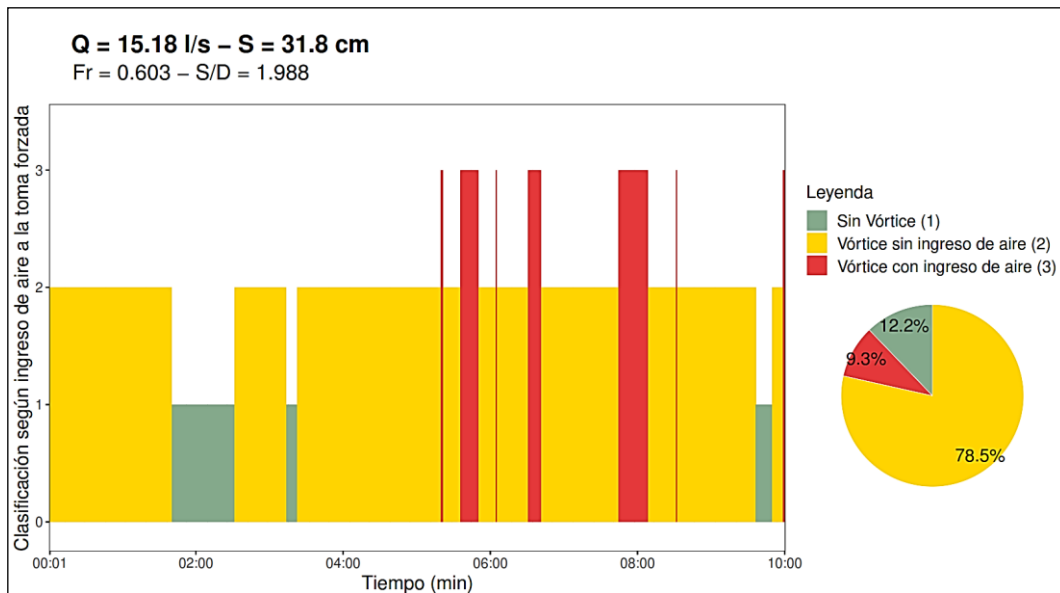


Figura 26: Registro del vórtice generado con una sumersión de 31.8 cm para un caudal de 15.18 l/s (ensayo con perfil de arista viva)

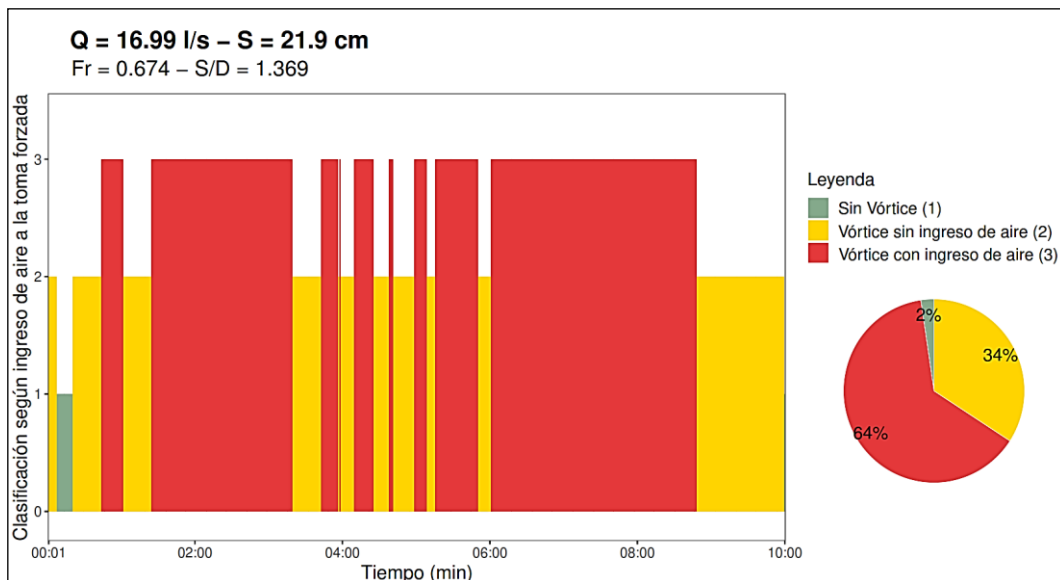


Figura 27: Registro del vórtice generado con una sumersión de 21.9 cm para un caudal de 16.99 l/s (ensayo con perfil de arista viva)

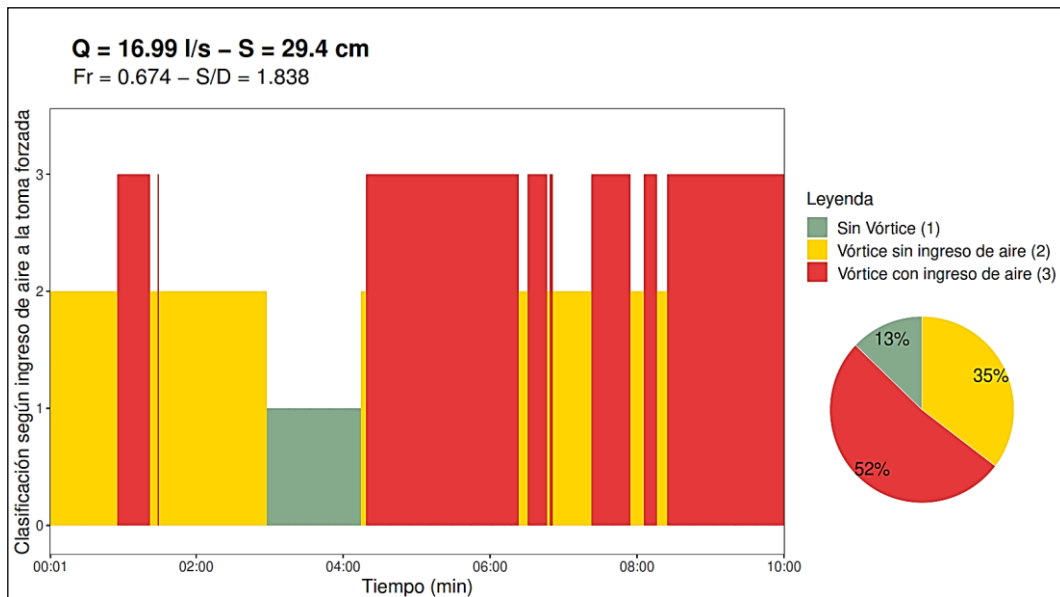


Figura 28: Registro del vórtice generado con una sumersión de 29.4 cm para un caudal de 16.99 l/s (ensayo con perfil de arista viva)

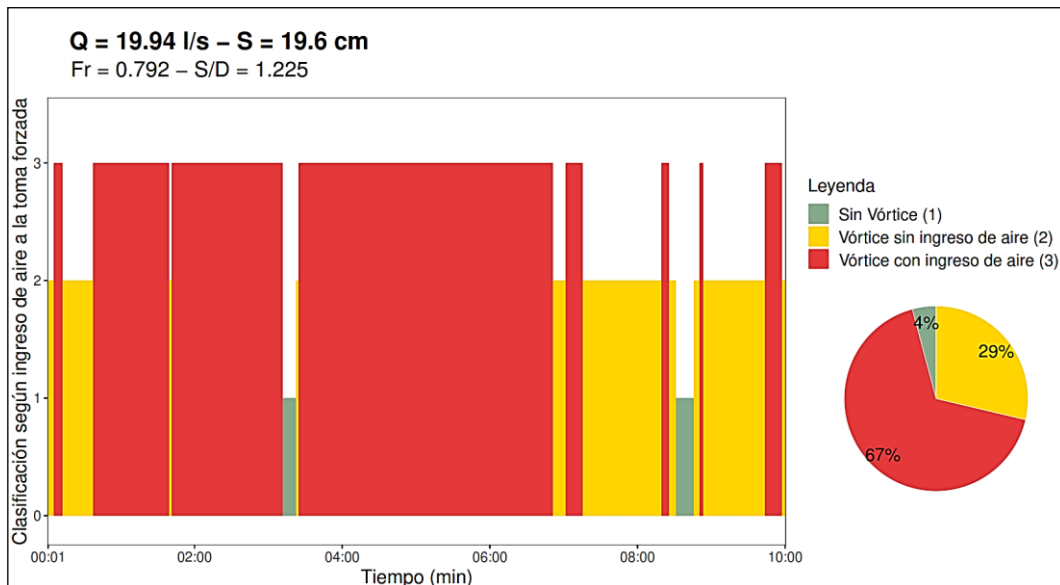


Figura 29: Registro del vórtice generado con una sumersión de 19.6 cm para un caudal de 19.94 l/s (ensayo con perfil de arista viva)

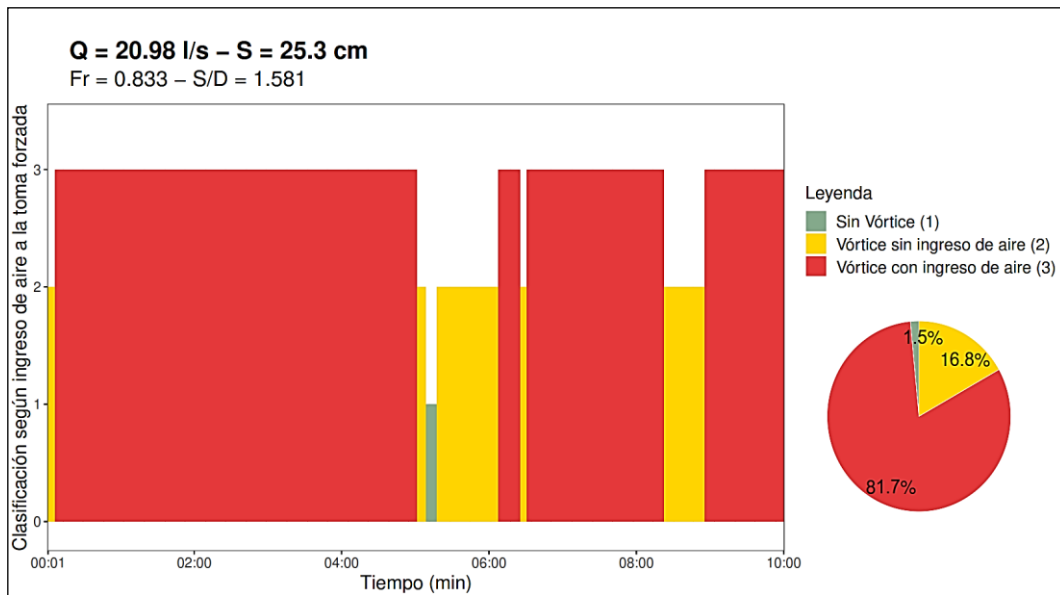


Figura 30: Registro del vórtice generado con una sumersión de 25.3 cm para un caudal de 20.98 l/s (ensayo con perfil de arista viva)

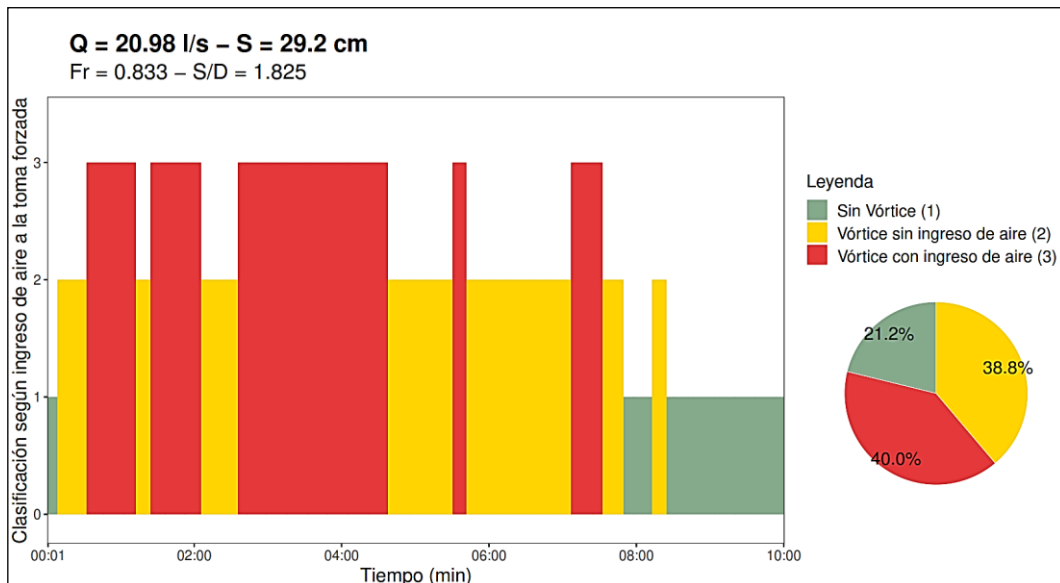


Figura 31: Registro del vórtice generado con una sumersión de 29.2 cm para un caudal de 20.98 l/s (ensayo con perfil de arista viva)

4.2.2 Registro de sumersión relativa

El registro de las variables recolectadas en cada ensayo con el perfil de arista viva (recto) se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Registro de datos correspondiente a los ensayos con el perfil de arista viva. (Fuente: Elaboración propia)

D (m)	Q (l/s)	V (m/s)	S (m)	S/D	Fr	Re	We	Ingreso de aire
0.16	20.98	1.043	0.21	1.313	0.833	1.63E+05	2367.16	SI
0.16	19.93	0.991	0.183	1.144	0.791	1.55E+05	2136.55	SI
0.16	19.52	0.971	0.163	1.019	0.775	1.52E+05	2049.94	SI
0.16	18.13	0.902	0.065	0.406	0.720	1.38E+05	1765.70	SI
0.16	17.55	0.873	0.108	0.675	0.697	1.36E+05	1656.42	SI
0.16	13.98	0.695	0.13	0.813	0.555	1.09E+05	1051.67	SI
0.16	7.54	0.375	0.055	0.344	0.299	5.88E+04	305.86	SI
0.16	20.98	1.043	0.292	1.825	0.833	1.64E+05	2368.06	SI
0.16	20.98	1.043	0.253	1.581	0.833	1.63E+05	2367.61	SI
0.16	19.94	0.992	0.326	2.038	0.792	1.56E+05	2139.10	SI
0.16	19.94	0.992	0.196	1.225	0.792	1.55E+05	2138.70	SI
0.16	19.93	0.991	0.283	1.769	0.791	1.55E+05	2136.55	SI
0.16	18.72	0.931	0.213	1.331	0.743	1.45E+05	1884.64	SI
0.16	18.13	0.902	0.236	1.475	0.720	1.37E+05	1764.36	SI
0.16	16.99	0.845	0.219	1.369	0.674	1.33E+05	1553.58	SI
0.16	16.99	0.845	0.294	1.838	0.674	1.33E+05	1553.28	SI
0.16	15.18	0.755	0.189	1.181	0.603	1.19E+05	1240.19	SI
0.16	15.18	0.755	0.318	1.988	0.603	1.19E+05	1239.96	SI
0.16	11.77	0.585	0.173	1.081	0.467	9.21E+04	745.45	SI
0.16	11.77	0.585	0.294	1.838	0.467	9.19E+04	745.30	SI
0.16	10.75	0.535	0.136	0.850	0.427	8.41E+04	621.84	SI
0.16	10.75	0.535	0.208	1.300	0.427	8.39E+04	621.72	SI
0.16	10.46	0.520	0.173	1.081	0.415	8.16E+04	588.63	SI
0.16	10.46	0.520	0.131	0.819	0.415	8.14E+04	588.52	SI
0.16	10.75	0.535	0.321	2.006	0.427	8.44E+04	621.96	NO
0.16	7.54	0.375	0.142	0.888	0.299	5.85E+04	305.74	NO
0.16	10.46	0.520	0.29	1.813	0.415	8.14E+04	588.52	NO
0.16	6.87	0.342	0.29	1.813	0.273	5.36E+04	253.92	NO
0.16	6.87	0.342	0.212	1.325	0.273	5.39E+04	254.01	NO
0.16	6.87	0.342	0.151	0.944	0.273	5.38E+04	253.97	NO
0.16	22.28	1.108	0.403	2.519	0.884	1.74E+05	2670.62	NO
0.16	20.98	1.043	0.422	2.638	0.833	1.63E+05	2367.61	NO
0.16	18.13	0.902	0.382	2.388	0.720	1.38E+05	1765.03	NO
0.16	16.99	0.845	0.419	2.619	0.674	1.33E+05	1553.58	NO
0.16	15.18	0.755	0.384	2.400	0.603	1.18E+05	1239.72	NO

Los datos recolectados en la Tabla 2 permitieron generar el gráfico que se muestra en la Figura 32, donde se muestra la relación entre el número de Froude (Fr) y la

sumersión relativa (S/D), dicho gráfico también permite evaluar las zonas donde se generan vórtices con ingreso de aire hacia la toma sumergida, el respectivo análisis de ello se elaborará en el siguiente capítulo.

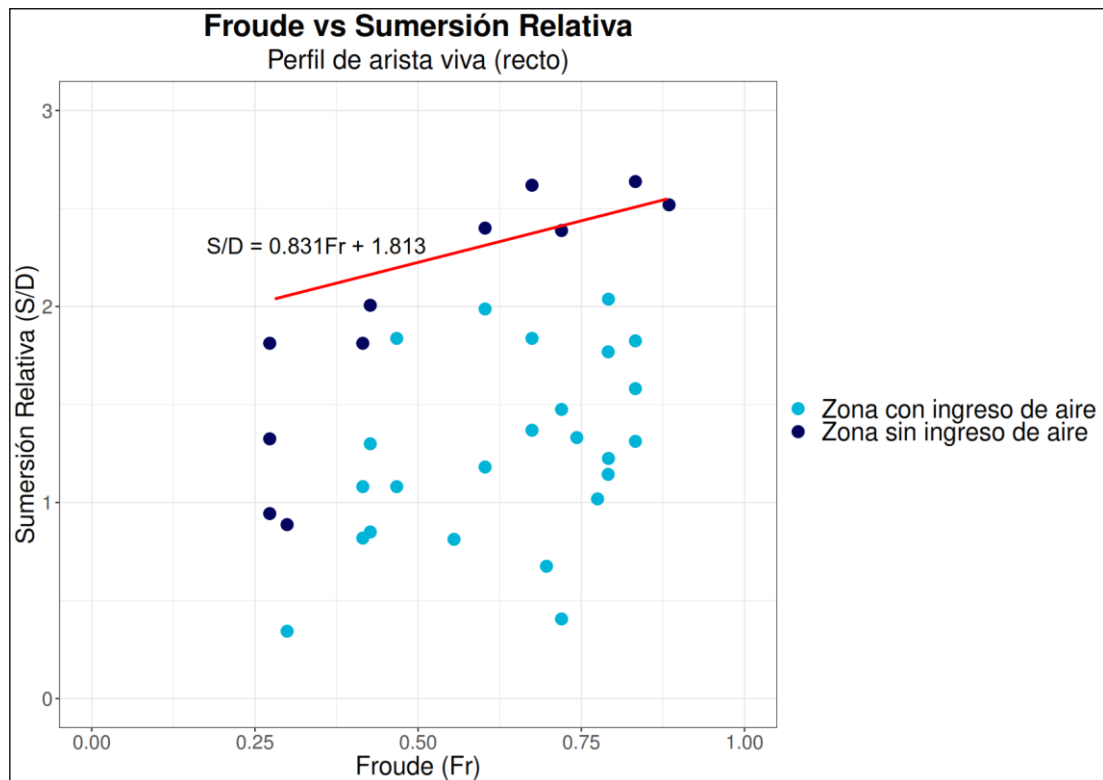


Figura 32: Fr vs S/D. Registro de Ingreso de aire (perfil de arista viva).

En la Figura 32 se muestra una recta que limita la zona donde no existe formación de vórtices con arrastre de aire hacia la toma sumergida, determinada mediante todos aquellos datos que se acercan más hacia una zona libre de vórtices. En virtud de ello se analizó aquellos datos que presentaron una sumersión relativa entre 2.006 y 2.519, además no generaban vórtices con ingreso de aire hacia la toma sumergida. Considerando dicho análisis se determinó la siguiente ecuación:

$$\frac{S}{D} = 0.831Fr + 1.813 \quad (4-1)$$

En tal sentido, se determinaron las siguientes zonas libre de vórtices con arrastre de aire:

$$\frac{S}{D} \geq 0.831Fr + 1.813, \text{ donde: } 0.273 < Fr \leq 0.884 \quad (4-2)$$

$$\frac{S}{D} \geq 0.944 \quad \wedge \quad Fr \leq 0.273 \quad (4-3)$$

donde:

S : Profundidad de sumersión, medida desde la superficie libre del agua hasta la clave de la tubería sumergida (m)

D : Diámetro interior de la tubería (m)

Fr : Número de Froude

4.2.3 Pérdida de carga local

Se realizaron ensayos con la finalidad de obtener el coeficiente de pérdida de carga del perfil de arista viva (recto), para ello se instaló un piezómetro a la salida de la tubería forzada en la cámara de carga con el objetivo de medir la variación de presión entre la cámara de carga y el punto A, tal como se observa en el esquema de la Figura 33, para ello se realizó una perforación de 2 mm de diámetro en la clave de la tubería forzada y se colocó una abrazadera que sujetaba el piezómetro (tubería 8 mm de diámetro externo y 5 mm de diámetro interno), tal como se observa en la Foto 10. El registro de datos de dichas pruebas se muestra en la Tabla 3.

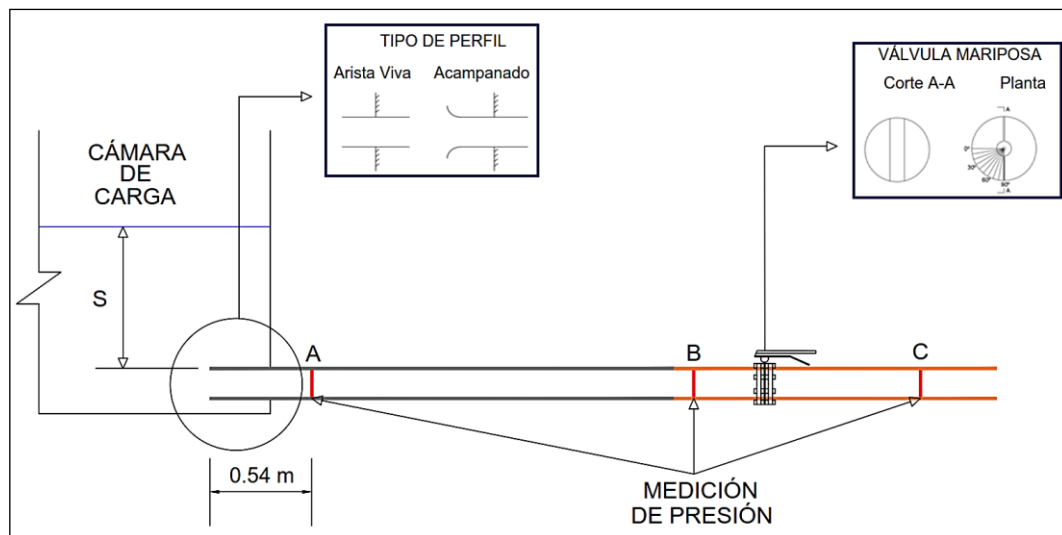


Figura 33: Esquema de ubicación de piezómetros.

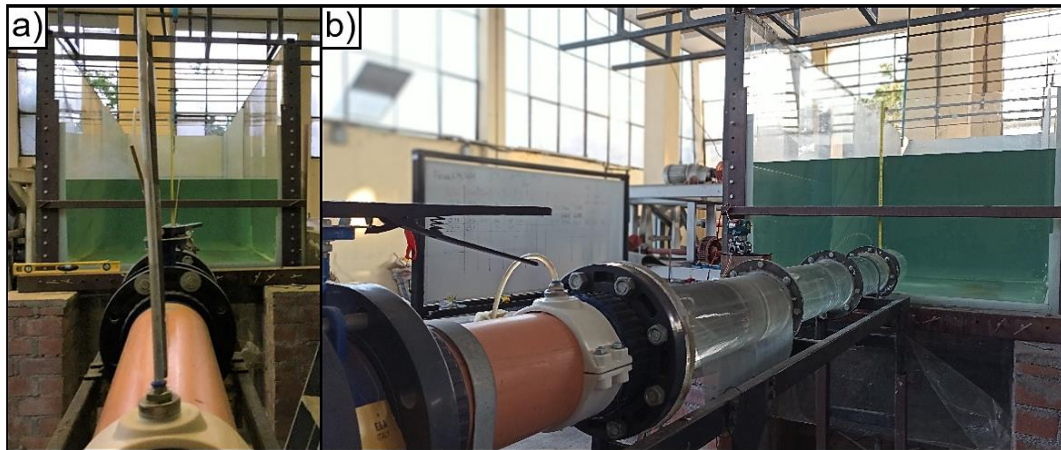


Foto 10: Instalación de piezómetros, a) Tubo piezométrico con 5 mm de diámetro interno. b) Abrazaderas instaladas para sujetar los piezómetros.

Tabla 3: Registro de presiones en los ensayos con el perfil de arista viva. (Fuente: Elaboración propia)

Diámetro sección A (m)	Q (l/s)	V_A (m/s)	S (m)	Presión Pto.A (mca)	Variación de presión (m)	$V_A^2/2g$ (m)
0.16	23.17	1.152	0.47	0.437	0.117	0.068
0.16	22.72	1.130	0.435	0.407	0.112	0.065
0.16	22.17	1.103	0.381	0.359	0.106	0.062
0.16	21.62	1.075	0.328	0.312	0.1	0.059
0.16	21.09	1.049	0.302	0.289	0.097	0.056
0.16	21.09	1.049	0.53	0.518	0.096	0.056
0.16	20.56	1.023	0.412	0.403	0.093	0.053
0.16	20.35	1.012	0.366	0.361	0.089	0.052
0.16	19.73	0.981	0.319	0.32	0.083	0.049
0.16	16.71	0.831	0.375	0.401	0.058	0.035
0.16	15.53	0.772	0.26	0.295	0.049	0.030
0.16	15.35	0.763	0.23	0.266	0.048	0.030
0.16	11.69	0.581	0.255	0.312	0.027	0.017
0.16	11.32	0.563	0.206	0.266	0.024	0.016
0.16	10.89	0.542	0.125	0.187	0.022	0.015

Del registro de datos de la Tabla 3 se elaboró la Figura 34, donde se puede observar la relación entre la caída de presión y la presión dinámica ($V_A^2/2g$) considerando como nivel de referencia el eje de la tubería forzada.

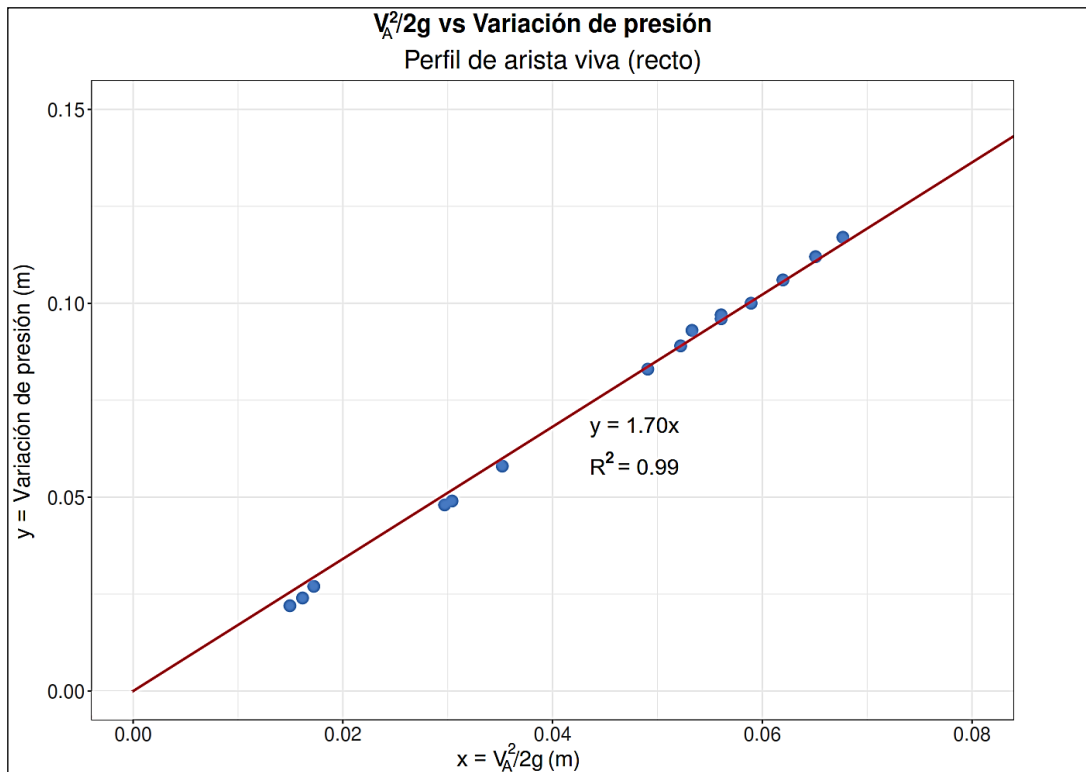


Figura 34: Relación entre la variación de presión vs la presión dinámica (perfil de arista viva)

4.3 ENSAYOS UTILIZANDO EL PERFIL ACAMPANADO

Los ensayos con el perfil acampanado fueron realizados con caudales de 6 l/s a 21 l/s. En cada prueba se midió la temperatura del agua y se registraron las propiedades físicas como densidad, viscosidad cinemática y tensión superficial (Ver ANEXO A:).

Se programó realizar dos grupos de ensayos, el primer grupo de pruebas se realizó con la finalidad de clasificar el tipo de vórtice que se genera en las distintas pruebas, así como determinar y establecer la relación adimensional existente entre la sumersión relativa y el número de Froude, por otro lado el segundo grupo de pruebas se realizó con la finalidad de determinar el coeficiente de pérdida de carga del perfil acampanado, para ello se instaló un piezómetro a la salida de la tubería forzada de la cámara de carga, dicho registro de datos tomado con el piezómetro se comparó con las lecturas obtenidas de un transmisor de presión

marca Yokogawa modelo EJA110E, tal como se muestra en la Foto 9, resultando valores aceptables.

4.3.1 Clasificación de vórtices

En la presente investigación, se realizó la clasificación de los vórtices que se visualizaron en los ensayos con el perfil acampanado, dicha clasificación se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Clasificación de vórtices generados en los ensayos con el perfil acampanado. (Fuente: Elaboración propia)

D (m)	Q (l/s)	V (m/s)	S (m)	S/D	Fr	Re	We	Tipo de vórtice
0.155	20.98	1.112	0.265	1.710	0.902	1.69E+05	2604.69	B
0.155	20.98	1.112	0.23	1.484	0.902	1.69E+05	2604.20	B
0.155	20.98	1.112	0.188	1.213	0.902	1.68E+05	2603.71	B
0.155	19.94	1.057	0.3	1.935	0.857	1.61E+05	2352.86	B
0.155	19.94	1.057	0.173	1.116	0.857	1.60E+05	2352.41	B
0.155	19.93	1.056	0.161	1.039	0.857	1.61E+05	2350.50	B
0.155	19.93	1.056	0.26	1.677	0.857	1.60E+05	2350.06	B
0.155	19.52	1.034	0.142	0.916	0.839	1.57E+05	2254.79	B
0.155	18.72	0.992	0.192	1.239	0.805	1.50E+05	2072.97	B
0.155	18.13	0.961	0.293	1.890	0.779	1.46E+05	1945.10	B
0.155	18.13	0.961	0.195	1.258	0.779	1.46E+05	1944.73	B
0.155	17.55	0.930	0.09	0.581	0.754	1.41E+05	1821.95	B
0.155	16.99	0.900	0.201	1.297	0.730	1.38E+05	1708.82	B
0.155	16.99	0.900	0.274	1.768	0.730	1.37E+05	1708.50	B
0.155	15.18	0.804	0.174	1.123	0.652	1.23E+05	1364.12	B
0.155	15.18	0.804	0.302	1.948	0.652	1.23E+05	1363.87	B
0.155	13.98	0.741	0.246	1.587	0.601	1.13E+05	1156.76	B
0.155	13.98	0.741	0.115	0.742	0.601	1.13E+05	1156.76	B
0.155	11.77	0.624	0.165	1.065	0.506	9.51E+04	819.94	B
0.155	10.75	0.570	0.128	0.826	0.462	8.68E+04	683.98	B
0.155	10.75	0.570	0.201	1.297	0.462	8.66E+04	683.85	B
0.155	10.46	0.554	0.169	1.090	0.450	8.43E+04	647.45	B
0.155	10.46	0.554	0.123	0.794	0.450	8.40E+04	647.33	B
0.155	11.77	0.624	0.285	1.839	0.506	9.48E+04	819.78	B
0.155	19.93	1.056	0.32	2.065	0.857	1.61E+05	2350.50	C
0.155	7.54	0.400	0.139	0.897	0.324	6.04E+04	336.30	C
0.155	7.54	0.400	0.051	0.329	0.324	6.04E+04	336.30	C
0.155	6.87	0.364	0.209	1.348	0.295	5.57E+04	279.40	C
0.155	6.87	0.364	0.149	0.961	0.295	5.57E+04	279.40	C
0.155	6.87	0.364	0.284	1.832	0.295	5.53E+04	279.29	C

D (m)	Q (l/s)	V (m/s)	S (m)	S/D	Fr	Re	We	Tipo de vórtice
0.155	22.28	1.181	0.37	2.387	0.958	1.79E+05	2937.49	-
0.155	20.98	1.112	0.393	2.535	0.902	1.69E+05	2604.20	-
0.155	19.93	1.056	0.352	2.271	0.857	1.60E+05	2349.61	-
0.155	16.99	0.900	0.402	2.594	0.730	1.38E+05	1708.82	-
0.155	15.18	0.804	0.369	2.381	0.652	1.22E+05	1363.61	-
0.155	10.75	0.570	0.315	2.032	0.462	8.71E+04	684.11	-

Los datos recolectados en la Tabla 4 permitieron generar el gráfico que se muestra en la Figura 35, donde se muestra la relación entre el número de Froude (Fr) y la sumersión relativa (S/D), asimismo se realiza una clasificación de los vórtices formados en los ensayos con el perfil acampanado, de acuerdo a lo propuesto por Sarkardeh et al. (2010), donde los vórtices tipo A son considerados de mayor intensidad, mientras que los vórtices tipo C son vórtices seguros, donde se puede observar una débil rotación del flujo.

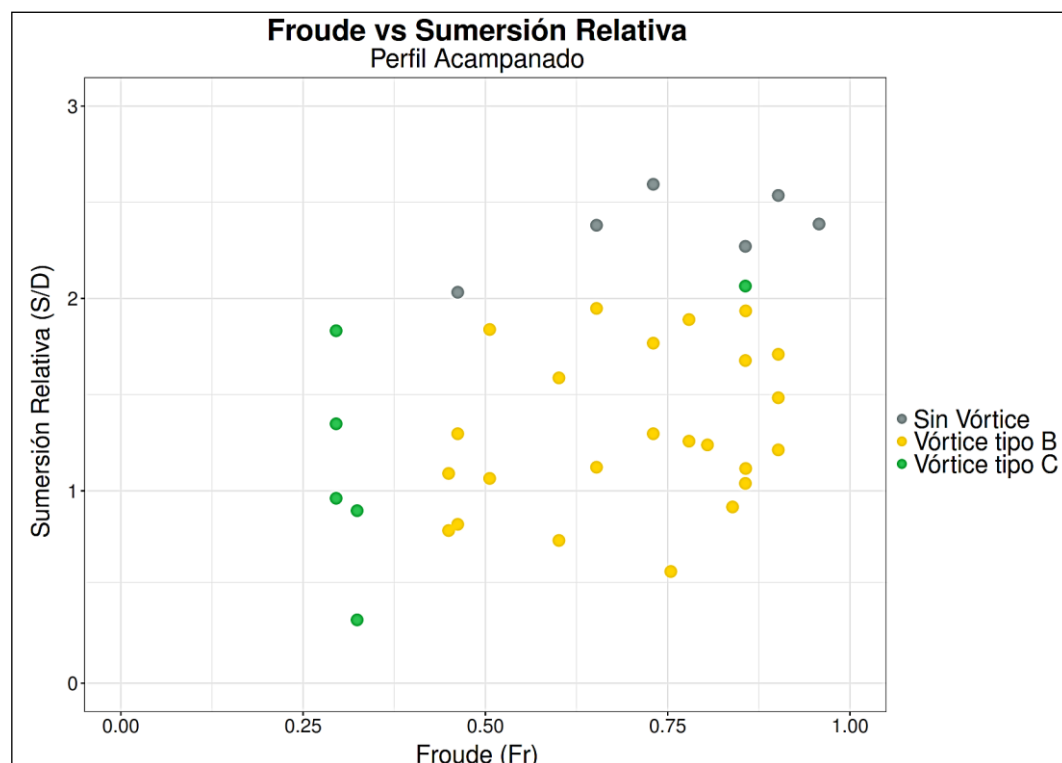


Figura 35: Fr vs S/D. Clasificación de vórtices (perfil acampanado)

La Figura 35 muestra los tipos de vórtices originados durante los ensayos con el perfil acampanado, siendo estos de clase B y C. Cabe mencionar que para valores de Froude entre 0.295 y 0.324 existe la probabilidad de formación de vórtices tipo

C (representados por hoyuelos de baja intensidad sin arrastre de aire hacia la toma sumergida).

Además, se grabaron mediante dos (02) cámaras digitales escenas de la formación y desarrollo de los vórtices desde distintos puntos de enfoque, dichas grabaciones se realizaron a los vórtices tipo B, con la finalidad de analizar el arrastre de aire durante un tiempo de 10 minutos.

Desde la Figura 36 hasta la Figura 46 se muestran los registros de arrastre de aire hacia la toma sumergida, de acuerdo a las grabaciones (10 min) de los vórtices tipo B formados durante los ensayos.

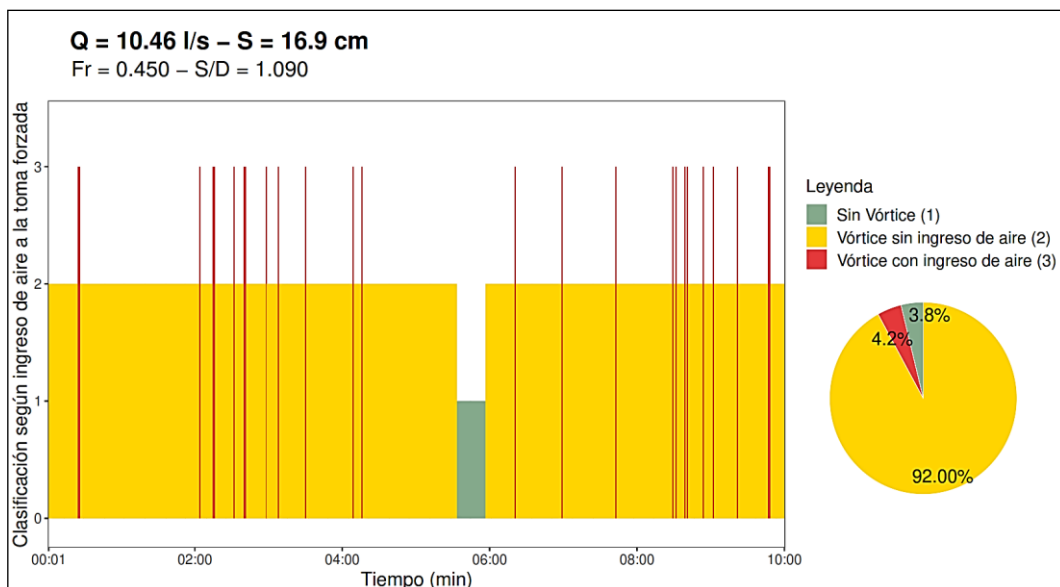


Figura 36: Registro del vórtice generado con una sumersión de 16.9 cm para un caudal de 10.46 l/s (ensayo con perfil acampanado)

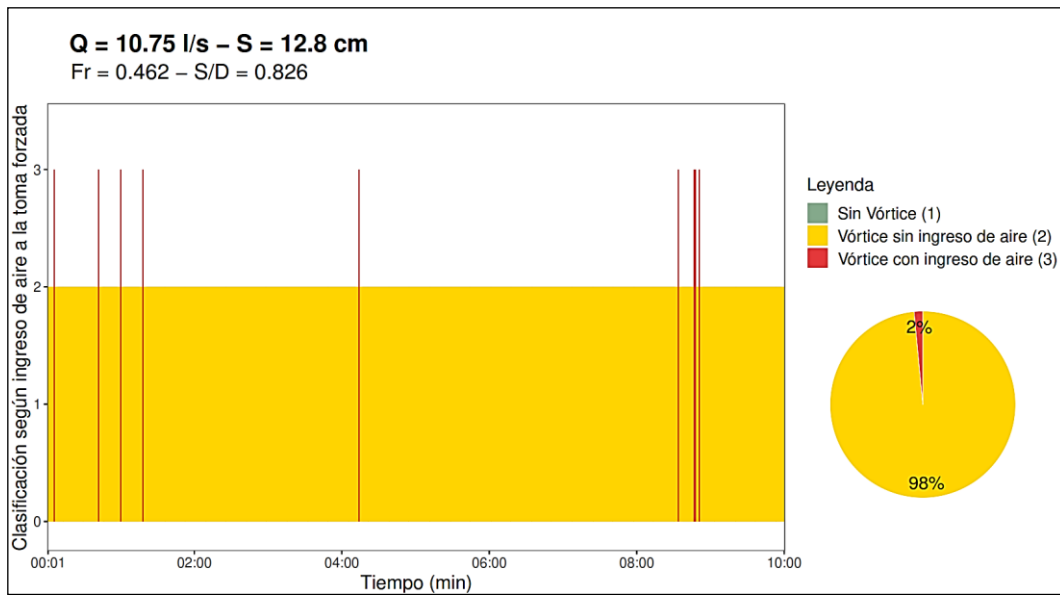


Figura 37: Registro del vórtice generado con una sumersión de 12.8 cm para un caudal de 10.75 l/s (ensayo con perfil acampanado)

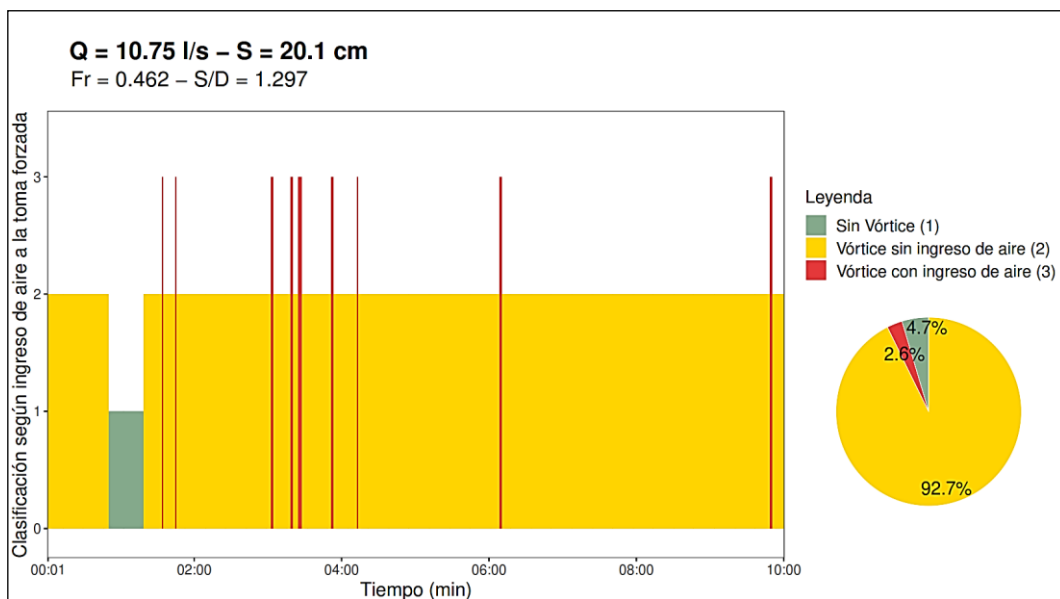


Figura 38: Registro del vórtice generado con una sumersión de 20.1 cm para un caudal de 10.75 l/s (ensayo con perfil acampanado)

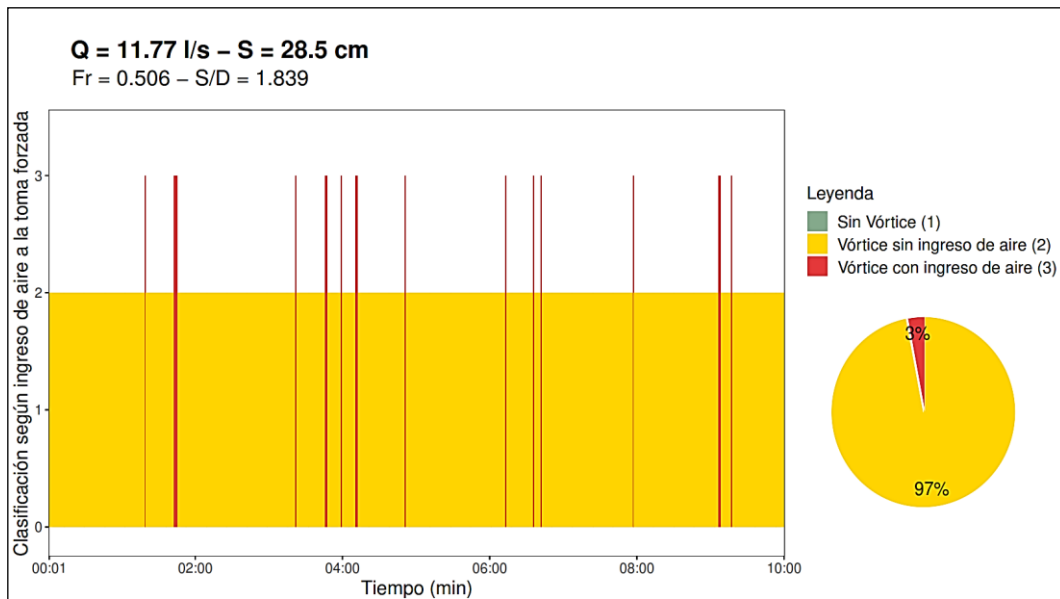


Figura 39: Registro del vórtice generado con una sumersión de 28.5 cm para un caudal de 11.77 l/s (ensayo con perfil acampanado)

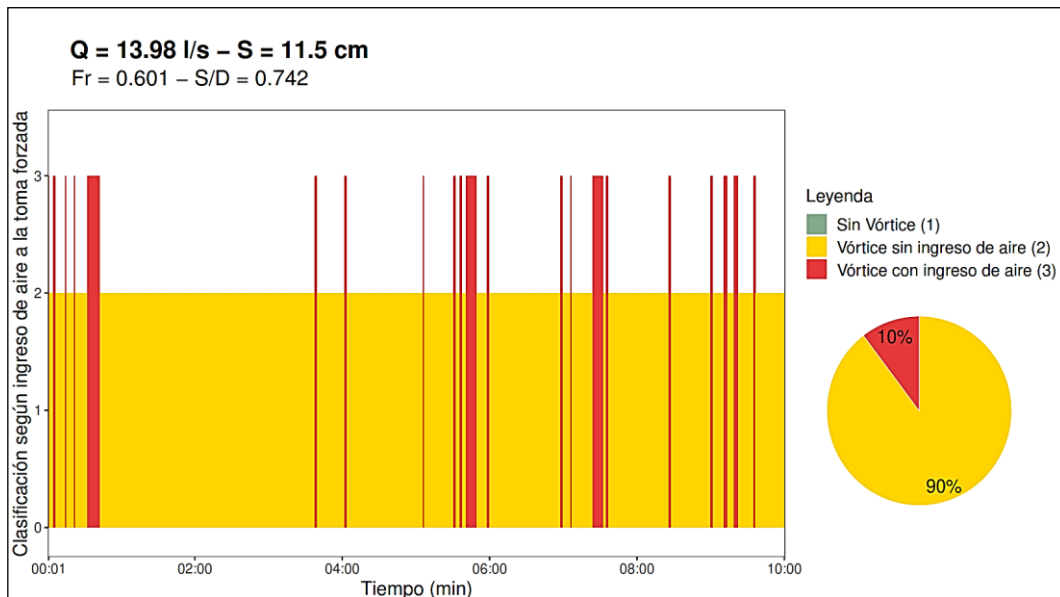


Figura 40: Registro del vórtice generado con una sumersión de 11.5 cm para un caudal de 13.98 l/s (ensayo con perfil acampanado)

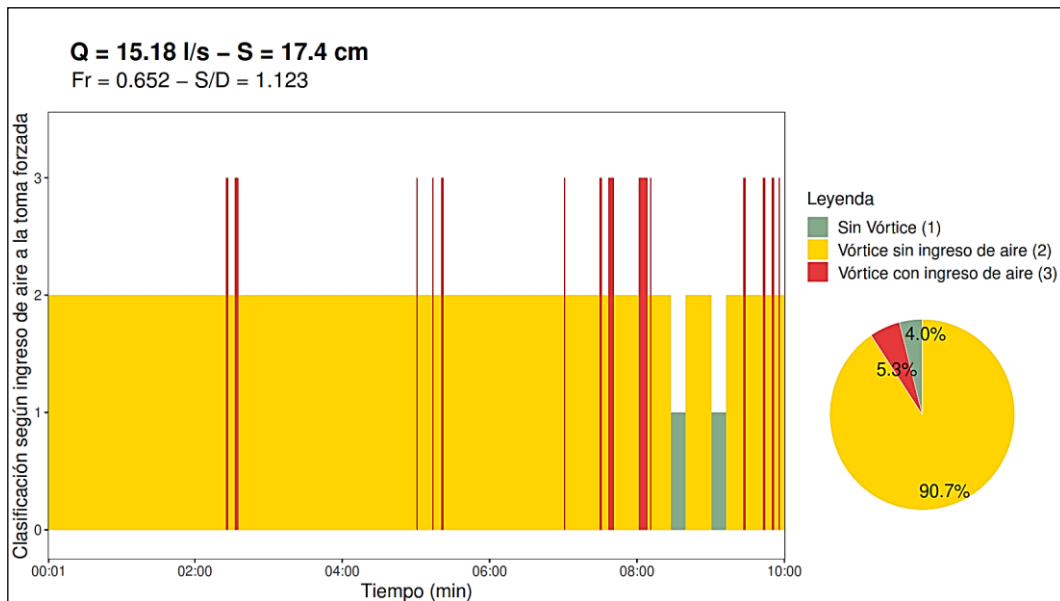


Figura 41: Registro del vórtice generado con una sumersión de 17.4 cm para un caudal de 15.18 l/s (ensayo con perfil acampanado)

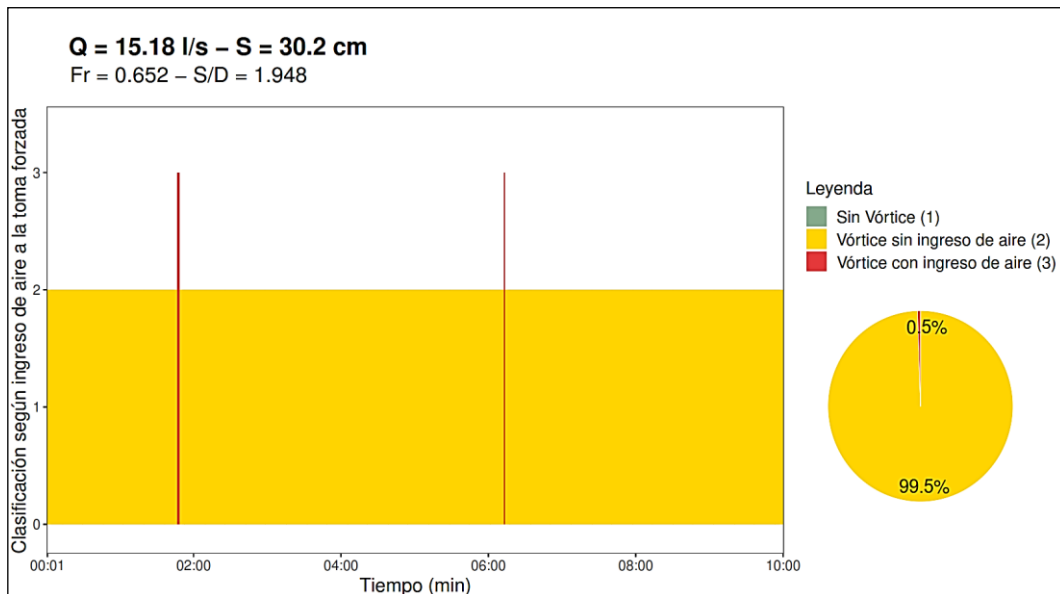


Figura 42: Registro del vórtice generado con una sumersión de 30.2 cm para un caudal de 15.18 l/s (ensayo con perfil acampanado)

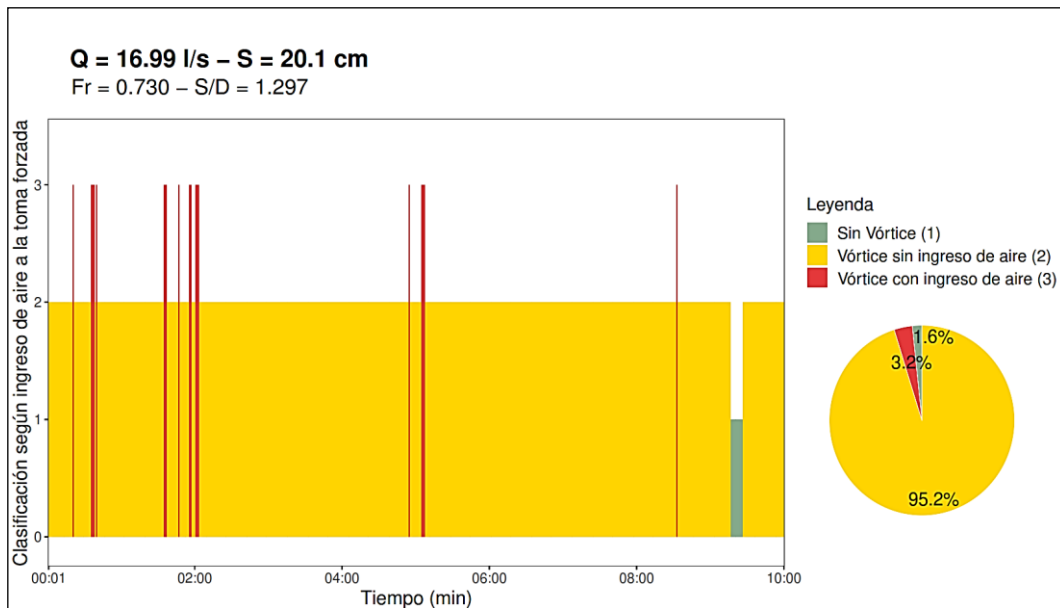


Figura 43: Registro del vórtice generado con una sumersión de 20.1 cm para un caudal de 16.99 l/s (ensayo con perfil acampanado)

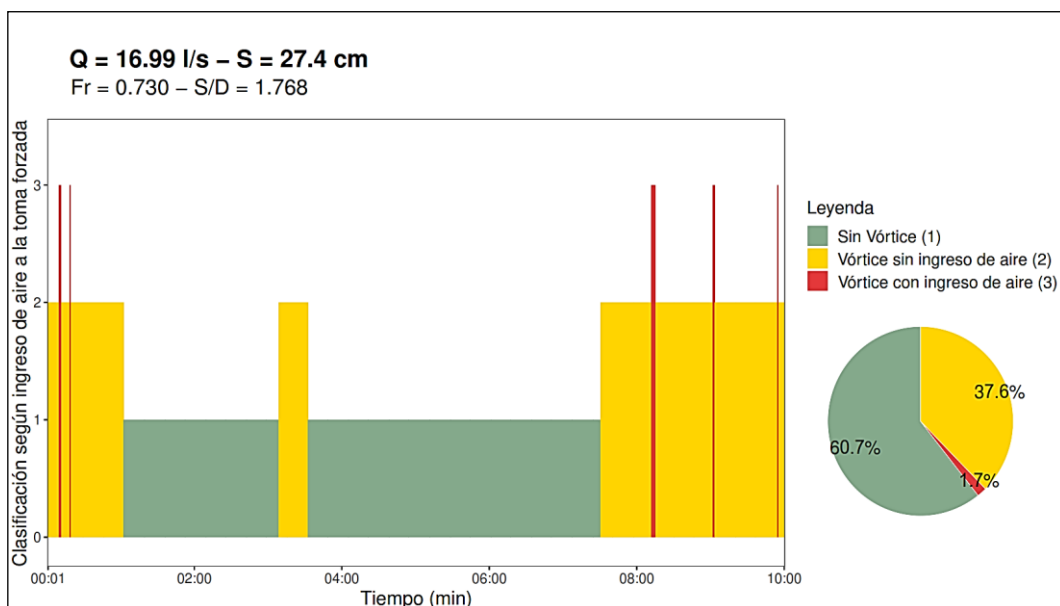


Figura 44: Registro del vórtice generado con una sumersión de 27.4 cm para un caudal de 16.99 l/s (ensayo con perfil acampanado)

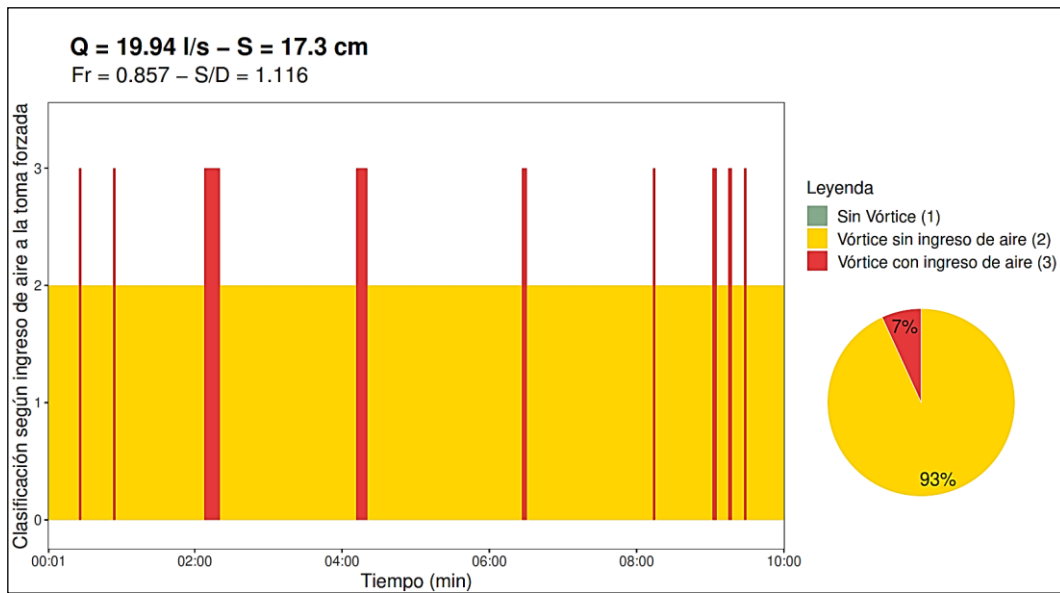


Figura 45: Registro del vórtice generado con una sumersión de 17.3 cm para un caudal de 19.94 l/s (ensayo con perfil acampanado)

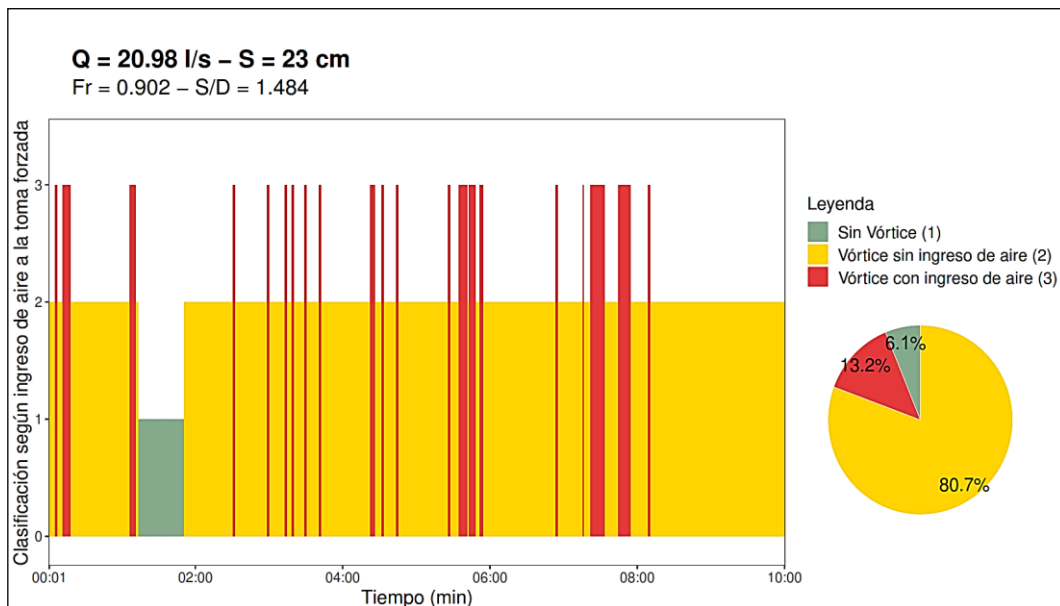


Figura 46: Registro del vórtice generado con una sumersión de 23 cm para un caudal de 20.98 l/s (ensayo con perfil acampanado)

4.3.2 Registro de sumersión relativa

El registro de las variables recolectadas en cada ensayo con el perfil acampanado se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5: Registro de datos correspondiente a los ensayos con el perfil acampanado. (Fuente: Elaboración propia)

D (m)	Q (l/s)	V (m/s)	S (m)	S/D	Fr	Re	We	Ingreso de aire
0.155	20.98	1.112	0.265	1.710	0.902	1.69E+05	2604.69	SI
0.155	20.98	1.112	0.23	1.484	0.902	1.69E+05	2604.20	SI
0.155	20.98	1.112	0.188	1.213	0.902	1.68E+05	2603.71	SI
0.155	19.94	1.057	0.3	1.935	0.857	1.61E+05	2352.86	SI
0.155	19.94	1.057	0.173	1.116	0.857	1.60E+05	2352.41	SI
0.155	19.93	1.056	0.161	1.039	0.857	1.61E+05	2350.50	SI
0.155	19.93	1.056	0.26	1.677	0.857	1.60E+05	2350.06	SI
0.155	19.52	1.034	0.142	0.916	0.839	1.57E+05	2254.79	SI
0.155	18.72	0.992	0.192	1.239	0.805	1.50E+05	2072.97	SI
0.155	18.13	0.961	0.293	1.890	0.779	1.46E+05	1945.10	SI
0.155	18.13	0.961	0.195	1.258	0.779	1.46E+05	1944.73	SI
0.155	17.55	0.930	0.09	0.581	0.754	1.41E+05	1821.95	SI
0.155	16.99	0.900	0.201	1.297	0.730	1.38E+05	1708.82	SI
0.155	16.99	0.900	0.274	1.768	0.730	1.37E+05	1708.50	SI
0.155	15.18	0.804	0.174	1.123	0.652	1.23E+05	1364.12	SI
0.155	15.18	0.804	0.302	1.948	0.652	1.23E+05	1363.87	SI
0.155	13.98	0.741	0.246	1.587	0.601	1.13E+05	1156.76	SI
0.155	13.98	0.741	0.115	0.742	0.601	1.13E+05	1156.76	SI
0.155	11.77	0.624	0.165	1.065	0.506	9.51E+04	819.94	SI
0.155	10.75	0.570	0.128	0.826	0.462	8.68E+04	683.98	SI
0.155	10.75	0.570	0.201	1.297	0.462	8.66E+04	683.85	SI
0.155	10.46	0.554	0.169	1.090	0.450	8.43E+04	647.45	SI
0.155	10.46	0.554	0.123	0.794	0.450	8.40E+04	647.33	SI
0.155	11.77	0.624	0.285	1.839	0.506	9.48E+04	819.78	SI
0.155	19.93	1.056	0.32	2.065	0.857	1.61E+05	2350.50	NO
0.155	7.54	0.400	0.139	0.897	0.324	6.04E+04	336.30	NO
0.155	7.54	0.400	0.051	0.329	0.324	6.04E+04	336.30	NO
0.155	6.87	0.364	0.209	1.348	0.295	5.57E+04	279.40	NO
0.155	6.87	0.364	0.149	0.961	0.295	5.57E+04	279.40	NO
0.155	6.87	0.364	0.284	1.832	0.295	5.53E+04	279.29	NO
0.155	22.28	1.181	0.37	2.387	0.958	1.79E+05	2937.49	NO
0.155	20.98	1.112	0.393	2.535	0.902	1.69E+05	2604.20	NO
0.155	19.93	1.056	0.352	2.271	0.857	1.60E+05	2349.61	NO
0.155	16.99	0.900	0.402	2.594	0.730	1.38E+05	1708.82	NO
0.155	15.18	0.804	0.369	2.381	0.652	1.22E+05	1363.61	NO
0.155	10.75	0.570	0.315	2.032	0.462	8.71E+04	684.11	NO

Los datos registrados en la Tabla 5 permitieron generar el gráfico que se muestra en la Figura 47, donde se muestra la relación entre el número de Froude (Fr) y la

sumersión relativa (S/D), dicho gráfico también permite evaluar las zonas donde se generan vórtices con ingreso de aire hacia la toma sumergida, el respectivo análisis de ello se realizará en el siguiente capítulo.

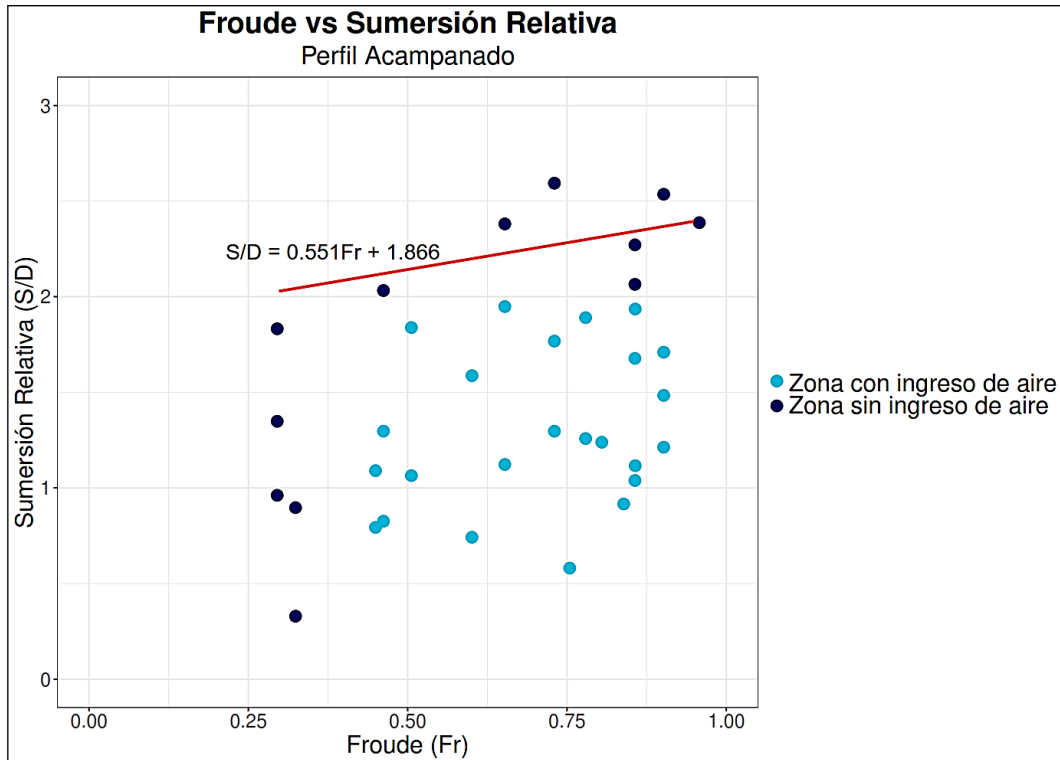


Figura 47: Fr vs S/D. Registro de ingreso de aire (perfil acampanado)

En la Figura 47 se muestra una recta que limita la zona donde no existe formación de vórtices con arrastre de aire hacia la toma sumergida, determinada mediante todos aquellos datos que se acercan más hacia una zona libre de vórtices. En virtud de ello se analizó aquellos datos que presentaron una sumersión relativa entre 2.032 y 2.387, además no generaban vórtices con ingreso de aire. Considerando dicho análisis se determinó la siguiente ecuación:

$$\frac{S}{D} = 0.551Fr + 1.866 \quad (4-4)$$

Donde las zonas libres de vórtices con arrastre de aire estarían representadas por las siguientes expresiones:

$$\frac{S}{D} \geq 0.551Fr + 1.866, \quad \text{donde: } 0.324 < Fr \leq 0.958 \quad (4-5)$$

$$\frac{S}{D} \geq 0.329 \wedge Fr \leq 0.324 \quad (4-6)$$

donde:

- S : Profundidad de sumersión, medida desde la superficie libre del agua hasta la clave de la tubería sumergida (m)
- D : Diámetro interior de la tubería (m)
- Fr : Número de Froude

4.3.3 Pérdida de carga local

Se realizaron ensayos con la finalidad de obtener el coeficiente de pérdida de carga del perfil acampanado, para ello se instaló un piezómetro a la salida de la tubería forzada de la cámara de carga, tal como se observa en el esquema de la Figura 33. El registro de datos de dichas pruebas se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6: Registro de presiones en los ensayos con el perfil acampanado. (Fuente: Elaboración propia)

Diámetro Sección. A (m)	Q (l/s)	V _A (m/s)	S (m)	Presión pto. A (mca)	Variación de presión (m)	V _A ² /2g (m)
0.16	23.17	1.152	0.433	0.439	0.078	0.068
0.16	22.72	1.130	0.4	0.409	0.075	0.065
0.16	22.17	1.103	0.35	0.362	0.072	0.062
0.16	21.62	1.075	0.296	0.312	0.068	0.059
0.16	21.09	1.049	0.274	0.292	0.066	0.056
0.16	21.09	1.049	0.5	0.519	0.065	0.056
0.16	20.56	1.023	0.384	0.405	0.063	0.053
0.16	20.35	1.012	0.338	0.362	0.06	0.052
0.16	19.73	0.981	0.294	0.322	0.056	0.049
0.16	16.71	0.831	0.353	0.398	0.039	0.035
0.16	15.53	0.772	0.248	0.297	0.035	0.030
0.16	15.35	0.763	0.215	0.267	0.032	0.030
0.16	11.69	0.581	0.243	0.308	0.019	0.017
0.16	11.32	0.563	0.197	0.265	0.016	0.016
0.16	10.89	0.542	0.115	0.185	0.014	0.015

Del registro de datos de la Tabla 6 se elaboró la Figura 48, donde se puede observar la relación entre la caída de presión y la presión dinámica ($V_A^2/2g$) considerando como nivel de referencia el eje de la tubería forzada.

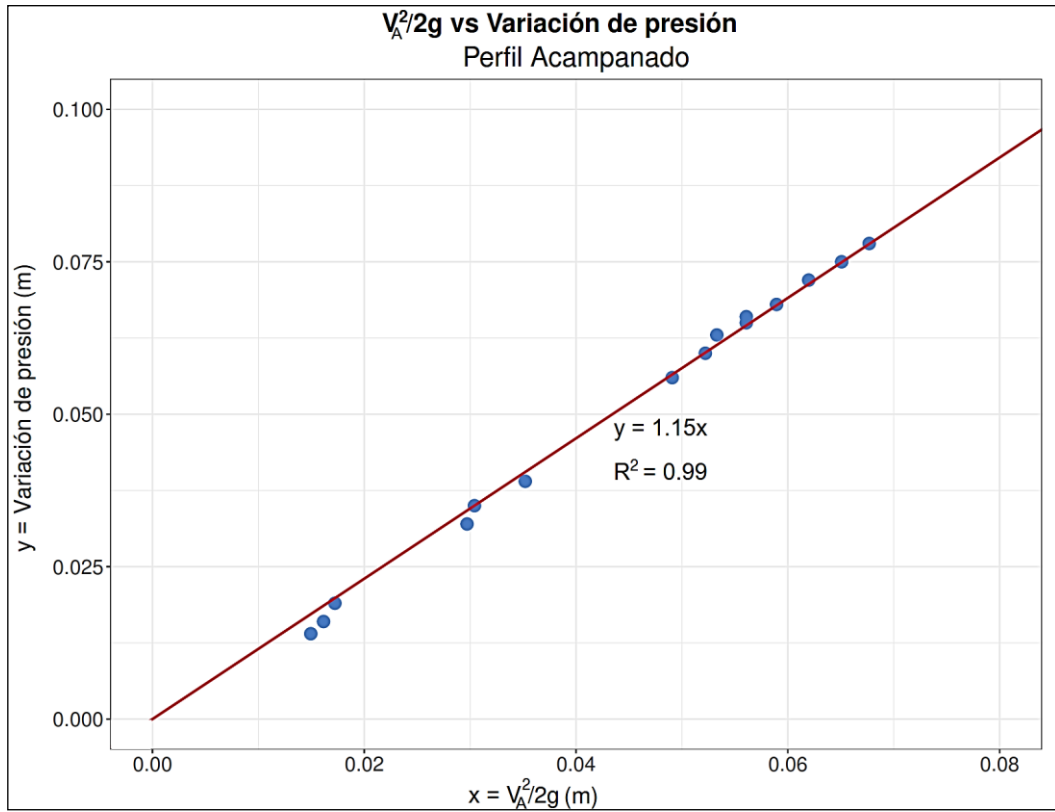


Figura 48: Relación entre la variación de presión vs la presión dinámica (perfil acampanado).

CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 RESPECTO A LA CLASIFICACIÓN DE VÓRTICES

En la presente investigación se realizó la clasificación del tipo de vórtice generado en los distintos ensayos realizados con el perfil de arista viva (recto) y acampanado, tal como se muestra en la Figura 49, dicha clasificación se realizó en función de la relación del número de Froude y la sumersión relativa.

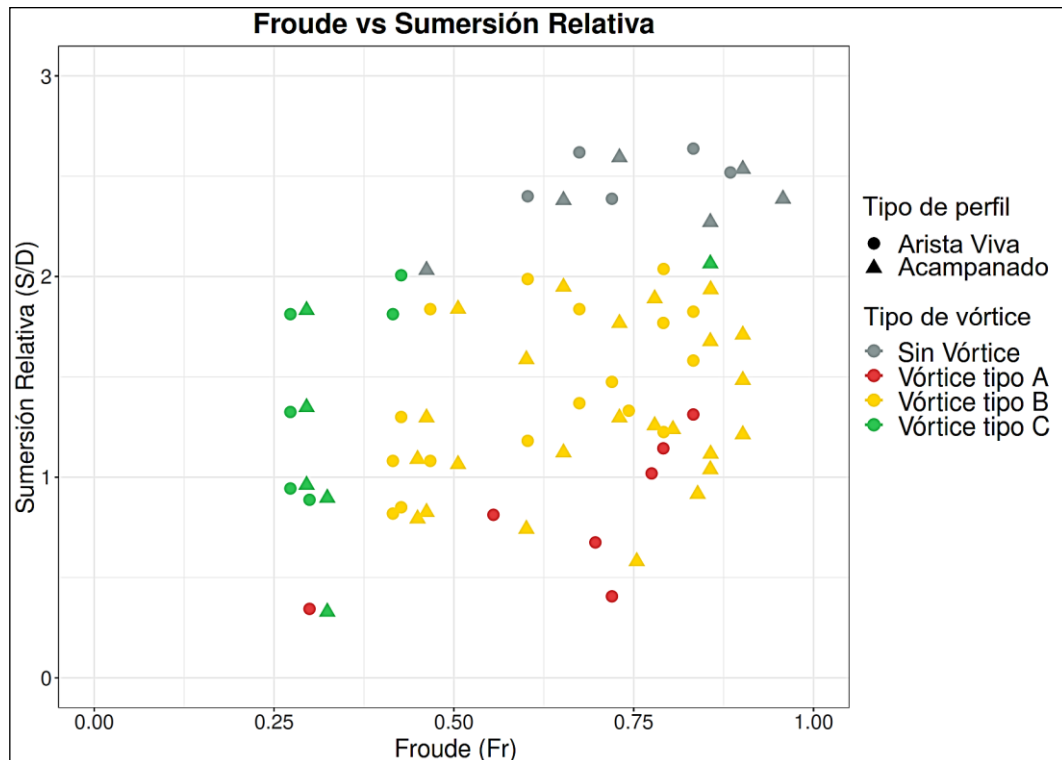


Figura 49: Tipo de vórtice. (Relación Fr vs S/D)

De la Figura 49 se puede deducir que en los ensayos realizados con el perfil acampanado solo se observaron dos tipos de vórtices (B y C), mientras que para los ensayos con el perfil de arista viva (recto) se observaron los tres tipos de vórtices (A, B y C) de acuerdo a la clasificación de Sarkardeh et al. (2010). Respecto a los vórtices tipo A generados en los ensayos con el perfil de arista viva, es posible concluir que su aparición es consecuencia de los niveles de sumersión que cumplen con la siguiente expresión:

$$\frac{S}{D} \leq 1.6319Fr - 0.1355 \quad ; \quad \text{donde } 0.299 \leq Fr \leq 0.833 \quad (5-14)$$

donde:

- S : Profundidad de sumersión, medida desde la superficie libre del agua hasta la clave de la tubería sumergida (m)
- D : Diámetro interior de la tubería (m)
- Fr : Número de Froude

Por otro lado, de las grabaciones realizadas a los vórtices tipo B, donde se evaluó el tiempo de arrastre de aire hacia la toma sumergida en los ensayos, se generaron la Figura 50 y Figura 51.

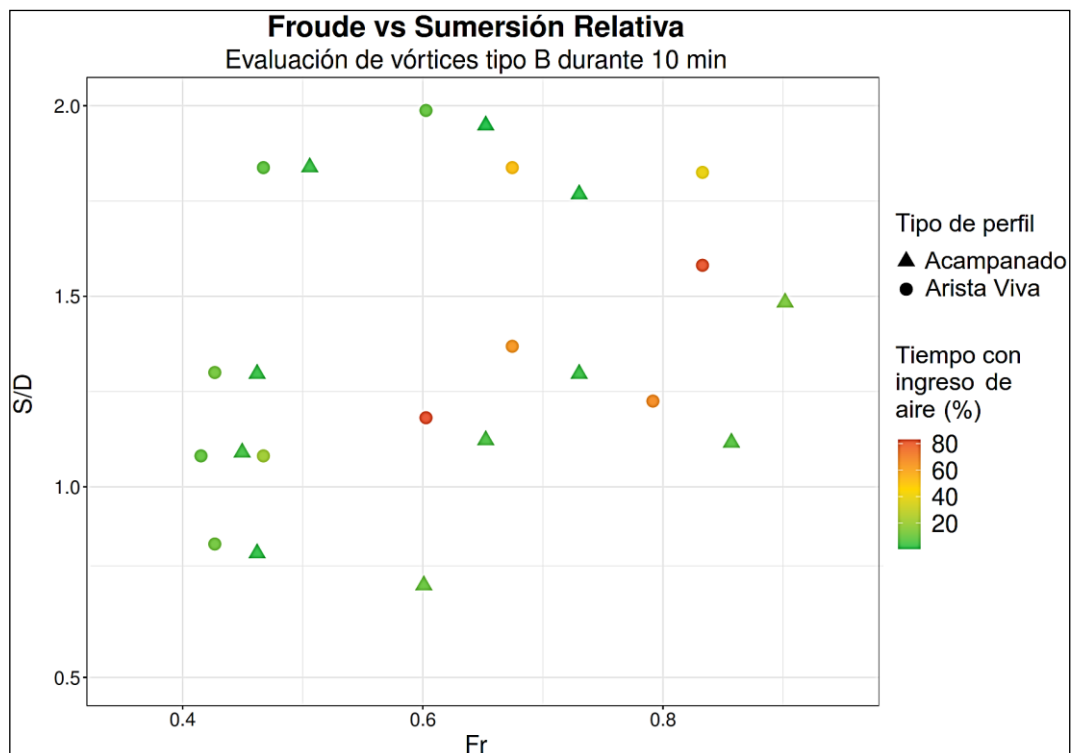


Figura 50: Evaluación de vórtices tipo B durante 10 min. (Relación Fr y S/D)

En la Figura 50 se puede observar que los vórtices tipo B generados durante los ensayos con el perfil de arista viva (recto) presentan una gran variación en el tiempo de ingreso de aire hacia la toma forzada. En virtud de lo mencionado, se puede deducir que, para un valor de sumersión relativa constante, el tiempo de ingreso de aire aumentará conforme se incremente el número de Froude, mientras que, para un valor constante del número de Froude, el ingreso de aire aumentará conforme se disminuya la sumersión relativa. Asimismo, se puede mencionar que los vórtices generados durante los ensayos con el perfil tipo acampanado

producen un menor tiempo de arrastre de aire, tal como se puede observar en la Figura 51.

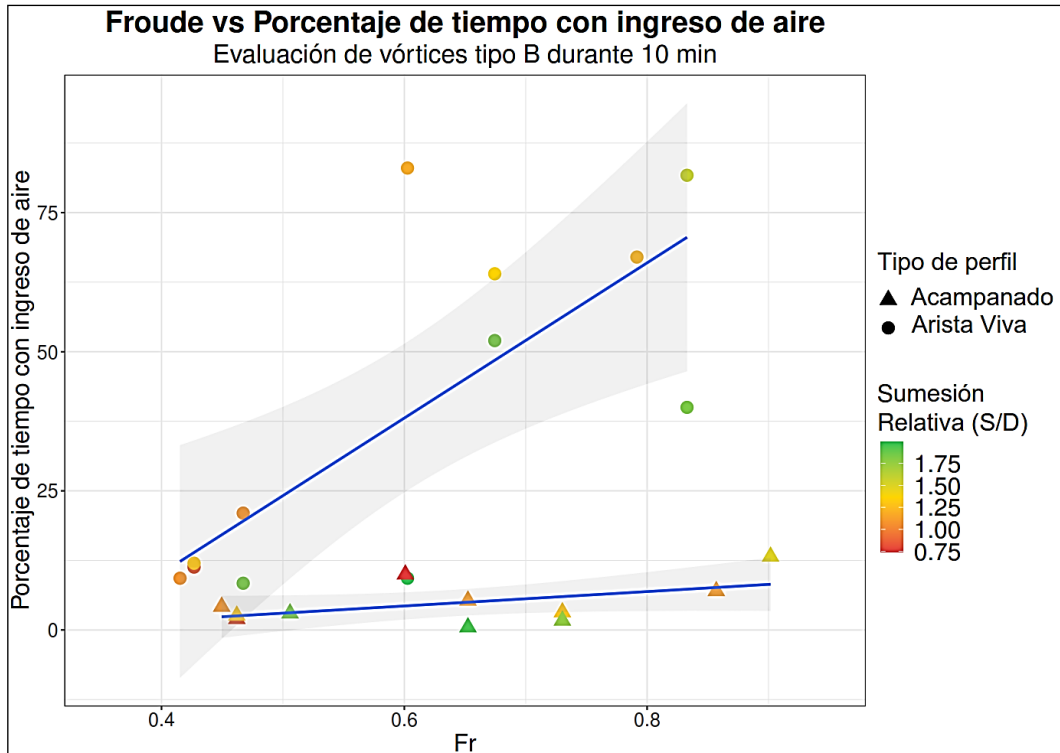


Figura 51: Evaluación de vórtices tipo B durante 10 min. (Relación Fr y Porcentaje de tiempo con ingreso de aire)

5.2 RESPECTO A LA RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE FROUDE Y LA SUMERSIÓN RELATIVA.

En el presente estudio, de acuerdo al perfil de entrada ensayado, se determinó zonas en función de la relación del número de Froude y la sumersión relativa donde no se generaron vórtices con arrastre de aire hacia la toma forzada, tal como se muestra en la Figura 52, dichas zonas cumplen con las siguientes expresiones:

- Para perfil de arista viva:

$$\frac{S}{D} \geq 0.831Fr + 1.813, \quad \text{donde } 0.273 < Fr \leq 0.884 \quad (5-1)$$

$$\frac{S}{D} \geq 0.944 \wedge Fr \leq 0.273 \quad (5-2)$$

- Para perfil acampanado:

$$\frac{S}{D} \geq 0.551Fr + 1.866, \quad \text{donde } 0.324 < Fr \leq 0.958 \quad (5-3)$$

$$\frac{S}{D} \geq 0.329 \wedge Fr \leq 0.324 \quad (5-4)$$

donde:

S : Profundidad de sumersión, medida desde la superficie libre del agua hasta la clave de la tubería sumergida (m)

D : Diámetro interior de la tubería (m)

Fr : Número de Froude

Como se muestra en la Figura 52, la recta que limita la zona de no formación de vórtices descrita con los datos del perfil de arista viva (recto) presenta un mayor valor de sumersión relativa respecto a la recta descrita con los datos del perfil acampanado, lo que conllevaría a concluir que, utilizando el perfil acampanado como entrada a la toma forzada, se necesitaría una menor sumersión para evitar la formación de vórtices con arrastre de aire.

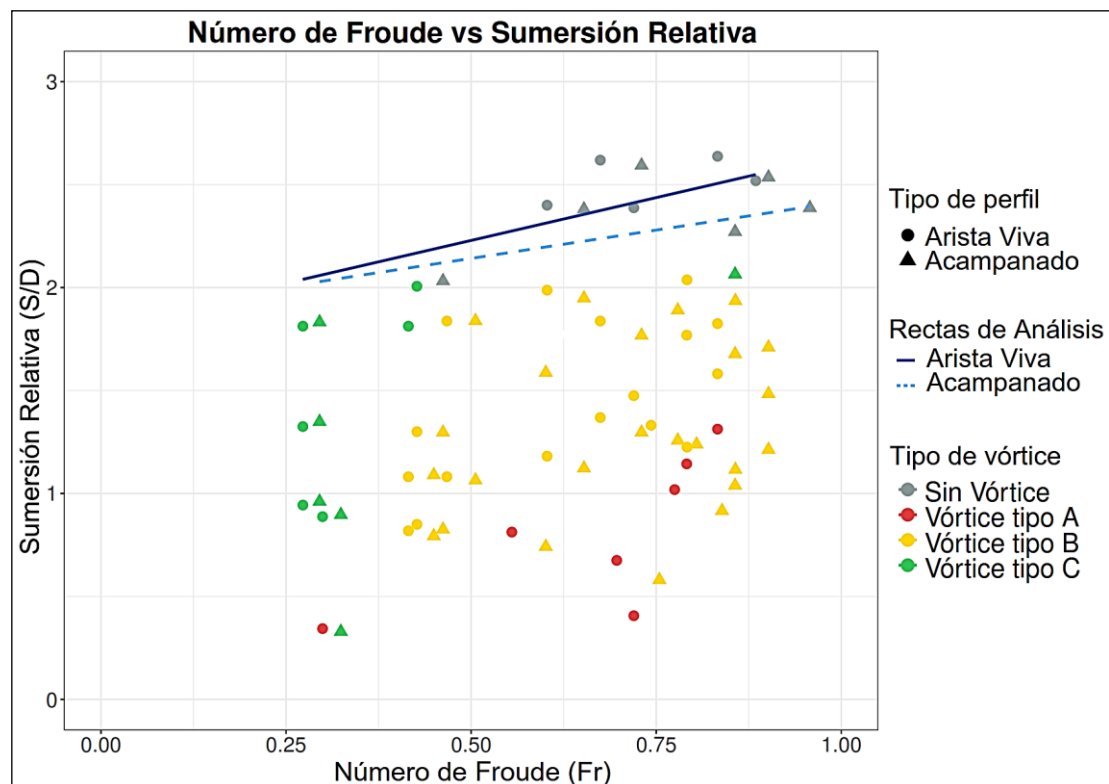


Figura 52: Determinación de zonas donde no se generan vórtices con arrastre de aire hacia la toma sumergida. (Relación Fr vs S/D)

5.3 RESPECTO A INVESTIGACIONES PASADAS.

Comparando los criterios propuestos en investigaciones pasadas con los criterios definidos en la presente investigación, se obtienen los siguientes resultados:

5.3.1 Criterio de Gordon (1970)

$$S = kV\sqrt{D} \quad (5-5)$$

donde:

- D : Diámetro interior de la tubería (pies)
- S : Profundidad de sumersión medida a partir de la superficie libre del agua hasta la clave de la tubería de toma (pies)
- V : Velocidad media del flujo en la tubería (pies/s)
- k : 0.3 (condiciones simétricas de flujo) y 0.4 (condiciones asimétricas de flujo)

En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos aplicando este criterio para condiciones simétricas a valores ubicados en la zona de no formación de vórtices con arrastre de aire hacia la toma forzada.

Tabla 7: Comparación de resultados de acuerdo al criterio de Gordon (1970)

Tipo de Perfil	D (pies)	Q (l/s)	Fr	V (pies/s)	Gordon (1970)	Rincón (2022)	
						De las Ecuaciones (4-1) y (4-4)	Del registro de Datos observados
						S/D	S/D
De arista viva (recto)	0.524	18.13	0.720	2.959	1.226	2.411	2.388
De arista viva (recto)	0.524	6.87	0.273	1.122	0.465	2.040	1.813
Acampanado	0.508	19.93	0.857	3.464	1.458	2.233	2.065
Acampanado	0.508	10.75	0.462	1.870	0.787	2.121	2.032

Los resultados de la Tabla 7 muestran que los valores de sumersión relativa recomendados por Gordon (1970) son menores a los obtenidos en los ensayos con el perfil de arista viva (recto) y acampanado, en relación a lo anterior se puede concluir que los datos analizados en la presente investigación se encuentran en

una zona libre de formación de vórtices, sin embargo cabe mencionar que la configuración de las tomas pertenecientes a las hidroeléctricas analizadas en los ensayos de Gordon (1970) difieren al modelo físico utilizado en el presente estudio, lo que podría contribuir a las diferencias obtenidas en la comparación de resultados.

5.3.2 Criterio de Pennino y Hecker (1980)

$$\frac{V}{\sqrt{gS}} < 0.23 \quad (5-6)$$

donde:

- V : Velocidad en la entrada de la toma sumergida (m/s)
- S : Profundidad de sumersión, medida desde la superficie libre del agua hasta el eje de la tubería (m)
- g : aceleración de la gravedad (m/s²)

En la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos aplicando este criterio a valores ubicados en zona de no formación de vórtices con arrastre de aire hacia la toma forzada.

Tabla 8: Comparación de resultados de acuerdo al criterio de Pennino y Hecker (1980)

Tipo de Perfil	D* (m)	Q (l/s)	V (m/s)	Pennino y Hecker (1980)	Rincón (2022)	
					De la Ecuación (4-4)	Del registro de Datos observados
				S	S	
Acampanado	0.279	19.93	0.326	0.205	0.446	0.404
Acampanado	0.279	10.75	0.176	0.060	0.413	0.399

*D=Diámetro de Abocinamiento

Los resultados de la Tabla 8 muestran que los valores cumplen con lo recomendado por Pennino y Hecker (1980).

5.3.3 Criterio de Knauss (1987)

$$S/D = \begin{cases} 1.5, Fr < 0.5 \\ 2Fr + 0.5, Fr > 0.5 \end{cases} \quad (5-7)$$

donde:

- S : Profundidad de sumersión, medida desde la superficie libre del agua hasta el eje de la tubería (m)
 D : Diámetro interno de la tubería sumergida (m)
 Fr : Número de Froude en la toma sumergida

En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos aplicando este criterio a valores ubicados en zona de no formación de vórtices con arrastre de aire hacia la toma forzada.

Tabla 9: Comparación de resultados de acuerdo al criterio de Knauss (1987)

Tipo de Perfil	Diámetro (m)	Caudal (l/s)	Fr	Knauss (1987)	Rincón (2022)	
					De las Ecuaciones (4-1) y (4-4)	Del registro de Datos observados
					S/D	S/D
De arista viva (recto)	0.16	18.13	0.720	1.94	2.936	2.913
De arista viva (recto)	0.16	6.87	0.273	1.50	2.564	2.338
Acampanado	0.155	19.93	0.857	2.21	2.880	2.607
Acampanado	0.155	10.75	0.462	1.50	2.662	2.574

Los resultados de la Tabla 9 muestran que los valores de sumersión relativa recomendados por Knauss son menores a los obtenidos en ensayos con el perfil de arista viva (recto) y acampanado, esto puede ser debido a que la configuración de los prototipos considerados en los estudios realizados por Knauss (1987) difieren al modelo físico utilizado en la presente investigación.

5.3.4 Criterio de Zubiaur (2011)

para zona de no formación de vórtices, $Fr \leq 0.27$ y $\frac{S}{D} \geq 0.67$ (5-8)

para zona de formación de vórtices, $Fr \geq 0.39$ y $\frac{S}{D} \leq 2.28$ (5-9)

donde:

Fr : Número de Froude en la toma sumergida.

- S : Profundidad de sumersión medida a partir de la superficie libre del agua hasta la clave de la tubería de toma (m)
D : Diámetro interior de la tubería (m)

En la Tabla 10 se muestran datos ubicados en zona de no formación de vórtices con arrastre de aire hacia la toma forzada, dichos datos serán comparados con los criterios establecidos por Zubiatur (2011)

Tabla 10: Comparación de resultados de acuerdo al criterio de Zubiatur (2011)

Tipo de Perfil	Diámetro (m)	Caudal (l/s)	Fr	S/D	Zona	
					Zubiatur (2011)	Rincón (2022)
De arista viva (recto)	0.16	18.13	0.720	2.39	-	No Formación de Vórtices con arrastre de aire
De arista viva (recto)	0.16	10.75	0.427	2.01	Formación de Vórtice	
Acampanado	0.155	19.93	0.857	2.27		
Acampanado	0.155	10.75	0.462	2.03		

Los resultados de la Tabla 10 muestran que los valores obtenidos en los ensayos de la presente investigación se encontrarían en zona de formación de vórtice bajo los criterios establecidos por Zubiatur (2011), sin embargo, cabe mencionar que la configuración del modelo físico utilizado en los ensayos de Zubiatur (2011) difieren al modelo físico utilizado en el presente estudio, tal como se muestra en la Foto 11 y las Figuras 53, 54 y 55.

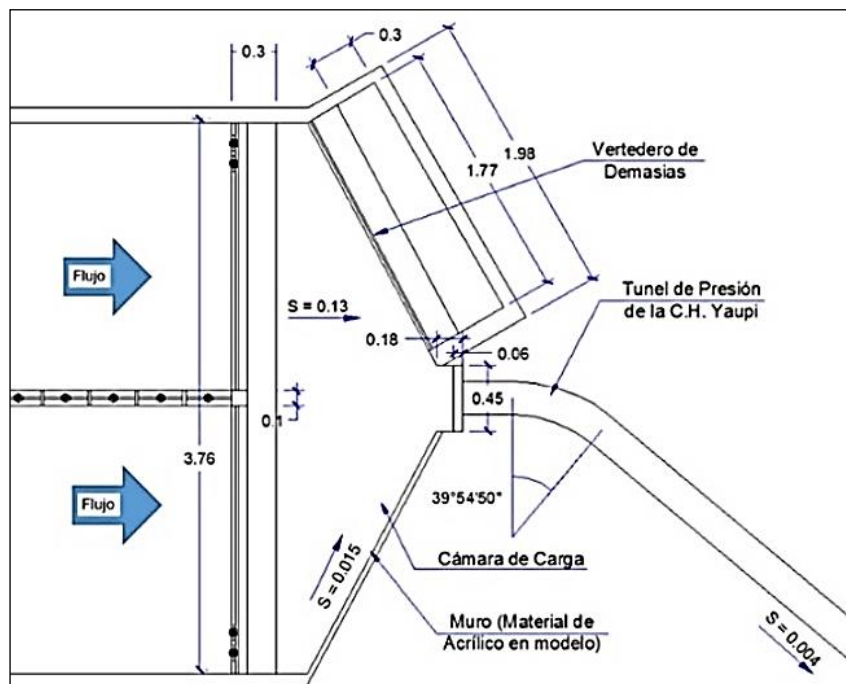


Figura 53: Vista en planta de las naves del desarenador, la cámara de carga y el conducto de baja presión. Las medidas se expresan en metros. Fuente: Zubiaur & Kuroiwa (2012)



Foto 11: Cámara de carga del modelo físico utilizado por Zubiaur (2011).

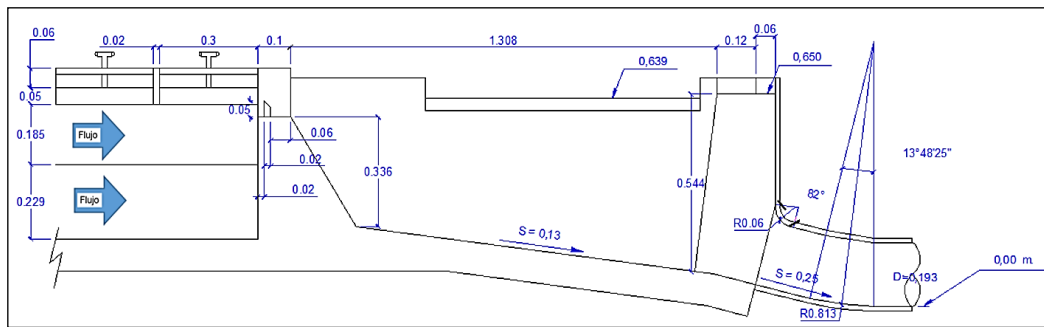


Figura 54: Vista en perfil de la toma sumergida. Las medidas se expresan en metros. Fuente: Zubiaur & Kuroiwa (2012)

La Figura 54 muestra el detalle de la cámara de carga y la conexión con el túnel de baja presión del modelo hidráulico en un plano en planta, mientras que la Figura 55 muestra el perfil en elevación.

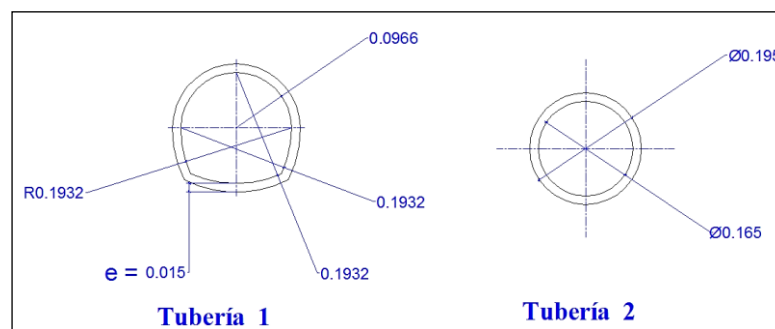


Figura 55: Vista de sección de las tuberías ensayadas. Las medidas se expresan en metros. Fuente: Zubiaur & Kuroiwa (2012)

En la Figura 55 se observa las secciones transversales de los conductos que Zubiaur (2011) utilizó en los ensayos. El primero fue un túnel en forma de herradura con un diámetro equivalente a 199 mm, mientras que el segundo conducto fue un túnel circular de 165 mm de diámetro interno.

Comparando la geometría de la zona de aproximación (cámara de carga) y los diferentes tipos de entrada a la tubería forzada utilizados en los ensayos de Zubiaur (2011), se evidencia que dichas configuraciones contribuyen en la diferenciación de resultados con el presente estudio.

5.3.5 Criterio de Apaza (2012)

para zona de no formación de vórtices, $Fr \leq 0.27$ y $\frac{S}{D} \geq 1.81$ (5-10)

para zona de formación de vórtices, $Fr \geq 0.39$ y $\frac{S}{D} \leq 2.20$ (5-11)

donde:

- Fr : Número de Froude en la toma sumergida.
- S : Profundidad de sumersión medida a partir de la superficie libre del agua hasta la clave de la tubería de toma (m)
- D : Diámetro interior de la tubería (m)

En la Tabla 11 se muestran datos ubicados en zona de no formación de vórtices con arrastre de aire hacia la toma forzada, dichos datos serán comparados con los criterios establecidos por Apaza (2012)

Tabla 11: Comparación de resultados de acuerdo al criterio de Apaza (2012)

Tipo de Perfil	Diámetro (m)	Caudal (l/s)	Fr	S/D	Zona	
					Apaza (2012)	Rincón (2022)
De arista viva (recto)	0.16	18.13	0.720	2.39	-	No Formación de Vórtices con arrastre de aire
De arista viva (recto)	0.16	10.75	0.427	2.01	Formación de Vórtice	
Acampanado	0.155	19.93	0.857	2.27	-	
Acampanado	0.155	10.75	0.462	2.03	Formación de Vórtice	

Los resultados de la Tabla 11 muestran que los valores obtenidos en los ensayos de la presente investigación se encontrarían en zona de formación de vórtice bajo los criterios establecidos por Apaza (2012), sin embargo, cabe mencionar que la configuración del modelo físico utilizado en los ensayos de Apaza (2012) difieren al modelo físico utilizado en el presente estudio, lo que podría contribuir a las diferencias obtenidas en la comparación de resultados.

5.4 RESPECTO A EFECTOS DE ESCALA

En relación a lo mencionado en el ítem 2.4, se evaluó si en la presente investigación se generaban efectos de escala debido a la influencia de las fuerzas

viscosas y de tensión superficial, teniendo presente que el estudio realizado sobre el modelo físico en laboratorio se consideró para los ensayos la influencia principal ejercida por fuerzas inerciales (Número de Froude).

Estudios realizados por Anwar (1968) y también por Daggett y Keulegan (1974) concluyen que, los efectos de viscosidad pueden despreciarse si el valor del número de Reynolds es mayor a 3×10^4 . Como se muestra en la Tabla 1 y Tabla 4, el mínimo valor del número de Reynolds obtenido en el modelo fue 5.36×10^4 , lo que conlleva a concluir que los resultados obtenidos no presentan influencia de las fuerzas viscosas.

Asimismo, investigaciones realizadas por Jain et al. (1978), concluyen que, la tensión superficial no influye en el desarrollo de los vórtices con incorporación de aire cuando se cumple lo siguiente:

$$120 \leq We = \frac{\rho V^2 D}{\sigma} \leq 3.4 \times 10^4 \quad (5-12)$$

donde:

We : Número de Weber.

ρ : Densidad del agua (kg/m^3)

V : Velocidad del agua (m/s)

D : Diámetro interior de la tubería (m)

σ : Tensión superficial del agua (N/s)

Como se puede observar en la Tabla 2 y Tabla 5, el número de Weber se encuentra en el rango mencionado, lo que permite concluir que los resultados obtenidos no presentan influencia de las fuerzas de tensión superficial.

Estos investigadores también determinaron que los efectos viscosos son despreciables cuando la relación entre el número de Reynolds en el modelo y el número de Froude (N_v) cumplen la siguiente condición:

$$N_v = \frac{Re_{MOD}}{Fr} = \frac{g^{1/2} D^{3/2}}{v} \geq 5 \times 10^4 \quad (5-13)$$

donde:

- N_v : Relación entre el número de Reynolds (Re) en el modelo y el número de Froude (Fr).
 g : Aceleración de la gravedad (m/s^2).
 D : Diámetro interior de la tubería (m)
 ν : Viscosidad cinemática del agua (m^2/s)

Como se muestra en los detalles presentes en el ANEXO A: , los valores de N_v calculados son mayores al valor establecido por Jain et al. (1978), de acuerdo a lo antes mencionado los resultados obtenidos no presentan influencia de las fuerzas viscosas.

5.5 RESPECTO AL COEFICIENTE DE PÉRDIDA LOCAL

Con los datos de niveles piezométricos obtenidos en los ensayos se determinará los coeficientes de pérdida local de energía del perfil de arista viva y del perfil acampanado.

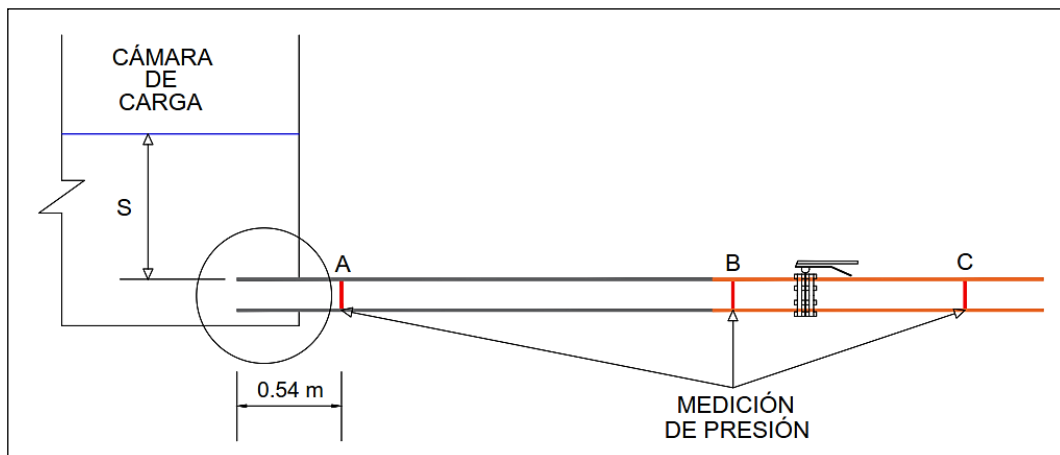


Figura 56: Esquema de la tubería sumergida con entrada de arista viva (recto).

Aplicando la ecuación de la energía entre la superficie libre del agua en la cámara de carga y la sección A, tal como se muestra en la Figura 56, se puede obtener la siguiente expresión:

$$S + \frac{D}{2} = \left(P_A + \frac{D}{2} \right) + \frac{V_A^2}{2g} + h_L + h_f \quad (5-15)$$

$$S - P_A = \frac{V_A^2}{2g} + h_L + h_f \quad (5-16)$$

$$\text{siendo: } h_L = k \frac{V_A^2}{2g} \quad (5-17)$$

donde:

- S : sumersión (m), distancia desde la superficie libre del agua hasta la clave de la tubería forzada.
- P_A : Lectura de piezómetro en la sección A (m), tomando como referencia la clave de la tubería.
- D : Diámetro de la tubería forzada (m).
- V_A : Velocidad media del agua en la sección A (m/s), cociente del caudal sobre área.
- g : Aceleración de la gravedad (m/s²)
- h_L : pérdida de carga local (m)
- k : coeficiente de pérdida local
- h_f : pérdida de carga por fricción (m)

Teniendo en cuenta que la tubería de material acrílico transparente posee una rugosidad absoluta de 0.0009 mm y que el flujo turbulento posee un número de Reynolds elevado, se podría despreciar la pérdida de carga por fricción (h_f) al ser un valor muy bajo. Considerando lo antes mencionado la ecuación para el cálculo del coeficiente de pérdida de carga local quedaría abreviada a la siguiente expresión:

$$S - P_A = (1 + k) \frac{V_A^2}{2g} \quad (5-16)$$

Con los datos experimentales de la Tabla 3 y Tabla 6 se elaboró la Figura 57, el cual muestra la relación entre la variación de presión (S - P_A) y la presión dinámica en "A" ($\frac{V_A^2}{2g}$), el cual representa la caída de energía en la entrada sumergida.

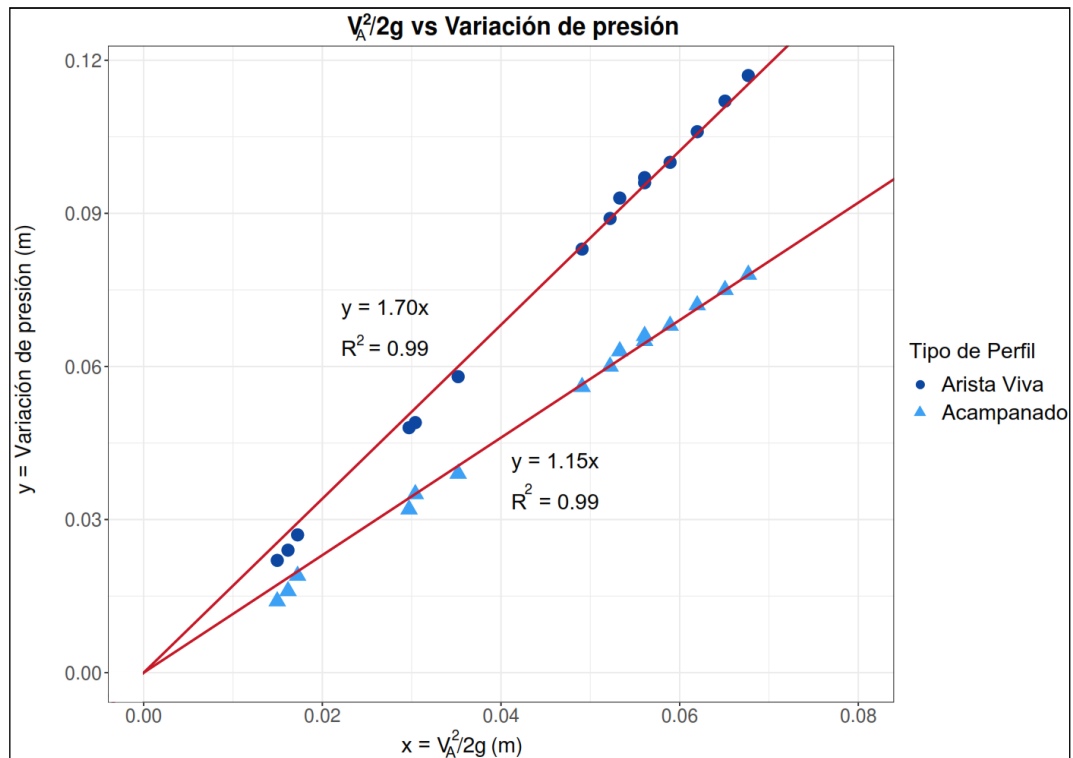


Figura 57: Caída de energía en la entrada de la toma sumergida experimental.

De acuerdo a la Ecuación 5-16, se deduce que el valor de las pendientes de las rectas mostradas en la Figura 57 equivalen al valor del coeficiente de pérdida de carga local más la unidad, tal como se muestra a continuación:

$$k + 1 = 1.70 \quad (\text{Para el perfil de arista viva}) \quad (5-17)$$

$$k + 1 = 1.15 \quad (\text{Para el perfil acampanado}) \quad (5-18)$$

Lo que conlleva a concluir que el coeficiente de pérdida de carga local del perfil de arista viva y del perfil acampanado son 0.7038 y 0.1512 respectivamente.

A continuación, se muestra la Tabla 12 donde se realizará la comparación entre los resultados obtenidos en la presente investigación con los diagramas propuestos por Idel'Chik (1969) que se mostraron en el ítem 2.7.1.

Tabla 12: Comparación entre coeficientes de pérdida carga local en la entrada a la toma sumergida

Tipo de entrada	Idel'Cik (1969)		Rincón (2022)
De arista viva (recto)	$\frac{\delta_1}{D_H} = \frac{0.004}{0.16} = 0.025$ $\frac{b}{D_H} = \frac{0.32}{0.16} = 2$	k = 0.6683	k=0.70
Acampanado	$\frac{r}{D_H} = \frac{0.062}{0.16} = 0.387$	k=0.03	k=0.15

Como se puede observar en la Tabla 12: Comparación entre coeficientes de pérdida carga local en la entrada a la toma sumergida, el coeficiente de pérdida de carga local de la entrada de arista viva (recto) ensayada en el LNH no presenta gran diferencia en comparación con el valor obtenido del diagrama de Idel'Cik (1969).

CONCLUSIONES

- Experimentalmente se muestra una alta influencia de las fuerzas inerciales (Número de Froude) sobre la formación de vórtices, tal como se muestra en la Figura 52, una variación tanto en la sumersión o el número de Froude puede originar la formación de vórtices, causando un mayor efecto en la intensidad de los vórtices que se originan con el uso del perfil de arista viva a la entrada de la toma sumergida.
- Respecto a los ensayos realizados con el perfil acampanado solo se observaron dos tipos de vórtices (B y C), mientras que para los ensayos con el perfil de arista viva (recto) se observaron los tres tipos de vórtices (A, B y C) de acuerdo con la clasificación de Sarkardeh et al. (2010). La generación de los vórtices tipo A en los ensayos con el perfil de arista viva (recto), se deben a los niveles de sumersión que cumplen con la siguiente expresión:

$$\frac{S}{D} \leq 1.6319Fr - 0.1355 \quad ; \quad \text{donde } 0.299 \leq Fr \leq 0.833 \quad (\text{para perfil de arista viva})$$

- De acuerdo al perfil de entrada ensayado, se determinó zonas en función de la relación del número de Froude y la sumersión relativa donde no se generan vórtices con arrastre de aire hacia la toma forzada, dichas zonas cumplen con las siguientes expresiones:

- Para perfil de arista viva:

$$\text{i) } \frac{S}{D} \geq 0.831Fr + 1.813, \quad \text{donde } 0.273 < Fr \leq 0.884$$

$$\text{ii) } \frac{S}{D} \geq 0.944 \quad \wedge \quad Fr \leq 0.273$$

- Para perfil acampanado:

$$\text{i) } \frac{S}{D} \geq 0.551Fr + 1.866, \quad \text{donde } 0.324 < Fr \leq 0.958$$

$$\text{ii) } \frac{S}{D} \geq 0.329 \quad \wedge \quad Fr \leq 0.324$$

- La presente investigación no presenta efectos de escala, ya que se cumplen los criterios planteados por Anwar (1968), Daggett y Keulegan (1974) y Jain et al. (1978).

- Como se planteó en la hipótesis, la geometría con redondeo o corte de los bordes al ingreso de la toma producen efectos hidrodinámicos, generando una menor pérdida de carga al ingreso de la toma sumergida.
- Los valores del coeficiente de pérdida de carga local del perfil de arista viva (recto) y del perfil acampanado son 0.70 y 0.15 respectivamente. En virtud a lo mencionado, se puede concluir que un menor coeficiente de pérdida de carga produce una menor intensidad en los vórtices generados durante los ensayos con dicho perfil de entrada.

RECOMENDACIONES

- El presente estudio debe considerarse como un caso particular bajo las condiciones estructurales y geométricas establecidas.
- Se recomienda experimentar con otros tipos de perfil de entrada, con la finalidad de buscar una relación entre la formación de vórtices y el coeficiente de pérdida de carga a la entrada de la toma forzada, y, por lo tanto, tener un mayor conocimiento del tipo de vórtice que puede originarse.
- Respecto al uso del perfil Acampanado, se recomienda experimentar con dispositivos antivórtices con la finalidad de comparar los niveles de sumersión y número de Froude necesarios para evitar el arrastre de aire hacia la toma sumergida.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Amiri, S. M., Zarrati, A. R., Roshan, R., & Sarkardeh, H. (2011). Surface vortex prevention at power intakes by horizontal plates. *Proc. Inst. Civ. Eng. Water Manage.*, 164(4), 193-200.
- (2) Anwar, H.O. (1968). Prevention of Vortices at Intakes. *Water Power*, 20(10), 393-401.
- (3) Anwar, H. O., Weller, J. A., & Amphlett, M. B. (1978). Similarity of free-vortex at horizontal intake. *J. Hydraul. Res.*, 16(2), 95-105.
- (4) Apaza, N. F. (2012). *Influencia del espaciamiento entre las láminas de rejillas usadas como elemento de disipación de vórtices en tomas de agua sumergidas* (Tesis de maestría). Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba.
- (5) ASCE (1995). *Guidelines for design of intakes for hydroelectric plants*. Committee on Hydropower Intakes of the American Society of Civil Engineers.
- (6) Borgheei, S., & Kabiri S. A. (2010). Effect of anti-vortex plates on critical submergence at a vertical intake. *Sci. Iran., Transaction A: Civil Engineering*, 17(2), 89–95.
- (7) Bottazzi, E., Floreale, G., & Molina, L. (2008). Optimization of a penstock intake based on a simplified physical model. *Hydroenergía 2008 Conference*, 11-13 junio 2008, Bled, Slovenia.
- (8) Daggett, L. L., & Keulegan, G. H. (1974). Similitude in free-surface vortex formations. *Journal of the Hydraulics Division*, 100(11), 1565-1581.
- (9) Darcy, H. (1857). *Recherches expérimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux* (Vol. 2). Mallet-Bachelier.
- (10) Gordon, J.L. (1970). Vortices at intakes. *Water Power*, 22(4), 137–138.
- (11) Gulliver, J. S., Rindels, A., & Lindblom, K. (1984). Case studies of hydroplant intake designs to avoid free surface vortices. *Proceedings of the American Power Conference*, 46, 1050-1056. Illinois Institute of Technology.
- (12) Hecker, G. E. (1981). Model-prototype comparison of free surface vortices. *Journal of the Hydraulics Division*, 107(10), 1243-1259.
- (13) Hite Jr, J. E., & Mih, W. C. (1994). Velocity of air-core vortices at hydraulic intakes. *J. Hydraul. Eng.*, 120(3), 284-297.

- (14) Idel'Cik, I. E. (1969). Memento des pertes de charge. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France.
- (15) Jain, A. K., Garde, R. J., & Ranga Raju, K. G. (1978). Vortex formation at vertical pipe intakes. *Journal of the Hydraulics Division*, 104(10), 1429-1445.
- (16) Knauss, J. (1987). *Swirling flow problems at intakes*. Rotterdam, Netherland: A. A. Balkema.
- (17) Möller, G., Detert, M., & Boes, R. M. (2015). Vortex-induced air entrainment rates at intakes. *J. Hydraul. Eng.*, 141(11), 04015026.
- (18) Pennino, B. J., & Hecker, G. E. (1980). A Synthesis of model data for pumped storage intakes. *Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers Fluids Conference Pump Turbine Schemes*.
- (19) Rindels, A. J., & Gulliver, J. S. (1983). *An experimental study of critical submergence to avoid free-surface vortices at vertical intakes* (Project Report). St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, University of Minnesota.
- (20) Rocha, A. (2007). *Hidráulica de tuberías y canales*. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- (21) Sarkardeh, H., Zarrati, A. R., & Roshan, R. (2010). Effect of intake head wall and trash rack on vortices. *J. Hydraul. Res.*, 48(1), 108-112.
- (22) Suerich-Gulick, F., Gaskin, S. J., Villeneuve, M., & Parkinson, É. (2014). Characteristics of free surface vortices at low-head hydropower intakes. *J. Hydraul. Eng.*, 140(3), 291-299.
- (23) Tastan, K., & Yildirim, N. (2018). Effects of intake geometry on the occurrence of a free-surface vortex. *J. Hydraul. Eng.*, 144(4), 04018009.
- (24) Weisbach, J. L. (1845). *Lehrbuch der Ingenieur-und Maschinen-Mechanik: Theoretische Mechanik* (Vol. 1). Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn.
- (25) Yang, J., Liu, T., Bottacin, A., & Lin, C. (2014). Effects of intake-entrance profiles on free-surface vortices. *J. Hydraul. Res.*, 52(4), 523-531.
- (26) Zubiaur, M. A. (2011). *Estudio del uso de rejillas como dispositivo antivórtice en tomas sumergidas* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

- (27) Zubiar, M. A., Kuroiwa, J. M. (2012). Reducción de ingreso de vórtices de aire en tomas sumergidas mediante el uso de rejillas. *XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, 9-12 setiembre 2012, San José, Costa Rica.

ANEXO A: TABLAS DE DETALLES

En el presente anexo se muestran las Tablas detalladas con los datos recolectados y resultados obtenidos en el desarrollo de la investigación.

- a) Tabla de detalles con datos de los ensayos del perfil de arista viva (recto)
- b) Tabla de detalles con datos de los ensayos del perfil Acampanado.
- c) Tabla de detalles con datos recolectados del piezómetro instalado.

ANEXO B: VIDEOS GRABADOS

En el presente anexo se proporciona los links de acceso a las grabaciones realizadas de los distintos vórtices formados en los ensayos.

- Para los ensayos con el perfil de arista viva (recto):
 - 1) Caudal = 10.46 l/s
Sumersión = 0.173 m
Link:
https://drive.google.com/file/d/1d_kpOBvXrA3C1OxP-aCxnCHLkpYus6il/view?usp=sharing
 - 2) Caudal = 10.75 l/s
Sumersión = 0.136 m
Link:
<https://drive.google.com/file/d/1zALge73wZxFfoLCMFSSth0q0oDADutBr/view?usp=sharing>
 - 3) Caudal = 10.75 l/s
Sumersión = 0.208 m
Link:
<https://drive.google.com/file/d/13QVpUY4D45bvNnJHpWNwyd97bLaPzqg-/view?usp=sharing>
 - 4) Caudal = 11.77 l/s
Sumersión = 0.173 m
Link:
<https://drive.google.com/file/d/1YSz3BaTxYmh2A9PPHUog9OYwzmcpwjq1/view?usp=sharing>
 - 5) Caudal = 11.77 l/s
Sumersión = 0.294 m
Link:
https://drive.google.com/file/d/1_cNxxZdTWITU0xvSwrE59iPHNKV95NI/view?usp=sharing

- 6) Caudal = 15.18 l/s
Sumersión = 0.189 m
Link:
<https://drive.google.com/file/d/1LXcpOqokLmXtllWd4j9JXnMv0Kecnxk3/view?usp=sharing>
- 7) Caudal = 15.18 l/s
Sumersión = 0.318 m
Link:
<https://drive.google.com/file/d/1UMVm6Z8v4aa4XeMmEY7SpiPGSWUYuTau/view?usp=sharing>
- 8) Caudal = 16.99 l/s
Sumersión = 0.219 m
Link:
<https://drive.google.com/file/d/1U72nID-olTrM0NrAJ-nTnBRibkn4XhJx/view?usp=sharing>
- 9) Caudal = 16.99 l/s
Sumersión = 0.294 m
Link:
https://drive.google.com/file/d/1G_emqgHAAH_nwKSQPXh0iFIAXpEV12Za/view?usp=sharing
- 10) Caudal = 19.94 l/s
Sumersión = 0.196 m
Link:
https://drive.google.com/file/d/1113TuoTxjmRQHeYACCLo_AyBVxpUTosB/view?usp=sharing
- 11) Caudal = 20.98 l/s
Sumersión = 0.253 m
Link:
<https://drive.google.com/file/d/15jVMza0c4UAoLOEeP8BJh0QICell8HiN/view?usp=sharing>

12) Caudal = 20.98 l/s

Sumersión = 0.292 m

Link:

<https://drive.google.com/file/d/1QdDt5MUEGwRO8guZNVMBqdhiRI3ZW/Sb/view?usp=sharing>

- Para los ensayos con el perfil acampanado

1) Caudal = 10.46 l/s

Sumersión = 0.169 m

Link:

https://drive.google.com/file/d/19qI_UBo4hUI1YuGAwmqMZZzqXmIQ_LM/O/view?usp=sharing

2) Caudal = 10.75 l/s

Sumersión = 0.128 m

Link:

https://drive.google.com/file/d/143mXEx_1r0dOPWIPBTyStiwoS5OeZw3i/view?usp=sharing

3) Caudal = 10.75 l/s

Sumersión = 0.201 m

Link:

https://drive.google.com/file/d/1Y0YItCS4ItPDknJEyE72I_xb27SmhN7P/vi/ew?usp=sharing

4) Caudal = 11.77 l/s

Sumersión = 0.285 m

Link:

<https://drive.google.com/file/d/1UEiH2D5ucvcZK2rZw6M7x2pyOS5HMPw/v/view?usp=sharing>

- 5) Caudal = 13.98 l/s
Sumersión = 0.115 m
Link:
<https://drive.google.com/file/d/1-FrfS8AsG8Q1mu8fDvZIRMcuqF2QcACZ/view?usp=sharing>
- 6) Caudal = 15.18 l/s
Sumersión = 0.174 m
Link:
<https://drive.google.com/file/d/1avh65Pr-2ZJKvBK1U3igBz15gSOOaGFc/view?usp=sharing>
- 7) Caudal = 15.18 l/s
Sumersión = 0.302 m
Link:
https://drive.google.com/file/d/1RevkXRu9tGNQYo9l_7HAGTy4n6No9Mcf/view?usp=sharing
- 8) Caudal = 16.99 l/s
Sumersión = 0.201 m
Link:
<https://drive.google.com/file/d/1-2Zbn9xldolUPTJzyOoxQpZvPARXZe19/view?usp=sharing>
- 9) Caudal = 16.99 l/s
Sumersión = 0.274 m
Link:
<https://drive.google.com/file/d/1-4XOgWK-q8YHpvW5J5BbpGopxOg5DWtl/view?usp=sharing>

10) Caudal = 19.94 l/s

Sumersión = 0.173 m

Link:

<https://drive.google.com/file/d/1-Kk6NS0YWusXUnuzmmySTED0Y0RDs2mM/view?usp=sharing>

11) Caudal = 20.98 l/s

Sumersión = 0.23 m

Link:

<https://drive.google.com/file/d/1-VSBEPRaSiBz6GqlzKR96B4SGSL4KQDq/view?usp=sharing>