



**FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA Y
URBANISMO**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA
CIVIL**

TESIS

**“ANÁLISIS DEL FLUJO RASANTE, TRANSITORIO Y
SALTANTE EMPLEANDO UN MODELO FÍSICO A
ESCALA PARA LA EVALUACIÓN DEL DISEÑO
HIDRÁULICO DE LA CAÍDA ESCALONADA “LA
CASCADA” DEL PROYECTO TINAJONES –
CHONGOYAPE - LAMBAYEQUE”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
CIVIL**

Autores:

Bach. Correa Santa María Josué Arnold

Bach. Leyva Castillo Luis Antonio

Asesor:

M. Sc. Guerrero Millones Ana María

Línea de Investigación:

Infraestructura, Tecnología y Medio Ambiente

Ingeniería de Procesos

Pimentel – Perú

2020

TESIS

“ANÁLISIS DEL FLUJO RASANTE, TRANSITORIO Y SALTANTE EMPLEANDO UN MODELO FÍSICO A ESCALA PARA LA EVALUACIÓN DEL DISEÑO HIDRÁULICO DE LA CAÍDA ESCALONADA “LA CASCADA” DEL PROYECTO TINAJONES - CHONGOYAPE – LAMBAYEQUE”

Aprobado por:

**Dr. Ing. Ruiz Pico Ángel Antonio
Presidente del jurado de tesis**

**M.Sc. Ing. Idrogo Pérez César Antonio
Secretario del jurado de tesis**

**Ing. Arriola Carrasco Guillermo Gustavo
Vocal del jurado de tesis**

Dedicatorias

Dedico esta tesis a mis padres quienes me apoyaron todo este tiempo y en especial a todos aquellos que creyeron en mí desde un principio, a aquellas personas que pese a su saturado tiempo laboral mostraron interés por la temática a investigar, aportando emocional y académicamente al desarrollo de la misma, otorgando sus conocimientos e ideas a fin de mejorar cada aspecto de la misma; la cual lo he desarrollado con gran esfuerzo, lo dedico a todas las personas que depositaron su entera confianza en cada reto que se me presentaba, sin dudar ni un solo momento de mi capacidad, siempre siendo positivos conmigo y apoyándome en todo.

Josué Arnold Correa Santa María

Dedico esta tesis a mis padres y hermanos, quienes siempre me brindaron un apoyo incondicional estando pendientes de mi bienestar y formación para ser una persona de bien, ellos depositaron su confianza para cada reto presentado. A todos los docentes de la Escuela de Ingeniería Civil de mi casa de estudios quienes nos brindaron en cada clase sus conocimientos y experiencias, para poder aplicarlas durante la vida profesional y también personal. Al esfuerzo y entusiasmo que se puso para poder llegar a esta meta, a todas las personas que colaboraron con un granito de arena para poder desarrollar esta investigación.

Luis Antonio Leyva Castillo

Agradecimientos

Un agradecimiento especial al M. Sc. Ing. Sócrates Pedro Muñoz Pérez, docente del curso de Investigación II y actual Director de la Escuela de Ingeniería Civil por sus aportes en el ámbito técnico para el desarrollo de esta investigación.

Al Ing. Guillermo Gustavo Arriola Carrasco, por su apoyo absoluto al desarrollo de esta investigación con una atención que nos ha llenado de alegría y cumpliendo todas las expectativas, que como alumnos depositamos en su persona.

Al Dr. Ing. Omar Coronado Zuloeta, por direccionar nuestra formación académica durante la carrera profesional como Director de Escuela.

A la asesora metodológica, M. Sc. Ana María Guerrero Millones, docente del curso de Investigación I por otorgarnos las pautas necesarias para la correcta presentación de la investigación; asimismo, rescatar su paciencia y motivación, ya que han sido fundamentales para nuestra formación como investigadores.

Al Ing. José Hernández Porras, encargado del Laboratorio Hidráulica de esta casa de estudios, por el apoyo e interés en facilitarnos la prestación del equipo de alimentación hidráulica para los ensayos de esta investigación.

Agradecemos también a la Universidad Señor de Sipán la cual nos brindó sus equipos del Laboratorios de Hidráulica, siendo de gran importancia para la realización de ensayos y funcionamiento de nuestro modelo físico “La Cascada”.

Josué Arnold Correa Santa María

Luis Antonio Leyva Castillo

Resumen

Josué Arnold Correa Santa María

Luis Antonio Leyva Castillo

En canales escalonados se presentan para ciertos caudales un Flujo de Escalón por Escalón (NAPPE), Flujo Rasante (SKIMMING), y un Flujo en Transición (TRANSITORIO) entre los dos anteriores. La Cascada que es una caída escalonada ya construida con 12 escalones, cada uno de dimensiones altura $h = 4.65$ m y longitud $l = 19.30$ m, durante su vida útil a sufrido continuos daños en sus estructuras, por lo que se ha analizado el flujo utilizando un modelo físico para simular el comportamiento del mismo. El modelo físico se construyó a escala (1:75) por representatividad de la estructura, utilizando principalmente una estructura de metal como base de apoyo y acrílico para las paredes del canal, transparente para poder observar los perfiles del flujo y el comportamiento del mismo.

Durante la investigación se analizó el flujo de La Cascada de forma manual, evaluando diferentes caudales con respecto a su caudal de diseño (70 m³/seg), se evaluó al 15%, 30%, 50%, 75%, 90%, 100%, así mismo se superó el caudal máximo para observar el comportamiento del flujo en el caso de eventos extraordinarios en 120%, 140%, 150%.

Palabras Clave: caída escalonada, flujo, modelo físico, eventos extraordinarios.

Abstract

Josué Arnold Correa Santa María

Luis Antonio Leyva Castillo

In stepped channels, a Step-by-Step Flow (NAPPE), Flush Flow (SKIMMING), and a Transition Flow (TRANSITORY) between the previous two are presented for certain flows. The Cascade is a stepped fall already built with 12 steps, each with dimensions height $h = 4.65$ m and length $l = 19.30$ m, during its useful life it has suffered continuous damage to its structures, so the flow has been analyzed using a physical model to simulate its behavior. The physical model was built to scale (1:75) by representativeness of the structure, using mainly a metal structure as a support base and acrylic for the walls of the channel, transparent to be able to observe the flow profiles and the behavior of the same.

During the investigation the flow of La Cascada was analyzed manually, evaluating different flows with respect to its design flow ($70 \text{ m}^3 / \text{sec}$), it was evaluated at 15%, 30%, 50%, 75%, 90%, 100 %, the maximum flow was also exceeded to observe the behavior of the flow in the case of extraordinary events in 120%, 140%, 150%.

Key word: staggered fall, flow, physical model, extraordinary events.

ÍNDICE

Dedicatorias	iii
Agradecimientos.....	iv
Resumen	v
Abstract.....	vi
I. INTRODUCCIÓN.....	27
1.1 Realidad Problemática.....	27
1.1.1 A Nivel Internacional	27
1.1.2 A Nivel Nacional	29
1.1.3 A Nivel Local.....	32
1.1.4 Objeto de Estudio	35
1.2 Antecedentes de Estudio	35
1.2.1 A Nivel Internacional	35
1.2.2 A Nivel Nacional	38
1.2.3 A Nivel Local.....	41
1.3 Teorías Relacionadas al Tema	41
1.3.1 Variable Independiente.....	41
1.3.1.1 Modelo Físico de la Caída Escalonada	42
1.3.1.1.1 Teoría de Similitud.....	43
1.3.1.2 Tipos De Caídas.....	46
1.3.1.2.1 Caídas Verticales	46
1.3.1.2.2 Caídas Inclinadas	48
1.3.1.2.3 Rápidas.....	49
1.3.1.2.4 Caídas Escalonadas	51
1.3.1.2.5 Vertederos Escalonados	52
1.3.1.2.5.1 Ventajas de los Vertedores Escalonados	52
1.3.1.2.5.2 Desventajas de los Vertedores Escalonados	52
1.3.1.2.6 Disipación de Energía en Canales con Pendiente Fuerte.....	53
1.3.2 Variable Dependiente.....	54
1.3.2.1 Evaluación de Diseño Hidráulico de la Caída Escalonada.....	55
1.3.2.1.1. Funcionamiento Hidráulico.....	55

1.3.2.1.2. Ondas de Froude	56
1.3.2.1.2. Tipos de Flujo en una Caída Escalonada	57
1.3.2.1.3. Aireación y Pérdidas de Energía.....	65
1.3.2.1.3 Determinación del Tipo de Flujo en una Rápida Escalonada	66
1.3.2.1.4 Teorías del Flujo Rasante	71
1.3.2.1.4.1 Concentración media del aire.....	76
1.3.2.1.4.2 Punto de ingreso de aire para la formación del flujo rasante (“Punto de Incepción”).....	78
1.3.2.1.4.3 Resistencia al Flujo.....	83
1.3.2.1.4.4 Pérdida de Energía en Flujo Rasante.....	83
1.3.2.1.4.5 Tirante Característico del Flujo Rasante.....	84
1.3.2.1.4.5 Altura Máxima de Escalón.....	87
1.3.2.1.5 Metodología de diseño para Flujo Rasante	88
1.3.2.1.6 Teorías del Flujo Saltante (NAP).....	92
1.3.2.1.6.1 Flujo Saltante con Resalto Hidráulico Completamente Desarrollado (NAP1).....	92
1.3.2.1.6.2 Flujo Saltante con Resalto Hidráulico Parcialmente Desarrollado (NAP2).....	95
1.3.2.1.6.3 Flujo Saltante Sin Resalto Hidráulico (NAP3).....	96
1.3.2.1.7 Teorías del Flujo Transitorio	103
1.3.2.1.8 Diseño de Tanques Amortiguadores.....	105
1.3.2.1.8.1 Tanque Rectangular Tipo St. Anthony Falls (SAF).....	106
1.3.2.1.8.2 Tanque Rectangular Tipo USBR (I).....	107
1.3.2.1.8.3 Tanque Rectangular Tipo USBR (II)	110
1.3.2.1.8.4 Tanque Rectangular Tipo USBR (III).....	110
1.3.2.1.9 Vertederos de Caída Libre	114
1.3.2.1.9.1 Tanque para Resalto Hidráulico.....	114
1.3.2.1.9.2 Tanque para Bloques de Impacto	116
1.3.2.1.10 Diseño Hidráulico de Caídas Escalonadas	118
1.3.2.1.10.1 Descripción General.....	118
1.3.2.1.10.2 Diseño Hidráulico	119
1.3.3 Impacto Ambiental.....	123
1.3.4 Seguridad y Salud Ocupacional	123

1.3.5	Gestión de Riesgos y Prevención de Desastres.....	123
1.3.6	Estimación de Costos	124
1.3.7	Gestión de Mantenimiento.....	124
1.3.8	Normativa	124
1.3.9	Estado del Arte	125
1.3.10	Definición de Términos.....	126
1.3.11	Ciencias Aportantes a la Investigación.....	130
1.4	Formulación del Problema	131
1.5	Justificación e Importancia del Estudio	131
1.5.1.	Justificación Tecnológica.....	131
1.5.2.	Justificación Ambiental	131
1.5.3.	Justificación Social	132
1.5.4.	Justificación Económica	132
1.6	Hipótesis.....	132
1.7	Objetivos	132
1.7.1.	Generales.....	132
1.7.2.	Específicos.....	133
II.	MATERIAL Y MÉTODO.....	134
2.1	Tipo y Diseño de Investigación.....	134
2.1.1	Tipo de Investigación	135
2.1.2	Diseño de Investigación.....	135
2.2	Población y muestra.....	135
2.2.1	Población.....	135
2.2.2	Muestra	135
2.3	Variable y Operacionalización.....	135
2.3.1	Variables	135
2.3.2	Operacionalización.....	136
2.4	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos, Validez y Confiabilidad	138
2.4.1	Técnicas de Recolección de Datos	138
2.4.2	Instrumentos de Recolección de Datos	139
2.5	Procedimientos de Análisis de Datos	140

2.5.1	Diagrama de Procesos.....	141
2.5.2	Descripción de Procesos.....	141
2.5.3.	Recursos Humanos.....	144
2.5.4.	Presupuesto.....	144
2.6.	Criterios Éticos.....	145
2.6.1	Ética de la Recolección de Datos.....	145
2.6.2	Ética de la Publicación.....	145
2.6.3	Ética de la Aplicación.....	145
2.7	Criterios de Rigor Científico.....	145
2.7.1	Generalidades.....	145
2.7.2	Fiabilidad.....	145
2.7.3	Replicabilidad.....	146
III.	RESULTADOS.....	147
3.1.	Resultados en Tablas y Figuras.....	148
3.1.1	Recolección de la información geométrica e hidráulica de la caída escalonada La Cascada.....	148
3.1.1.1	Inspección visual de La Caída Escalonada La Cascada.....	148
3.1.1.2	Visita a las instalaciones del PEOT.....	152
3.1.2	Diseño del Modelo Físico a escala de la Caída Escalonada La Cascada.....	154
3.1.2.1	Diseño del Modelo Físico.....	154
3.1.3.	Análisis Hidráulico, Construcción y Ensayos del Modelo Físico a Escala de la Caída Escalonada.....	158
3.1.3.1	Análisis Hidráulico de La Cascada.....	158
3.1.3.1.1	Análisis Hidráulico con Fórmulas.....	158
3.1.3.1.1.1	Análisis con Fórmulas al 15% (10.5 m3/seg) del Caudal de Diseño.....	159
3.1.3.1.1.2	Análisis con Fórmulas al 30% (21 m3/seg) del Caudal de Diseño.....	161
3.1.3.1.1.3	Análisis con Fórmulas al 50% (35 m3/seg) del Caudal de Diseño.....	163
3.1.3.1.1.4	Análisis con Fórmulas al 75% (52.5 m3/seg) del Caudal de Diseño.....	165
3.1.3.1.1.5	Análisis con Fórmulas al 90% (63 m3/seg) del Caudal de Diseño.....	167
3.1.3.1.1.6	Análisis con Fórmulas al 100% (70 m3/seg) del Caudal de Diseño.....	169
3.1.3.1.1.7	Análisis con Fórmulas al 120% (84 m3/seg) del Caudal de Diseño.....	171
3.1.3.1.1.8	Análisis con Fórmulas al 140% (98 m3/seg) del Caudal de Diseño.....	173

3.1.3.1.1.9 Análisis con Fórmulas al 150% (105 m3/seg) del Caudal de Diseño.	175
3.1.3.1.1.10 Diseño Hidráulico de la Caída Escalonada La Cascada.	178
3.1.3.1.2 Análisis Hidráulico con Hec Ras.	183
3.1.3.1.2.1 Análisis en Hec Ras al 15 % (10.50 m3/seg) del Caudal de Diseño	185
3.1.3.1.2.2 Análisis en Hec Ras al 30 % (21 m3/seg) del Caudal de Diseño	187
3.1.3.1.2.3 Análisis en Hec Ras al 50 % (35 m3/seg) del Caudal de Diseño	189
3.1.3.1.2.4 Análisis en Hec Ras al 75 % (52.50 m3/seg) del Caudal de Diseño	191
3.1.3.1.2.5 Análisis en Hec Ras al 90 % (63 m3/seg) del Caudal de Diseño.	193
3.1.3.1.2.6 Análisis en Hec Ras al 100 % (70 m3/seg) del Caudal de Diseño	195
3.1.3.1.2.7 Análisis en Hec Ras al 120 % (84 m3/seg) del Caudal de Diseño	197
3.1.3.1.2.8 Análisis en Hec Ras al 140 % (98 m3/seg) del Caudal de Diseño	199
3.1.3.1.2.9 Análisis en Hec Ras al 150 % (105 m3/seg) del Caudal de Diseño.	201
3.1.3.2 Construcción del Modelo Físico.	204
3.1.3.2 Ensayos del Modelo Físico La Cascada	211
3.1.3.2.1 Ensayo N°1 en Modelo Físico con Caudal de Diseño al 15%.	215
3.1.3.2.2 Ensayo N° 2 en Modelo Físico con Caudal de Diseño al 30%.	219
3.1.3.2.3 Ensayo N°3 en Modelo Físico con Caudal de Diseño al 50%.	222
3.1.3.2.4 Ensayo N°4 en Modelo Físico con Caudal de Diseño al 75%.	225
3.1.3.2.5 Ensayo N°5 en Modelo Físico con Caudal de Diseño al 90%.	228
3.1.3.2.6 Ensayo N°6 en Modelo Físico con Caudal de Diseño al 100%.	231
3.1.3.2.7 Ensayo N°7 en Modelo Físico con Caudal de Diseño al 120%.	234
3.1.3.2.8 Ensayo N°8 en Modelo Físico con Caudal de Diseño al 140%.	237
3.1.3.2.9 Ensayo N°9 en Modelo Físico con Caudal de Diseño al 150%.	240
3.1.3.2.10 Resumen de Ensayos del Modelo Físico	243
3.1.3.2.11 Construcción de Gráfica de Clasificación de Flujo Escalonado en Excel.	244
3.1.4 Comparación de Resultados Obtenidos por medio de Fórmulas, Software y constatando en el Modelo Físico a Escala.	246
3.1.4.1 Comparación de Resultados para un Caudal del 15% (10.5 m3/seg) del Caudal de Diseño.	248
3.1.4.2 Comparación de Resultados para un Caudal del 30% (21 m3/seg) del Caudal de Diseño.	251

3.1.4.3 Comparación de Resultados para un Caudal del 50% (35 m3/seg) del Caudal de Diseño.	254
3.1.4.4 Comparación de Resultados para un Caudal del 75% (52.5 m3/seg) del Caudal de Diseño.	257
3.1.4.5 Comparación de Resultados para un Caudal del 90% (63 m3/seg) del Caudal de Diseño.	260
3.1.4.6 Comparación de Resultados para un Caudal del 100% (70 m3/seg) del Caudal de Diseño.	263
3.1.4.7 Comparación de Resultados para un Caudal del 120% (84 m3/seg) del Caudal de Diseño.	266
3.1.4.8 Comparación de Resultados para un Caudal del 140% (98 m3/seg) del Caudal de Diseño.	269
3.1.4.9 Comparación de Resultados para un Caudal del 150% (105 m3/seg) del Caudal de Diseño.	272
3.1.4.10 Descripción de Resultados Comparativos de Parámetros Hidráulicos Analizados	277
3.2. Discusión de Resultados.....	280
3.2.1 Recolección de la información geométrica e hidráulica de la caída escalonada La Cascada	280
3.2.1.1 Inspección visual de La Caída Escalonada La Cascada.	280
3.2.1.2 Visita a las instalaciones del PEOT.....	281
3.2.2 Diseño del modelo físico a escala de la caída escalonada La Cascada.	281
3.2.2.1 Diseño del Modelo Físico	281
3.1.3. Análisis Hidráulico, Construcción y Ensayos del Modelo Físico a Escala de la Caída Escalonada	282
3.1.3.1 Análisis Hidráulico	282
3.1.3.2 Construcción del Modelo Físico	283
3.1.3.3 Ensayos del Modelo Físico a Escala.....	284
3.1.4. Comparación de Resultados Obtenidos por medio de Fórmulas, Software y constatando en el Modelo Físico a Escala.	285
3.3. Aporte Práctico.....	292
3.3.1 Ampliación del análisis con fórmulas para caudales mayores.	293
3.3.2 Diseño Hidráulico Óptimo de la Caída Escalonada La Cascada.	321
3.3.3 Correlación para una Nueva Gráfica de Tipos de Flujo.....	326
IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	330

4.1. Conclusiones	330
4.2. Recomendaciones	331
REFERENCIAS	332
ANEXOS	335

ANEXOS

Anexo N° 1. Libreta de Campo - Levantamiento con Wincha.	336
Anexo N° 2. Lista de Accesorios para Equipo Hidráulico (Modelo Físico).	337
Anexo N° 3. Factores de Escala.	338
Anexo N° 4. Formato de Análisis de Flujo Saltante NAP.	339
Anexo N° 5. Formato de Análisis de Flujo Rasante SK.	340
Anexo N° 6. Comparación de Resultados.	341
Anexo N° 7. Presupuesto.	342
Anexo N° 8. Solicitud al PEOT.	343
Anexo N° 9. Entrevista a Responsable del PEOT.	344
Anexo N° 10. Logo Software Hec - Ras.	345
Anexo N° 11. Logo Software AuctoCAD.	346
Anexo N° 12. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Saltante (NAP) Q= 15 %.	347
Anexo N° 13. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Saltante (NAP) Q = 30 %.	348
Anexo N° 14. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Saltante (NAP) Q = 50 %.	349
Anexo N° 15. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Saltante (NAP) Q = 75 %.	350
Anexo N° 16. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Saltante (NAP) Q = 90 %.	351
Anexo N° 17. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Saltante (NAP) Q = 100 %.	352
Anexo N° 18. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Saltante (NAP) Q = 120 %.	353
Anexo N° 19. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Saltante (NAP) Q = 140 %.	354
Anexo N° 20. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Saltante (NAP) Q = 150 %.	355
Anexo N° 21. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Saltante (NAP) Q = 217 %.	356
Anexo N° 22. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Saltante (NAP) Q = 250 %.	357
Anexo N° 23. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Saltante (NAP) Q = 300 %.	358
Anexo N° 24. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Saltante (NAP) Q = 400 %.	359
Anexo N° 25. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Saltante (NAP) Q = 500 %.	360
Anexo N° 26. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Transitorio (TRA) Q = 540 %.	361
Anexo N° 27. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Transitorio (TRA) Q = 600 %.	362
Anexo N° 28. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Transitorio (TRA) Q = 700 %.	363
Anexo N° 29. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Transitorio (TRA) Q = 800 %.	364
Anexo N° 30. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Transitorio (TRA) Q = 890 %.	365
Anexo N° 31. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Rasante (SK) Q = 900 %.	366
Anexo N° 32. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Rasante (SK) Q = 1600 %.	367
Anexo N° 33. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Rasante (SK) Q = 2000 %.	368

Anexo N° 34. Análisis Hidráulico con Fórmulas Flujo Rasante (SK) $Q = 2500\%$.	369
Anexo N° 35. Verificación del Diseño Hidráulico de la Caída Escalonada La Cascada.	370
Anexo N° 36. Diseño Hidráulico Óptimo de la Caída Escalonada La Cascada.	371
Anexo N° 37. Resultados de Hec-Ras.	372
Anexo N° 38. Caudales Escalados a Evaluar.	373
Anexo N° 39. Ensayos del Modelo Físico.	374
Anexo N° 40. Gráfica de Tipos de Flujo Escalonado en Excel.	375
Anexo N° 41. Proceso de Análisis en Software Hec-Ras	376
Anexo N° 42. Panel Fotográfico	377
Anexo N° 43. Planos de La Cascada.	378
Anexo N° 44. Planos de Diseño del Modelo Físico.	379
Anexo N° 45. Plano Original de La Cascada.	380
Anexo N° 46. Archivo de Modelamiento Hidráulico en HEC-RAS 5.0.6	381
Anexo N° 47. Video Resumen de los Resultados de la Investigación.	382

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1 Socavación en canal Bolivia (Fuente: Hoy Bolivia.com - 2015) BOLIVIA.....	27
Figura N° 2 Colapso del canal Abanto – Huachi – Pelileo (Fuente: El comercio – 2016) ECUADOR	28
Figura N° 3 Colapso del canal Ulises Francisco Espailat (Fuente: Diario Libre – 2016) REPÚBLICA DOMINICANA.....	28
Figura N° 4 Colapso del canal Norte (Fuente: Diario La Gaceta – 2016) ARGENTINA	29
Figura N° 5. Colapso de un Canal de regadío (Fuente: Diario el Correo - 2018) BOLIVIA.....	30
Figura N° 6. Fallas en Canal de regadío (Fuente: Andina - 2017) AREQUIPA.....	31
Figura N° 7. Fallas en Túnel Culqui (Fuente: Andina – 2018) PIURA.	32
Figura N° 8. Fallas en Canal Taymi (Andina - 2015) LAMBAYEQUE	32
Figura N° 9. Caída Escalonada La Cascada – Chongoyape - Chiclayo	34
Figura N° 10. Croquis del área de influencia. Google Earth.....	35
Figura N° 11. Caída Vertical (Béjar, 2005).	47
Figura N° 12. Caída Inclinada (Béjar, 2005).	48
Figura N° 13. Rápida (Béjar, 2005).	50
Figura N° 14. Caída Escalonada (Béjar, 2005).	51
Figura N° 15. Funcionamiento de una rápida escalonada (Ricardi, 2011).....	57
Figura N° 16. Flujo Saltante.	58
Figura N° 17. Flujo Saltante NA1 (Ricardi-2011).	59
Figura N° 18. Flujo Saltante NA2 (Ricardi, 2011).	59
Figura N° 19. Flujo Saltante NA3 (Ricardi, 2011)	60
Figura N° 20. Flujo Transitorio.....	61
Figura N° 21. Flujo Transitorio (Ricardi, 2011)	61
Figura N° 22. Flujo Rasante.....	62
Figura N° 23. Flujo Rasante SK1. (Flores , 2015).	63
Figura N° 24. Flujo Rasante SK2. (Flores , 2015).	63
Figura N° 25. Flujo Rasante SK3. (Flores , 2015).	64
Figura N° 26. Flujo Rasante en Forma General (Ricardi, 2011).....	65
Figura N° 27. Localización del PI y características de la rápida (Ricardi, 2011)	66
Figura N° 28. Criterios de cambio de régimen en vertedores. (Chanson & Gonzáles, 2004).....	70
Figura N° 29. Predicción de los flujos (Chanson, 1994).....	71
Figura N° 30. Esquema de Flujo Rasante. (Rosado Castillo, 2017)	72
Figura N° 31 Identificación de región no uniforme y cuasi uniforme, según Ohtsu al. (2004), a) $\theta > 19^\circ$	74
Figura N° 32. Esquema de tipos de flujos rasantes Ohtsu et al. (2004).	75
Figura N° 33. Localización del PI y características de la rápida. (Matos 1999).	79
Figura N° 34. Localización del punto de Inicio (Matos 1999).....	80
Figura N° 35. Flujo saltante con resalto completamente desarrollado (Ricardi, 2011).	93
Figura N° 36. Parámetros básicos del flujo en régimen saltante.....	94

Figura N° 37. Flujo saltante con resalto hidráulico parcialmente desarrollado (NAP2). (Flores, 2015)	96
Figura N° 38. Flujo saltante sin resalto hidráulico (NAP3). (Flores, 2015)	97
Figura N° 39. Parámetros de un vertedero con NAP (Ricardi-2011)	102
Figura N° 40. Flujo Transitorio con cavidades de aire (TRA1) (González & Chanson, 2004).	104
Figura N° 41. Flujo Transitorio con cavidades de aire y vórtices (TRA2) (González & Chanson, 2004).	104
Figura N° 42. Parámetros para el diseño de una cubeta tipo USBR, Design of Small Dams, 1960.	105
Figura N° 43. Tanque tipo Saint Antony Falls (SAF)	108
Figura N° 44. Tanque tipo SAF, CFE, 1970.	109
Figura N° 45. Tanque amortiguador tipo USBR I, Design of Small Dams, 1960.	111
Figura N° 46. Tanque amortiguador tipo USBR II, Design of Small Dams, 1960.	112
Figura N° 47. Tanque amortiguador tipo USBR III, Design of Small Dams, 1960.	113
Figura N° 48. Ayuda de Diseño para Tanques Amortiguadores en vertederos de Caída Libre, Design of Small Dams, 1960.	115
Figura N° 49. Esquema Típico de una Grada	119
Figura N° 50. Medida del ancho del canal.	148
Figura N° 51. Medida del Ancho del Canal $W = 7.95$ m.	149
Figura N° 52. Medida de la altura de pared del canal $h = 2.33$ m.	149
Figura N° 53. Registro de medidas en formato de levantamiento.	150
Figura N° 54. Medida del espesor de la pared lateral del canal $e=0.30$ m.	151
Figura N° 55. Plano de Elevación del Diseño del Modelo Físico La Cascada.	156
Figura N° 56. Plano de Vista en Planta del Diseño del Modelo Físico La Cascada.	156
Figura N° 57. Estructura Metálica para el Modelo Físico (AutoCAD 3D).	157
Figura N° 58. Esquema General de un Escalón con caudal al 15% (10.5 m ³ /seg) del Caudal de Diseño. (Ver Anexo N° 12).	160
Figura N° 59. Esquema General de un Escalón con caudal al 30% (21 m ³ /seg) del Caudal de Diseño. (Ver Anexo N° 13).	162
Figura N° 60. Esquema General de un Escalón con Caudal al 50% (35 m ³ /seg) del Caudal de Diseño. (Ver Anexo N° 14).	164
Figura N° 61. Esquema General de un Escalón con Caudal al 75% (52.5 m ³ /seg) del Caudal de Diseño. (Ver Anexo N° 15).	166
Figura N° 62. Esquema General de un Escalón con Caudal al 90% (63 m ³ /seg) del Caudal de Diseño. (Ver Anexo N° 16).	168
Figura N° 63. Esquema General de un Escalón con Caudal al 100% (70 m ³ /seg) del Caudal de Diseño. (Ver Anexo N° 17).	170
Figura N° 64. Esquema General de un Escalón con Caudal al 120% (84 m ³ /seg) del Caudal de Diseño. (Ver Anexo N° 18).	172
Figura N° 65. Esquema General de un Escalón con Caudal al 140% (98 m ³ /seg) del Caudal de Diseño. (Ver Anexo N° 19).	174
Figura N° 66. Esquema General de un Escalón con Caudal al 150% (105 m ³ /seg) del Caudal de Diseño. (Ver Anexo N° 20).	176

Figura N° 67. Datos Topográficos para el Diseño Hidráulico.	178
Figura N° 68. Dimensionamiento de Escalones.	179
Figura N° 69. Diseño del Tanque Amortiguador.	180
Figura N° 70. Esquema General del Diseño Hidráulico la Caída Escalonada La Cascada.	182
Figura N° 71. Vista en Planta Hec Ras.	183
Figura N° 72. Vista en Elevación Hec Ras.	184
Figura N° 73. Perfil del Flujo del Caudal al 15%	185
Figura N° 74. Escalón N°4 con caudal al 15 %	185
Figura N° 75. Perfil del Flujo del Caudal al 30%.	187
Figura N° 76. Escalón N°4 con caudal al 30 %	187
Figura N° 77. Perfil del Flujo del Caudal al 50%.	189
Figura N° 78. Escalón N°4 con caudal al 50 %	189
Figura N° 79. Perfil del Flujo del Caudal al 75%.	191
Figura N° 80. Escalón N°4 con caudal al 75 %	191
Figura N° 81. Perfil del Flujo del Caudal al 90%.	193
Figura N° 82. Escalón N°4 con caudal al 90 %	193
Figura N° 83. Perfil del Flujo del Caudal al 100%.	195
Figura N° 84. Escalón N°4 con caudal al 100 %	195
Figura N° 85. Perfil del Flujo del Caudal al 120%.	197
Figura N° 86. Escalón N°4 con caudal al 120 %	197
Figura N° 87. Perfil del Flujo del Caudal al 140%.	199
Figura N° 88. Escalón N°4 con caudal al 140 %	199
Figura N° 89. Perfil del Flujo del Caudal al 150%	201
Figura N° 90. Escalón N°4 con caudal al 150 %	201
Figura N° 91. Escalón N°6 con caudal al 150 %	202
Figura N° 92. Escalón N°10 con caudal al 150 %	202
Figura N° 93. Conformación de Estructura Metálica para el Modelo Físico.	204
Figura N° 94. Pintado de Estructura Metálica para el Modelo Físico.	205
Figura N° 95. Secado de pintura de Estructura Metálica.	205
Figura N° 96. Transporte de la de Estructura Metálica.	206
Figura N° 97. Corte de planchas de acrílico.	207
Figura N° 98. Piezas de acrílico cortadas según planos.	207
Figura N° 99. Montaje de pared izquierda del canal.	208
Figura N° 100. Fijado de piezas de acrílico.	209
Figura N° 101. Montaje y alineación de la pared intermedia del canal.	209
Figura N° 102. Sellado de juntas con silicona del Modelo físico de La Cascada.	210
Figura N° 103. Modelo físico de La Cascada a un 90 % de avance.	210
Figura N° 104. Ensayos del Modelo físico de La Cascada.	211
Figura N° 105. Regulación del Caudal por válvula del caudalímetro.	213
Figura N° 106. Muestra representativa de agua tomaba en un balde de 8 l.	214
Figura N° 107. Medición de los litros tomados en cada prueba.	215

Figura N° 108. Ensayo N° 1 en Modelo Físico La Cascada con Caudal al 15%.....	215
Figura N° 109. Medida de Tirantes con Caudal al 15%.....	218
Figura N° 110. Ensayo N° 2 en Modelo Físico La Cascada con Caudal al 30%.....	219
Figura N° 111. Medida de Longitud de Resalto con Caudal al 30%.....	221
Figura N° 112. Ensayo N° 3 en Modelo Físico La Cascada con Caudal al 50%.....	222
Figura N° 113. Medida de Tirantes con Caudal al 50%.....	224
Figura N° 114. Ensayo N° 4 en Modelo Físico La Cascada con Caudal al 75%.....	225
Figura N° 115. Medida de Longitud de Resalto con Caudal al 75%.....	227
Figura N° 116. Ensayo N° 5 en Modelo Físico La Cascada con Caudal al 90%.....	228
Figura N° 117. Medida de Tirantes con Caudal al 90%.....	230
Figura N° 118. Ensayo N° 6 en Modelo Físico La Cascada con Caudal al 100%.....	231
Figura N° 119. Medida de Tirantes con Caudal al 100%.....	233
Figura N° 120. Ensayo N° 7 en Modelo Físico La Cascada con Caudal al 120%.....	234
Figura N° 121. Medida de Tirantes con Caudal al 120%.....	236
Figura N° 122. Ensayo N° 8 en Modelo Físico La Cascada con Caudal al 140%.....	237
Figura N° 123. Flujo con Caudal al 140%.....	239
Figura N° 124. Ensayo N° 9 en Modelo Físico La Cascada con Caudal al 150%.....	240
Figura N° 125. Flujo con Caudal al 150%.....	242
Figura N° 126. Gráfica de Predicción del Flujo Escalonado en Excel.....	244
Figura N° 127. Clasificación del flujo de los ensayos del modelo físico.....	245
Figura N° 128. Gráfica de Resultados Finales en %.....	247
Figura N° 129. Gráfica de Resultados Finales en m ³ /seg.....	247
Figura N° 130. Parámetros Hidráulicos al 15% (10.5 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	250
Figura N° 131. Parámetros Hidráulicos al 30% (21 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	253
Figura N° 132. Parámetros Hidráulicos al 50% (35 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	256
Figura N° 133. Parámetros Hidráulicos al 75% (52.5 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	259
Figura N° 134. Parámetros Hidráulicos al 90% (63 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	262
Figura N° 135. Parámetros Hidráulicos al 100% (70 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	265
Figura N° 136. Parámetros Hidráulicos al 120% (84 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	268
Figura N° 137. Parámetros Hidráulicos al 140% (98 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	271
Figura N° 138. Parámetros Hidráulicos al 150% (105 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	274
Figura N° 139. Gráfica de Resultados de Ampliación de Análisis con fórmulas en %.....	295
Figura N° 140. Gráfica de Resultados de Ampliación de Análisis con fórmulas en m ³ /seg.....	296
Figura N° 141. Esquema General de un Escalón con Caudal al 217% (151.9 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	298
Figura N° 142. Esquema General de un Escalón con Caudal al 250% (175 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	300
Figura N° 143. Esquema General de un Escalón con Caudal al 300% (210 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	302
Figura N° 144. Esquema General de un Escalón con Caudal al 400% (280 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	304

Figura N° 145. Esquema General de un Escalón con Caudal al 500% (350 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.	306
Figura N° 146. Gráfica de predicción de Flujo para un Caudal del 540% (378 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.	307
Figura N° 147. Gráfica de predicción de Flujo para un Caudal del 600% (420 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.	308
Figura N° 148. Gráfica de predicción de Flujo para un Caudal del 700% (490 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.	309
Figura N° 149. Gráfica de predicción de Flujo para un Caudal del 800% (560 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.	310
Figura N° 150. Gráfica de predicción de Flujo para un Caudal del 890% (560 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.	311
Figura N° 151. Esquema General del Flujo Rasante para un Caudal del 900% (630 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.	314
Figura N° 152. Esquema General del Flujo Rasante para un Caudal del 1600% (1120 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.	316
Figura N° 153. Esquema General del Flujo Rasante para un Caudal del 2000% (1400 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.	318
Figura N° 154. Esquema General del Flujo Rasante para un Caudal del 2500% (1750 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.	320
Figura N° 155. Datos Topográficos para el Diseño Hidráulico Óptimo.	321
Figura N° 156. Pre dimensionamiento de Escalones - Diseño Hidráulico Óptimo.	322
Figura N° 157. Diseño del Tanque Amortiguador - Diseño Óptimo.	323
Figura N° 158. Esquema General del Diseño Hidráulico Óptimo de la Caída Escalonada La Cascada.	325
Figura N° 159. Correlación de Flujo Saltante (NAP).	326
Figura N° 160. Correlación de Flujo Rasante (SK).	327
Figura N° 161. Nueva Gráfica para Predicción del Flujo Escalonado. Ver Anexo N° 40	328

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores de Escala. Rajaratnam, N. (1990)	45
Tabla 2. Valores de n con respecto a ϵ . Vergara, S. (1993).	46
Tabla 3. Valores de concentración media del aire para diferentes pendientes (Straub & Anderson, 1958).	76
Tabla 4. Criterios de Diseño para Canales Escalonados con Flujo Rasante. Gonzáles & Chanson (2007).	91
Tabla 5. Cuadro de Operacionalización de Variables.	136
Tabla 6. Tabla de procesos.	141
Tabla 7. Recursos Humanos.	144
Tabla 8. Presupuesto.	144
Tabla 9. Mediciones Adicionales	151
Tabla 10. Resultados de Entrevista	152
Tabla 11. Datos obtenidos de La Cascada.....	153
Tabla 12. Datos del Plano Digitalizado de La Cascada.....	154
Tabla 13. Dimensiones del Modelo Físico a Escala.....	155
Tabla 14. Materiales para construcción del Modelo Físico.....	157
Tabla 15. Análisis con Fórmulas al 15% (10.5 m ³ /seg).....	159
Tabla 16. Análisis con Fórmulas al 30% (21 m ³ /seg).....	161
Tabla 17. Análisis con Fórmulas al 50% (35 m ³ /seg).....	163
Tabla 18. Análisis con Fórmulas al 75% (52.5 m ³ /seg).....	165
Tabla 19. Análisis con Fórmulas al 90% (63 m ³ /seg).....	167
Tabla 20. Análisis con Fórmulas al 100% (70 m ³ /seg).....	169
Tabla 21. Análisis con Fórmulas al 120% (84 m ³ /seg).....	171
Tabla 22. Análisis con Fórmulas al 140% (98 m ³ /seg).....	173
Tabla 23. Análisis con Fórmulas al 150% (105 m ³ /seg).....	175
Tabla 24. Resumen de Resultados de Análisis con Fórmulas	177
Tabla 25. Cuadro Resumen de Verificación del Diseño Hidráulico de La Cascada.	181
Tabla 26. Resultados de Hec Ras con Caudal de Diseño al 15%.....	186
Tabla 27. Resultados de Hec Ras con Caudal de Diseño al 30%.....	188
Tabla 28. Resultados de Hec Ras con Caudal de Diseño al 50%.....	190
Tabla 29. Resultados de Hec Ras con Caudal de Diseño al 75%.....	192
Tabla 30. Resultados de Hec Ras con Caudal de Diseño al 90%.....	194
Tabla 31. Resultados de Hec Ras con Caudal de Diseño al 100%.....	196
Tabla 32. Resultados de Hec Ras con Caudal de Diseño al 120%.....	198
Tabla 33. Resultados de Hec Ras con Caudal de Diseño al 140%.....	200
Tabla 34. Resultados de Hec Ras con Caudal de Diseño al 150%.....	203
Tabla 35. Caudales Escalados - caída escalonada La Cascada.....	211
Tabla 36. Estabilización del Caudal al 15%.....	216

Tabla 37. Comprobación del Caudal al 15%	216
Tabla 38. Mediciones del Flujo con Caudal al 15%	217
Tabla 39. Promedio de Mediciones del Flujo con Caudal al 15% Escalado 1/75.....	217
Tabla 40. Estabilización del Caudal al 30%	219
Tabla 41. Comprobación del Caudal al 30%	220
Tabla 42. Mediciones del Flujo con Caudal al 30%	220
Tabla 43. Promedio de Mediciones del Flujo con Caudal al 30% Escalado 1/75.....	220
Tabla 44. Estabilización del Caudal al 50%	222
Tabla 45. Comprobación del Caudal al 50%	223
Tabla 46. Mediciones del Flujo con Caudal al 50%	223
Tabla 47. Promedio de Mediciones del Flujo con Caudal al 50% Escalado 1/75.....	223
Tabla 48. Estabilización del Caudal al 75%	225
Tabla 49. Comprobación del Caudal al 75%	226
Tabla 50. Mediciones del Flujo con Caudal al 75%	226
Tabla 51. Promedio de Mediciones del Flujo con Caudal al 75% Escalado 1/75.....	226
Tabla 52. Estabilización del Caudal al 90%	228
Tabla 53. Comprobación del Caudal al 90%	229
Tabla 54. Mediciones del Flujo con Caudal al 90%	229
Tabla 55. Promedio de Mediciones del Flujo con Caudal al 90% Escalado 1/75.....	229
Tabla 56. Estabilización del Caudal al 100%	231
Tabla 57. Comprobación del Caudal al 100%	232
Tabla 58. Mediciones del Flujo con Caudal al 100%	232
Tabla 59. Promedio de Mediciones del Flujo con Caudal al 100% Escalado 1/75.....	232
Tabla 60. Estabilización del Caudal al 120%	234
Tabla 61. Comprobación del Caudal al 120%	235
Tabla 62. Mediciones del Flujo con Caudal al 120%	235
Tabla 63. Promedio de Mediciones del Flujo con Caudal al 120% Escalado 1/75.....	235
Tabla 64. Estabilización del Caudal al 140%	237
Tabla 65. Comprobación del Caudal al 140%	238
Tabla 66. Mediciones del Flujo con Caudal al 140%	238
Tabla 67. Promedio de Mediciones del Flujo con Caudal al 140% Escalado 1/75.....	238
Tabla 68. Estabilización del Caudal al 150%	240
Tabla 69. Comprobación del Caudal al 150%	241
Tabla 70. Mediciones del Flujo con Caudal al 150%	241
Tabla 71. Promedio de Mediciones del Flujo con Caudal al 150% Escalado 1/75.....	241
Tabla 72. Resumen de Ensayos del Modelo Físico.....	243
Tabla 73. Resumen de Ensayos del Modelo Físico Ampliados a Escala 1/75.....	243
Tabla 74. Relación (h/l) y (h/yc) para Pruebas en Modelo Físico.....	245
Tabla 75. Comportamiento de Flujo para los Caudales Evaluados.....	246
Tabla 76. Comparación al 15% (10.5 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	248
Tabla 77. Comparación al 30% (21 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	251

Tabla 78. Comparación al 50% (35 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	254
Tabla 79. Comparación al 75% (52.5 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	257
Tabla 80. Comparación al 90% (63 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	260
Tabla 81. Comparación al 100% (70 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	263
Tabla 82. Comparación al 120% (84 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	266
Tabla 83. Comparación al 140% (98 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	269
Tabla 84. Comparación al 150% (105 m ³ /seg) del Caudal de Diseño.....	272
Tabla 85. Resumen de Comparación de Resultados.	276
Tabla 86. Tabla de Ampliación de Resultados de Análisis con Fórmulas.	294
Tabla 87. Análisis con Fórmulas al 217% (151.9 m ³ /seg).....	297
Tabla 88. Análisis con Fórmulas al 250% (175 m ³ /seg).....	299
Tabla 89. Análisis con Fórmulas al 300% (210 m ³ /seg).....	301
Tabla 90. Análisis con Fórmulas al 400% (280 m ³ /seg).....	303
Tabla 91. Análisis con Fórmulas al 500% (350 m ³ /seg).....	305
Tabla 92. Análisis con Fórmulas al 900% (630 m ³ /seg). Ver Anexo N° 31.	313
Tabla 93. Análisis con Fórmulas al 1600% (1120 m ³ /seg). Ver Anexo N° 32.	315
Tabla 94. Análisis con Fórmulas al 2000% (1400 m ³ /seg). Ver Anexo N° 33.	317
Tabla 95. Análisis con Fórmulas al 2500% (1750 m ³ /seg). Ver Anexo N° 34.	319
Tabla 96. Cuadro Resumen de Diseño Hidráulico Óptimo de La Cascada.....	324

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Similitud Geométrica.....	44
Ecuación 2. Similitud Cinemática.....	44
Ecuación 3. Similitud Dinámica.....	45
Ecuación 4. Número de Froude.....	56
Ecuación 5. Inicio de Flujo Rasante. (Essery y Horner, 1971).	67
Ecuación 6. Inicio de Flujo Saltante o NAP. (Rajaratnam, 1990).....	67
Ecuación 7. Límite Entre NAP y SKIMMING. (Rajaratnam, 1990).	67
Ecuación 8. Límite entre SKIMMING y NAP). (Rajaratnam, 1991).....	68
Ecuación 9. Límite ente NAP y SKIMMING para $h/l=0.333$. (Degoutte, 1992).....	68
Ecuación 10. Límite ente NAP y SKIMMING para $h/l=1$. (Degoutte, 1992).....	68
Ecuación 11. Límite de SKIMMING. (Chanson, 1994).	68
Ecuación 12. Límite Superior entre NAP y SKIMMING. (Ohtsu & Yasuda, 1999).	68
Ecuación 13. Límite Inferior entre NAP y SKIMMING. (Ohtsu & Yasuda, 1999).....	69
Ecuación 14. Límite entre NAP y SKIMMING. (Sánchez, 2001).	69
Ecuación 15. Límite ente NAP y TRA. (Chanson, 2002).	69
Ecuación 16. Límite ente TRA y SKIMMING. (Chanson, 2002).....	69
Ecuación 17. Límite ente NAP y TRA Chanson & Toombes (2004).	69
Ecuación 18. Límite ente TRA y SK Chanson & Toombes (2004).	70
Ecuación 19. Concentración de Aire.....	73
Ecuación 20. Tirante Característico.	73
Ecuación 21. Velocidad Media.	73
Ecuación 22. Concentración Media de Aire. (Chanson, 1994).	76
Ecuación 23. Concentración Media de Aire. (Matos, 1999).	76
Ecuación 24. Concentración Media de Aire. (Ohtsu, 2004).....	77
Ecuación 25. Altura Relativa. (Ohtsu, 2004))	77
Ecuación 26. Capa Límite Viscosa. Wood.....	80
Ecuación 27. Número de Froude Rugoso.....	81
Ecuación 28. Capa Límite Viscosa, Chanson & Toombes.....	81
Ecuación 29. Capa Límite Viscosa, (Chanson, 1995.).....	81
Ecuación 30. Capa Límite Viscosa. (Chanson, 2002).....	81
Ecuación 31. Tirante en el Punto de Inicio de Aireación. (Chanson, 2002)	82
Ecuación 32. Longitud de Inicio de Aireación. (Meireles, 2012)	82
Ecuación 33. Tirante en el Punto de Inicio de Aireación. (Meireles, 2012)	82
Ecuación 34. Relación de Energía Total y Tirante Crítico. (Ohtsu, 2004).....	82
Ecuación 35. Factor de Fricción. (Chanson, 2002)	83
Ecuación 36. Ecuación despejada de Factor de Fricción. (Chanson, 2002).....	84
Ecuación 37. Tirante Característico. (Boes y Hager, 2003).	84
Ecuación 38. Tirante Característico con relación al Tirante Crítico.	84

Ecuación 39. Tirante Característico. (Chanson, 2002).....	84
Ecuación 40. Factor de Fricción de Darcy. (Chanson, 2002).....	85
Ecuación 41. Pendiente de Fricción.	85
Ecuación 42. Velocidad Adimensional.	86
Ecuación 43. Ecuación de Continuidad.....	86
Ecuación 44. Velocidad Máxima Asumida al Pie del Vertedor.....	86
Ecuación 45. Velocidad Ideal Real de flujo.	87
Ecuación 46. Tirante correspondiente a un 90% de Concentración de Aire.	87
Ecuación 47. Altura Máxima de Escalón.	88
Ecuación 48. Tirante Crítico.	88
Ecuación 49. Condición para Flujo Rasante Completamente Desarrollado.....	89
Ecuación 50. Altura de Pared del Canal.	90
Ecuación 51. Profundidad conjugada menor (y_1).	94
Ecuación 52. Profundidad conjugada mayor (y_2).	94
Ecuación 53. Profundidad del flujo aguas arriba del chorro en caída (d_p).	94
Ecuación 54. Distancia de impacto del chorro (l_d).	94
Ecuación 55. Espesor del chorro en caída libre (y_i).	94
Ecuación 56. Ángulo de inclinación del chorro (β).....	95
Ecuación 57. Longitud del resalto hidráulico (l_r).....	95
Ecuación 58. Tirante en el borde del escalón (y_b).	95
Ecuación 59. Ecuación del Movimiento Parabólico.....	97
Ecuación 60. Ecuación de una Línea de Flujo en Corriente.....	98
Ecuación 61. Tiempo despejando Ecuación de Movimiento parabólico.....	98
Ecuación 62. Ecuación de una Línea de Flujo en Corriente Con $y=0$	98
Ecuación 63. Primera Aproximación de Distancia de Impacto.....	98
Ecuación 64. Ecuación de Continuidad.....	98
Ecuación 65. Segunda Aproximación de Distancia de Impacto.....	98
Ecuación 66. Tercera Aproximación de Distancia de Impacto.	99
Ecuación 67. Distancia de Impacto del Chorro.....	99
Ecuación 68. Ecuación de Distancia de Impacto del Chorro.	99
Ecuación 69. Ángulo de Inclinación de Chorro.	99
Ecuación 70. Profundidad de Flujo en la Capa Aireada.....	100
Ecuación 71. Tirante Conjugado Menor.	100
Ecuación 72. Profundidad de un Flujo Subcrítico en Caída.....	100
Ecuación 73. Profundidad de un Flujo Supercrítico en Caída.....	100
Ecuación 74. Velocidad del Chorro antes del Impacto.	101
Ecuación 75. Velocidad Horizontal del Chorro.	101
Ecuación 76. Velocidad Vertical del Chorro.....	101
Ecuación 77. Velocidad del Chorro después del Impacto (Renna & Fratino).....	102
Ecuación 78. Profundidad del flujo aguas abajo del Impacto.	102
Ecuación 79. Profundidad de flujo en la capa aireada (Renna & Fratino).	102

Ecuación 80. Longitud del Tanque Tipo SAF.....	106
Ecuación 81. Altura de Umbral de Salida (SAF).	107
Ecuación 82. Profundidad del Tanque Tipo SAF con Froude 1.7 - 5.5.	107
Ecuación 83. Profundidad del Tanque Tipo SAF con Froude 5.5 - 11.	107
Ecuación 84. Profundidad del Tanque Tipo SAF con Froude 11 - 17.	107
Ecuación 85. Número de Caída.....	114
Ecuación 86. Longitud mínima del tanque amortiguador	116
Ecuación 87. Longitud a los Bloques desde la Cima de la Cresta del Vertedor.	116
Ecuación 88. Peralte de los Bloques Disipadores.	116
Ecuación 89. Longitud mínima del tanque amortiguador.	117
Ecuación 90. Longitud a los Bloques desde la Cima de la Cresta del Vertedor.	117
Ecuación 91. Profundidad Mínima del Tanque.....	117
Ecuación 92. Altura Óptima del Obstáculo Amortiguador.	117
Ecuación 93. Ancho de Obstáculos.....	117
Ecuación 94. Altura de Umbral de Salida.	117
Ecuación 95. Ecuación General del Vertedero.....	120
Ecuación 96. Tirante Conjugado menor del Resalto Hidráulico.....	120
Ecuación 97. Carga Hidráulica más Carga de posición.	120
Ecuación 98. Tirante Conjugado Mayor del resalto Hidráulico.....	121
Ecuación 99. Verificación por Sumergencia N°1.....	121
Ecuación 100. Verificación por Sumergencia. N°2.....	121
Ecuación 101. Longitud de impacto del Chorro General.	121
Ecuación 102. Longitud de Impacto del Chorro.	122
Ecuación 103. Longitud Necesaria para la Formación del Resalto Hidráulico.....	122
Ecuación 104. Límite entre flujo NAP y TRA (2020).	326
Ecuación 105. Límite entre flujo TRA y SK (2020).	327

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Realidad Problemática

1.1.1 A Nivel Internacional

Diario Hoy Bolivia.com, Bolivia (2015). En su artículo publicado el 25 de noviembre informa que el canal Bolivia ha sufrido daños de socavación lateral debido a un incremento de su caudal por las torrenciales lluvias el cual generó una destrucción parcial en el canal, el daño se propagó alrededor de 720 m lineales en diferentes tramos, como se logra contemplar en la **Figura N°1**.



Figura N° 1 Socavación en canal Bolivia (Fuente: Hoy Bolivia.com - 2015) BOLIVIA.

Diario El Comercio, Ecuador (2016). En su publicación del 13 de mayo dió a conocer sobre el colapso del canal de regadío Abanto – Huachi – Pelileo ubicado en el Cantón - Ceballos, se explica que el colapso de dicho canal abrió una zanja de 10 metros de hondura y 7 metros de ancho, socavó la vía férrea, se inundaron 15 viviendas y ocasionó que varios cerramientos se desplomaran además de destruir sembríos y matar a varios animales. Los vecinos manifestaron que al escuchar el estruendo corrieron a cerrar las compuertas para evitar daños, pero fue tarde, como se logra contemplar en la **Figura N°2**.



Figura N° 2 Colapso del canal Abanto – Huachi – Pelileo (Fuente: El comercio – 2016) ECUADOR

Diario Libre, República Dominicana (2016). En su publicación del 18 de febrero informa del colapso del canal de riego Ulises Francisco Espaillat (UFE) en el cual la parte afectada del canal es aproximadamente 30 metros de longitud a lo largo del canal, también se informó que resultaron afectados 400 mil hectáreas de diferentes rubros agrícolas, , como se logra contemplar en la **Figura N°3**.



Figura N° 3 Colapso del canal Ulises Francisco Espaillat (Fuente: Diario Libre – 2016) REPÚBLICA DOMINICANA

Diario La Gaceta, Argentina (2016). En su publicación del 07 de febrero informó del desborde del canal Norte, debido a una fuerte lluvia que ocurrió en El Colmenar, La Municipalidad Talitense ubicó gaviones (Canastas de alambre rellenas con piedra seleccionada) a la orilla del canal, pero no fue suficiente para que el canal se desbordara, el líquido circulante por el canal inundó las viviendas, malogró todas las cosas que se encontraban en el interior de las viviendas como mesas muebles, camas y electrodomésticos. Los moradores, denunciaron públicamente que el canal Norte está en muy mal estado y exigieron que la municipalidad tome cartas en el asunto. También, manifestaron que todos los años en épocas de lluvia siempre se desbordad el canal.



Figura N° 4 Colapso del canal Norte (Fuente: Diario La Gaceta – 2016) ARGENTINA

1.1.2 A Nivel Nacional

Diario El Correo, Piura (2018). Según su artículo publicado el 24 de Junio, se hace de conocimiento público los daños recibidos por los canales de regadío de los distintos sectores agrícolas de Piura, siendo el motivo de este daño, las lluvias a consecuencia del Fenómeno del Niño Costero, muchos agricultores se han visto en la trágica situación de perder gran cantidad de sus cultivos por la falta de agua, agua que era llevada a través de los canales destruidos, muchos de estos eran destinados a la exportación, lo cual genera un caos social y económico afectando a los propietarios y a la región de Piura, las inclemencias de la naturaleza han dejado

en jaque a toda esta región por tal motivo se exige la inmediata respuesta y atención de las autoridades competentes.



Figura N° 5. Colapso de un Canal de regadío (Fuente: Diario el Correo - 2018) BOLIVIA.

Agencia peruana de noticias Andina, Arequipa (2017). En su artículo publicado el 19 de Enero, se llama la atención a las autoridades Arequipeñas encargadas del mantenimiento de los sistemas abastecedores de agua, motivo por el cual se generan fallas en algunas obras hidráulicas que están dirigidas al beneficio de la actividad agropecuaria en esta región al sur del país, se invita a los encargados a ejecutar obras de reparación y mantenimiento constante del sistema para solucionar y evitar futuros problemas, manteniendo un desarrollo de la actividad agropecuaria constante que beneficiará finalmente tanto a pobladores como a la misma región, el elemento vital sin duda para este tipo de práctica es el agua, por lo que se considera de carácter de urgencia, y a resolver de manera inmediata el problema citado.

El planeamiento de perforación de pozos para el uso de agua subterránea debería considerarse como un complemento al sistema que ya existe y no una solución al problema, dilema que se está debatiendo entre los propios dueños de los terrenos donde se desarrollan estas actividades generando una confusión que solo complica la situación que se está enfrentando.

El ministro de agricultura y riego, José Manuel Hernández señaló la intención de construir una represa la cual ya tiene un nombre tentativo, el cual es ‘Peña Negra’, se espera llegue a darse la construcción de dicha presa y se obtenga el mayor beneficio de esta obra.



Figura N° 6. Fallas en Canal de regadío (Fuente: Andina - 2017) AREQUIPA.

Agencia peruana de noticias Andina, Piura (2018). En su artículo publicado el 10 de mayo, Se menciona el canal Huaypirá y el túnel Culqui como los principales afectados por el Fenómeno del Niño Costero en la región de Piura, las fallas generadas en las estructuras que van desde fisuras hasta ruptura y desprendimiento total de secciones de las estructuras, han hecho que se convoque a una asamblea de emergencia de la Junta de Usuarios del Alto Piura con el director ejecutivo del Programa SubSectorial de Irrigaciones para transmitir su malestar y las consecuencias terribles por estas fallas generadas a sus vez por un fenómeno natural que ha afectado de manera altamente relevante a distintas regiones a su paso; se necesitará una inversión alta y necesaria para no solo reparar estos daños, si no también mejorar tanto el diseño como la preparación para un futuro evento de tal magnitud o mayor. Las autoridades competentes deberán actuar de manera rápida y eficaz para atender las necesidades inmediatas y urgentes de su población.



Figura N° 7. Fallas en Túnel Culqui (Fuente: Andina – 2018) PIURA.

1.1.3 A Nivel Local

Agencia de Noticias Andina, Lambayeque (2015). En su publicación del 31 marzo informa que las lluvias causaron serios daños en el canal Taymi, en las cercanías de Tres Tomas y Fala Falita, Jurisdicción de la Provincia de Ferreñafe, que fueron causados por la activación de las quebradas cercanas que ingresaron al canal y produjeron la erosión de un tramo de aproximadamente 40 metros del camino de vigilancia, rajaduras en la margen derecha del canal y erosiones en las bermas, Como se puede contemplar en la **Figura N° 8**.



Figura N° 8. Fallas en Canal Taymi (Andina - 2015) LAMBAYEQUE

A través de los años la caída escalonada “LA CASCADA”, estructura hidráulica que forma parte del canal alimentador del Proyecto Tinajones, ha tenido constantes reparaciones que han afectado al funcionamiento continuo de esta estructura y en el almacenamiento del reservorio Tinajones, lo cual afecta de manera directa los intereses a lograr con este proyecto de gran magnitud. Los daños que se generan en La Cascada es debido específicamente por erosión en sus escalones, en la viga de choque y en la pantalla vertedora, la erosión que se produce hipotéticamente se dice que es causada por las altas velocidades que se genera en el flujo hidráulico.

Esta estructura hidráulica se encuentra en el tramo del canal alimentador del Proyecto Tinajones, proyecto de gran importancia para la región Lambayeque y por lo mismo es que el control sobre todas las obras que pertenezcan al sistema que conduce el agua en este proyecto debe ser muy minucioso, constantes y exhaustivo, de manera que se garantice el buen funcionamiento de las estructuras y no se interrumpa el flujo constante de agua.

La caída escalonada La Cascada que se encuentra a 1Km del Distrito de Chongoyape, ruta al Caserío Paredones, hecha de concreto armado, tiene una función específica que es la disipación de energía y la de salvar un desnivel de 42.7 m de altura que se genera al tener el canal alimentador como ruta el cerro Racarrumi, pasando esta estructura, el canal se dirige hacia la parte baja del caserío Paredones, cuenta con 12 escalones y cada uno de ellos con una altura aproximada de 4.65 m y una longitud de 19.3 m, características con las que se concibió el primer diseño y que no han dado los mejores resultados, razón por la cual se hace la presente investigación para que por medio del análisis de los Flujos Saltante, Transitorio y Rasante se pueda hacer una revisión del diseño hidráulico comparando los resultados y características que se obtendría por medio del diseño analizado con dichos flujos y características que presenta actualmente la estructura, hay que tener en cuenta que ya se han hecho reparaciones por lo que puede que muchas de las fallas o daños que se presentaron a inicios de la vida útil de esta estructura, ya no se generen en la actualidad.

Unos de los fenómenos que afectan notoriamente en canales, es la cavitación, que es la formación de bolsas de aire dentro del flujo, lo que genera una energía que daña a la estructura y genera fisura que pueden generar pérdida de agua y por lo tanto el mal funcionamiento de La

Cascada. Este fenómeno se da con mayor frecuencia debido al gran movimiento que tiene el flujo al descender por la estructura.



Figura N° 9. Caída Escalonada La Cascada – Chongoyape - Chiclayo

El área de influencia de la estructura, ya sea por motivos de impacto ambiental o incluso social, es de aproximadamente 15500 m², pero si hablamos de su importancia dentro del Proyecto Olmos, podemos decir incluso que su área de influencia es toda la región de Lambayeque. Su influencia también va por el ámbito turístico, ya que es muy conocida y mencionada al hablarse del distrito de Chongoyape, por lo que algún fallo de esta estructura puede afectar más que sus principales funciones, volviéndola una estructura de gran relevancia tanto para la hidráulica en nuestra región como para la influencia social en el distrito de Chongoyape.

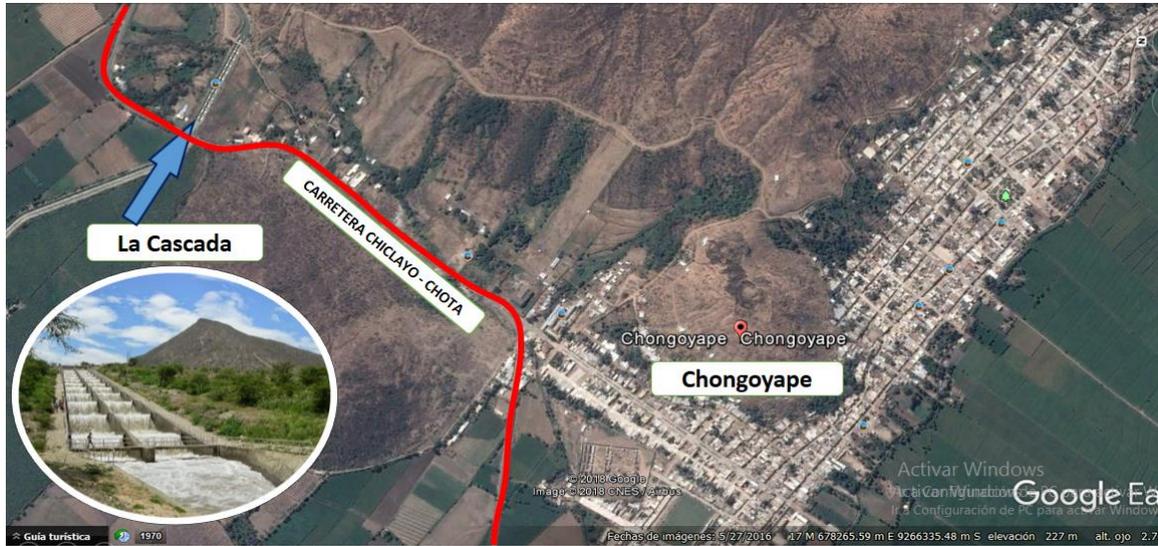


Figura N° 10. Croquis del área de influencia. Google Earth.

Área de influencia: 15500 m²

Coordenadas de La Cascada

Latitud: 6°37'32" S

Longitud: 79°23'4.29" O

1.1.4 Objeto de Estudio

Constantes reparaciones de la caída escalonada LA CASCADA que han afectado el funcionamiento continuo de esta estructura muy importante para el reservorio Tinajones.

1.2 Antecedentes de Estudio

1.2.1 A Nivel Internacional

Del Toro Ávila Nataly Viviana, Ecuador (2013), para lograr el nivel de Ingeniero Civil de la Universidad Central del Ecuador, en su investigación titulada “BASES Y CRITERIOS DE DISEÑO DE CANALES CON FLUJO ESCALONADO Y SUJETOS A AIREACIÓN NATURAL”, se planteó como objetivo recopilar información de las diferentes investigaciones experimentales realizados en los últimos años sobre los métodos para el análisis y diseño de rápidas escalonadas sujetas a aireación natural. Se ha efectuado una confrontación de métodos y sugerencias y se han unificado para obtener un mayor ajuste de resultados, obteniéndose como

resultado que en los canales de fondos escalonados la máxima capacidad se obtiene con flujos rasantes, mientras que la máxima disipación de energía se obtiene con flujos escalón por escalón por escalón, para canales escalonados pequeños, el flujo podría no desarrollarse por completo al pie del canal como flujo rasante, en estos casos es preferible buscar el flujo escalón por escalón para una mayor disipación de energía.

Efectivamente en la investigación antes mencionada se ha realizado una comparación entre los métodos de cálculo y diseño para canales con flujo escalonado sujetos a aireación natural, verificándose que la máxima capacidad en un canal escalonado se obtiene con el flujo rasante, pero en la máxima disipación de energía se obtiene con el flujo escalón por escalón.

Soledad Estrella Toral, España (2013), para alcanzar la categoría de Doctor en Ingeniería Civil en la Universidad de Catalunya en su investigación titulada “COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE ALIVIADEROS ESCALONADOS SIN CAJEROS LATERALES EN PRESAS DE HCR”, se planteó como objetivo analizar el flujo en un modelo físico para la caracterización del comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales en presas de HCR, se demostró que existe un tramo en el recorrido del aliviadero junto al cajero sobre el que cae el flujo, donde el caudal específico es idéntico al de entrada, es decir una zona que opera como si tuviera cajeros laterales. El acompañamiento paralelo al eje y de longitud de 10 metros (en prototipo) es efectivo y permite recoger 10 y 20 % más caudal en la zona encarada con el vertido sin acompañamiento.

En la investigación antes descrita, se verifica que es posible obtener un comportamiento hidráulico efectivo en aliviaderos escalonados sin cajeros laterales en presas de HCR, esta investigación servirá para la aplicación en el diseño de presas de HCR, específicamente en aliviaderos escalonados, esta propuesta de diseño representa una reducción en los costos del proyecto, y a su vez acelerar su proceso constructivo, ya que solo se construirán cajeros laterales en un tramo inicial del aliviadero escalonado.

Gerardo Rendón Ricardi, México (2011), para alcanzar la categoría de Maestro en Ciencias en Hidráulica en el Instituto Politécnico Nacional en su investigación titulada “DISEÑO DE VERTEDEROS ESCALONADOS” se planteó como objetivo estudiar la teorías del análisis y diseño de vertederos escalonados, se estableció la relevancia de la forma de los escalones,

tomando en consideración el perfil y el tipo de flujo que se pretende lograr en el vertedor, se aclaró el procedimiento del diseño de una rápida escalonada desde la conformación hidráulica de la conducta del flujo en los escalones, mostrando ejercicios de utilización en los proyectos y análisis de rápidas escalonadas y se determinó los toques y alcances del procedimiento propuesto; es común que se muestre un margen no especificado que es el flujo Transitorio (TRA), en efecto este toque en el análisis del flujo escalón en escalón, se obtiene con los caudales máximos pero sin llegar a los caudales que producen flujo rasante.

Para esta investigación antes mencionada efectivamente se estudió las teorías para el diseño de vertederos, se tomó en cuenta la forma de los escalones según el perfil y variedad de flujo que se pretende lograr, se presentó ejercicios de aplicación del diseño y análisis de rápidas escalonadas el cual ayudará en el trabajo de diseño de proyectos de vertederos escalonados, y para futuras investigaciones referentes al tema.

Gabriel Alfonso Rosado Cantillo, Colombia (2017), para lograr el nivel de Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos en la Universidad de Colombia en su investigación titulada “METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE CANALES ESCALONADOS, DISIPADORES DE ENERGÍA, EMPLEADOS EN DRENAJE URBANO, BASADA EN MODELACIÓN FÍSICA” se planteó el objetivo de realizar una validación de las tesis producidas en las invenciones representativas, referente a diseño de canales escalonados reductores de energía, aplicado al drenaje urbano. Por medio de una modelación física a escala reducida se observó que en el régimen de flujo rasante se puede conseguir una disipación de la energía específica en un 50% y con el régimen de flujo saltante se consigue una disipación del 94 %. Según los resultados obtenidos se planteó una metodología de diseño de canales escalonados dentro del régimen de flujo rasante y saltante.

En la investigación antes descrita se constata que se realizó una validación de las teorías de diseño de canales escalonados mediante un modelo físico a escala para la aplicación en drenaje urbano, los resultados obtenidos en dicha investigación son de gran ayuda para los ingenieros proyectistas ya que se podrá aplicar en los proyectos de canales escalonados en drenaje urbano.

Juan Espinosa – Carlos Mera, Ecuador (2007), para alcanzar el nivel de Ingeniero Civil en la Universidad Politécnica Nacional en su investigación titulada “ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA, DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES Y RESISTENCIA AL FLUJO DE UNA RÁPIDA CON FONDO ESCALONADO CON RELACIÓN ALTURA (h) – LONGITUD DE GRADA (l) DE $h/l = 0.10$, se analizó las particularidades del flujo en rápidas con fondo escalonado libre y con umbrales colocados al extremo de cada grada, mediante la modelación física a escala se observó que en los ensayos ejecutados para un rango de gastos desde 5.72 l/s hasta 55.77 l/s (litros/segundo) existe el flujo escalón por escalón, en transición y rasante, se tomaron nota de valores hidráulicos como, velocidad del flujo, tirantes de agua y cargas piezométricas a lo largo de los canales con fondo escalonado. Se concluyó que la disipación máxima de energía para en flujo rasante en rápida escalonada con umbrales fue de 50% y de 41.02% para rápidas libres.

En la investigación antes mencionada, efectivamente se realizó la comparación por medio de modelos físicos a escala, entre rápidas de fondo escalonado con obstáculos colocados en el extremo del escalón, y rápidas de fondo escalonado libre, en el cual se evidenció la influencia del umbral en el extremo de la grada para una mayor disipación de energía.

1.2.2 A Nivel Nacional

Rocky Escobar Bellido (Perú, 2014, Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga) con su investigación, para alcanzar el nivel de Ingeniero Civil, titulada: “DISEÑO HIDRÁULICO DE ESTRUCTURAS DE RETENCIÓN DE SÓLIDOS PROVENIENTES DE LADERAS DEL CERRO LA PICOTA-AYACUCHO”, se plantea como objetivo realizar el boceto de estructuras de detención de firmes procedentes de los declives de la colina La Picota considerando transporte de sólidos, erosión hídrica y control de erosión hídrica para evitar colapso en sistema de drenaje existente. Se emplearán los datos brindados por distintas estaciones, Climatológicas y Pluviométricas, con el fin de analizar las precipitaciones que generan los firmes procedentes de la colina LA PICOTA. Se analizan histogramas de precipitaciones anuales, interpolación por medio del Método de Kriging y el desarrollo de un análisis de sedimentos que será parte fundamental para el objetivo de la investigación, finalmente se obtienen relaciones entre precipitaciones y transporte de sedimentos que permiten

diseñar una estructura hidráulica con parámetros de prevención ante los daños que generan estos sólidos. Se concluye que mediante el análisis de máximas avenidas y con parámetros geomorfológicos respectivos, se obtiene un rango de gastos máximos instantáneos para los tiempos de retorno (10 – 1000 años).

En el presente estudio sin duda tiene gran importancia a nivel de la Ingeniería Hidráulica, ya que los sedimentos son un problema que han ocasionado muchos daños en innumerables estructuras hidráulicas.

Daniel Milke Pulcha Espinoza (Perú, 2014, Universidad Nacional de Ingeniería) con su investigación, para alcanzar el nivel de Ingeniero Civil, titulada: “MODELACIÓN MATEMÁTICA BI-DIMENSIONAL DE ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS. APLICACIÓN A MODELOS FÍSICOS DE LAS BOCATOMAS CHAO-VIRÚ, ACHIRANA, ATACAYÁN Y BATEA COMEZANGO”, se plantea como objetivo analizar las estructuras hidráulicas mencionadas, empleando un modelo físico a escala y un modelo digital por medio de un programa bidimensional, y de esta manera poder obtener el mejor diseño para evitar fallas en estas estructuras, bocatomas, de gran importancia para las zonas influenciadas por los ríos donde se encuentran estas obras, se logró aprender que los modelos físicos y digitales son un buen complemento el uno del otro, por lo que debería ser obligatorio para obras de esta envergadura, el realizar modelamientos de estos tipos, de esa manera se garantiza un buen comportamiento frente a las distintas adversidades que genera el comportamiento variable de un río.

Las bocatomas son elementos importantes para el aprovechamiento del agua, por lo que priorizar su correcto funcionamiento sin duda es un punto muy importante a desarrollar, y el uso de los métodos sugeridos en la presente investigación, muestran una muy buena opción a tener en cuenta.

Rocío Leslie Arista Alarcón (Perú, 2004, Universidad Nacional de Ingeniería) con su investigación, para alcanzar el nivel de Ingeniero Civil, titulada: “ESTUDIOS EXPERIMENTALES DE EROSIÓN LOCALIZADA A LA SALIDA DE UNA COMPUERTA”, se plantea como objetivo el estudio de la erosión generada en una compuerta

por el flujo que la atraviesa, el problema se genera en la interacción agua-estructura-suelo, el análisis de desarrolla en una compuerta, donde se encuentra inmediatamente a la salida de esta un base sólida y a continuación un suelo no cohesivo, el agua genera daños en estas zonas, debido a la propia fuerza del fluido, que genera la erosión e impide el correcto funcionamiento de estas pequeñas obras, se llegó a conocer que el lecho móvil no cohesivo no genera ningún efecto en la velocidad del chorro, esta solo sujeto del gasto de flujo, de la base del canal y la apertura de la compuerta.

Las compuertas son obras de pequeño tamaño, pero importantes en la distribución del agua, por lo que es importante analizar los fenómenos y problemas que se generan es estas obras.

Wilson Teodoro Rojas Gómez (Perú, 2004, Universidad Católica de Santa María) con su investigación, para alcanzar el nivel de Ingeniero Civil, titulada: “MODELAMIENTO HIDRÁULICO PARA EL ESTUDIO DE LA SOCAVACIÓN EN PILARES DE PUENTES Y ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS PARA SU CÁLCULO”, se plantea como objetivo el análisis de la socavación que genera en los pilares de puentes el paso de un flujo constante, ya sea un río o algún fluido con una corriente significativa en alguna zona en específica, este fenómeno ha sido el causante de innumerables derrumbes de puentes apoyados en pilares a lo largo de la historia, por lo que se busca determinar un método que permita calcular la profundidad que será socavada y de esta manera poder realizar contramedidas para evitar directamente el derrumbe del puente, se analizan los distintos factores que intervienen para que se genere la socavación y bajo qué condiciones pueden aparecer, finalmente se podrá decir de manera confiable, el diseño y tipo de pilar que se debe emplear para cada distinto caso, según los métodos apropiado, y de esta manera tener la certeza de que el pilar no será el motivo de un eventual derrumbe del puente.

La socavación en pilares es un problema que se ha dado siempre y por falta de estudio se ha permitido que traiga consecuencias como en el peor de los casos el derrumbe de un puente, la corriente genera este efecto y es un fenómeno constante que mantiene un ritmo lento pero que al final los efectos terminan siendo nocivos para la estabilidad de un pilar y por ende de un puente, cada resaltar que incluso teniendo el mayor de los cuidados, ante un evento extraordinario, cualquier diseño puede fallar.

1.2.3 A Nivel Local

Gonzáles Guevara Emilio Javier y Peláez Cáceres Ricardo Jesús (Perú, 2017, Universidad Señor de Sipán) con su investigación, para alcanzar el nivel de Ingeniero civil, titulada: “INFLUENCIA DE LA LONGITUD DE DISEÑO DEL SISTEMA DE DRENAJE TIPO HORIZONTAL PARA UN MODELAMIENTO FÍSICO BIDIMENSIONAL EN PRESAS DE MATERIAL HOMOGÉNEO NO COHESIVO Y COMPACTADO”, se plantea como objetivo emplear un modelo físico propio a escala para realizar ensayos simulando una presa y un tipo de filtro horizontal para obtener datos suficientes y realizar una correlación que permita conocer la influencia de la longitud de este drenaje en el comportamiento de la infiltración en la presa, finalmente se dedujo que son importantes para un buen comportamiento de la línea de flujo y por ende importante para la estabilidad de la presa.

Sin duda esta investigación es de gran importancia, porque como se sabe, siempre en toda presa de tierra, el agua pasa, hay infiltración y por lo tanto los sistemas de drenajes, son importantes para evitar las consecuencias más graves que sería el derrumbamiento de la presa.

1.3 Teorías Relacionadas al Tema

1.3.1 Variable Independiente

1.3.1.1 Modelo Físico de la Caída Escalonada

Varios de los eventos que ocurren en la naturaleza y dentro de la rama de hidráulica son ciertamente complejos que no es simple estudiarlos solamente con procedimientos matemáticos. Así mismo es recomendable cogerse al empleo de métodos experimentales, como instrumento para alcanzar soluciones prácticas, utilizadas en problemas de ingeniería, fluvial y obras hidráulicas en general.

Algunos de los casos más comunes son: investigación de extensión de oleaje, movimiento de mareas y corrientes, traslado de sedimentos, seguridad de estructuras sujetas a las acciones del oleaje, influencia de estructuras en defensas de playas, efectos del oleaje referente a embarcaciones en operación, extensión de mareas, erosión y sedimentación de cauces, estudios de avenidas, bocatomas, cárcamos de bombeo, vertedores hidráulicos, conducción de agua a presión, etc.

En hidráulica los modelos físicos se utilizan por lo general durante la etapa de diseño para perfeccionar una estructura y lograr una buena operación de la misma durante la etapa de funcionamiento. En la ingeniería civil, el uso de modelo físicos hidráulicos comúnmente es la construcción a escala pequeña de un prototipo.

En los modelos físicos de hidráulica se procura alcanzar que las características del flujo sean semejantes a las del prototipo. Por lo general existen tres clases de similitudes.

El modelo físico elaborado a escala es de una caída escalonada denominada “La Cascada” cuenta con 12 escalones cada uno con medidas altura $h = 4.65$ m y longitud $l = 19.30$ m, en la cual tanto sus parámetros (fondo del canal, paredes laterales y longitudes de escalón, etc.), como los parámetros del flujo deben escalarse de forma correcta.

Las construcciones de modelos físicos en hidráulica se utilizan generalmente en el proceso de boceto para perfeccionar una estructura y tener una operación correcta de la misma. En ingeniería los modelos físicos de hidráulica es una configuración en dimensiones reducidas de la estructura real.

La cascada es una estructura hidráulica ubicada en el tramo del canal alimentador del proyecto Tinajones, por medio de este canal llega el agua del río Chancay hacia el reservorio de Tinajones donde se almacenan 300 millones de metros cúbicos de agua, cantidad importante para el inicio de la campaña agrícola. La Cascada es una caída escalonada que salva una altitud de 42.7 metros y consta de 12 escalones, su capacidad máxima es de 70 m³/seg y tiene una sección de transición a su salida que permite la continuación del canal alimentador. Esta estructura ha requerido de constantes reparaciones por lo que se ha decidido hacer la presente investigación para revisar el diseño hidráulico de la estructura.

La existencia de depresiones, cursos de agua o pendientes topográficos, agregan disposiciones únicas y peculiares en un canal, por lo tanto, será fundamental tomar en cuenta estructuras adicionales, que admitan rebasar estos obstáculos. Entre los tipos de estructuras más utilizadas se presentarán las siguientes:

Caídas y rápidas.

Cuando el terreno natural por el cual debe pasar un canal tiene una pendiente muy fuerte, para evitar velocidades excesivas deberán proyectarse tramos de canal con pendientes suaves ligados por estructuras llamadas caídas.

Las caídas son empleadas comúnmente como estructuras de reductoras de energía en irrigación, suministro de agua y alcantarillado y son también requeridas en presas, barrajes y vertederos.

1.3.1.1.1 Teoría de Similitud

1.3.1.1.1.1 Similitud Geométrica

La semejanza geométrica de un modelo, se cumple, si todas las correlaciones de longitud para el modelo y el prototipo se mantienen constantes. Dicha correlación se denomina como escala del modelo.

$$\lambda_L = \frac{L_{mo}}{L_n} = constante$$

Ecuación 1. Similitud Geométrica.

Donde:

L_n = Longitud real del prototipo.

L_{mo} = Longitud para el modelo físico.

λ_L = Relación de parámetros longitudinales en el modelo a parámetros longitudinales.

1.3.1.1.2 Similitud Cinemática

La semejanza cinemática necesita que los fenómenos en el modelo tengan una relación constante referente a los fenómenos del prototipo.

$$\lambda_t = \frac{t_{mo}}{t_n} = constante$$

Ecuación 2. Similitud Cinemática.

Donde:

t_n = Tiempo del prototipo.

t_{mo} = Tiempo para el modelo físico.

λ_t = Relación de tiempo en el modelo físico a tiempo del prototipo.

En el contexto de semejanza cinemática, el tema puede ampliarse rápidamente a velocidades y aceleraciones.

1.3.1.1.3 Similitud Dinámica

La semejanza dinámica se requiere para conseguir que en modelos en términos de geometría sean iguales y se produzca la similitud cinemática. Esta conexión está vinculada en la relación

que existe entre fuerzas actuantes y el campo de flujo, representadas en la ecuación de movimiento.

La semejanza dinámica se produce cuando las fuerzas actuantes en el modelo están asociadas de forma constante, con las fuerzas del prototipo.

$$\lambda_F = \frac{F_{mo}}{F_n} = \text{constante}$$

Ecuación 3. Similitud Dinámica.

Donde:

F_n = Fuerzas del prototipo.

F_{mo} = Fuerzas para el modelo físico.

λ_F = Relación de fuerzas en el modelo físico a fuerzas del prototipo.

1.3.1.1.2 Factores de Escalas

En el flujo circulante por conductos abiertos (flujos de una sola fase y con un solo componente), el valor de Número de Froude tiene un roll muy significante en las expresiones matemáticas apropiadas para este flujo. Pero en el flujo circulante por conductos abiertos de dos fases (por ejemplo, flujos de hielo-agua) o dos componentes (por ejemplo, flujos aire-agua) el Número de Froude puede no ser significativo. Chanson, H. (2002).

Para este entorno, las similitudes de escala del modelo y el prototipo para diferentes criterios de similitudes se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1. Factores de Escala. Rajaratnam, N. (1990)

Factores de Escala

Magnitud	Unidades	Similitud de Froude	Similitud de Weber	Similitud de Reynolds
Longitud	m	$L_r = L_p/L_{m0}$	$L_r = L_p/L_{m0}$	$L_r = L_p/L_{m0}$
Superficie	m ²	$A_r = L_r^2$	$A_r = L_r^2$	$A_r = L_r^2$
Velocidad	m/s	$V_r = L_r^{1/2}$	$V_r = L_r^{-1/2}$	$V_r = L_r$
Tiempo	seg	$t_r = L_r^{1/2}$	$t_r = L_r^{3/2}$	$t_r = 1$
Caudal	m ³ /s	$Q_r = L_r^{5/2}$	$Q_r = L_r^{3/2}$	$Q_r = L_r$
Aceleración	m/s ²	$a_r = 1$	$a_r = L_r^{-2}$	$a_r = 1$
Presión	kg/m.s ²	$(P/\gamma) = L_r$	$(P/\gamma) = L_r$	$(P/\gamma) = L_r$
Coef. Rugosidad Manning	m ^{1/6}	$(n) = L_r^{1/6}$		

1.3.1.1.3 Tipos de Rugosidad

Para el caso de tener la necesidad de lograr en el modelo la cualidad de similitud de fricción entre el flujo en movimiento y los límites sólidos del flujo, deberán tomarse en cuenta las rugosidades de la superficie de dichos límites. El factor de rugosidad es un valor que está supeditado al tamaño, de la forma y distribución de la propia rugosidad, de forma que es diferente para cada sección, siendo esta difícilmente de replicar en el modelo físico, así como el valor respectivo del factor de fricción que puede demostrarse con un coeficiente; ya sea Chezy, Manning u otro. Flores, A. (2015).

Tabla 2. Valores de n con respecto a ϵ . Vergara, S. (1993).

Condición de Superficie	Valor de ϵ mm	Valor de n mm ^{1/6}
Plástico		0.009
Madera pulida	0.12 – 0.24	0.010 - 0.014
Madera rugosidad	0.24 - 0.48	0.011 - 0.015
Cemento liso	0.32 – 0.72	0.011 – 0.013
Cemento rugoso	0.99 – 1.98	0.013 – 0.016
Ladrillo	0.99 - 2.7	0.012 – 0.020
Tierra lisa y uniforme	1.5 – 18	0.020 – 0.030
Grava	20 - 100	0.022 – 0.035
Tierra con yerba		0.025 – 0.040

1.3.1.2 Tipos De Caídas

1.3.1.2.1 Caídas Verticales

Estas estructuras son empleadas en los tramos donde se requiere ejecutar variantes repentinas en la rasante del canal, permite juntar dos canales (uno superior y otro inferior), por intermedio de una superficie vertical, concediendo que el agua caiga libremente y en el tramo de aguas abajo.

La caída vertical se puede utilizar para medir el caudal que vierte sobre ella, si se coloca un vertedero calibrado. (Béjar, 2005)

Elementos de una Caída Vertical

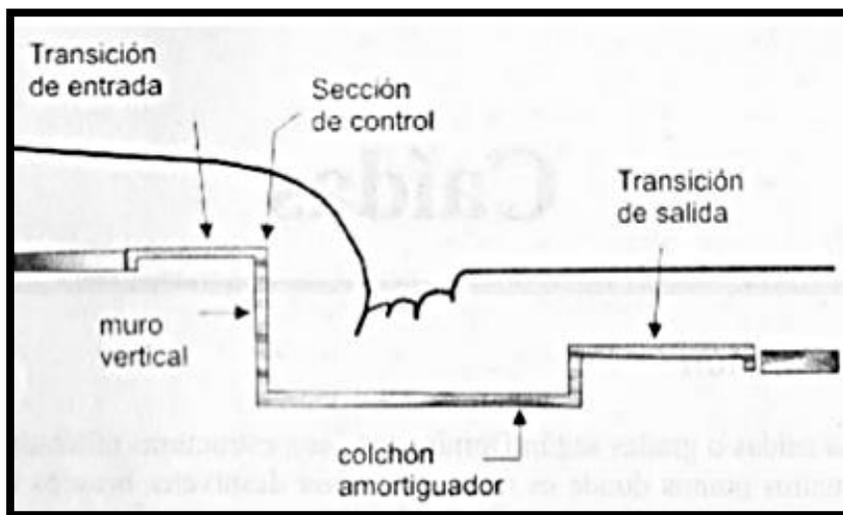


Figura N° 11. Caída Vertical (Béjar, 2005).

Transición de entrada: longitud del canal el cual junta por intermedio de una contracción paulatino la sección del canal superior con la sección de inspección.

Sección de control: área en la cual comienza el salto, en las proximidades de este hito participan los parámetros críticos del flujo.

Caída en sí: área hidráulica de forma rectangular y puede ser de tipo vertical o inclinado.

Poza o colchón amortiguador: tiene un área rectangular, teniendo el trabajo de reducir la energía cinética del agua después de la caída.

Transición de salida: tramo de canal que junta el tanque de reducción de energía con el tramo del canal de aguas abajo.

1.3.1.2.2 Caídas Inclinas

Son ideales para tramos pequeños de canal con inclinaciones altas, teniendo una velocidad en el flujo en la caída permanentemente más alta que en el mismo canal, originando severos daños por erosión si no se hace uso de un revestimiento adecuado, así pues, por intermedio del estudio hidráulico se comprueban los eventos del flujo que para esto serán el sustento para definición del tipo de revestimiento y de su amplitud. (Béjar, 2005)

Elementos de una Caída Inclina

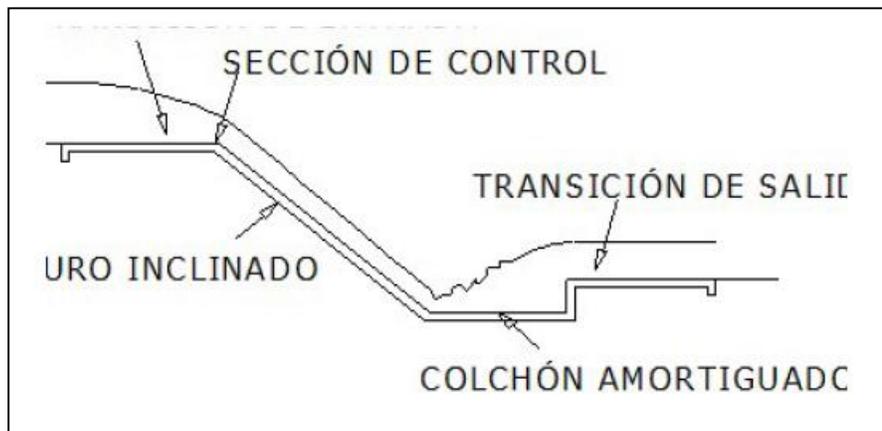


Figura N° 12. Caída Inclina (Béjar, 2005).

Transición de entrada aguas arriba: Al presentarse el caso de un canal trapezoidal y una caída de sección rectangular sería obligatorio diseñar una transición de entrada para la caída que ampare el cambio progresivo de la velocidad del agua del canal en la entrada, mientras mayor sea la velocidad aumentará la necesidad de proyectar una transición y en el caso de los canales de tierra se tendrá la necesidad de construir un enrocado aguas arriba para evitar posibles daños de la estructura producidos por la erosión.

Sección de control: Se trata de un cambio en el área hidráulica del canal en la posición donde comienza la caída o en una rampa en contra pendiente, de tal forma que las energías sean iguales tanto aguas arriba como en el lugar donde comienza la caída. (Béjar, 2005)

Conducto inclinado: La superficie de la parte superior del canal se junta con la superficie inferior continuando con una superficie con pendiente similar al de calma del material dado por el terreno logrando economizar en el proyecto, llegando a utilizarse un revestimiento de 10 a 15 cm de altura.

Es favorable que las pendientes del canal continúen con igual inclinación que en el punto de control, necesitando de la zona revestida con suficiente altura para que el agua no salte por encima de ella. (Béjar, 2005)

Colchón: En el tramo inclinado se produce energía que necesita ser reducida por medio de un tanque amortiguador en el cual se produce un resalto hidráulico, y este tendrá que ser comprendida en el interior del tramo del tanque amortiguador. Existen casos en que la caída y el tanque, pueden ser de secciones diferentes como rectangular o trapezoidal, la sección depende del contexto local y en sobretodo del criterio del profesional a cargo del diseño. (Béjar, 2005)

La transición de salida: Este elemento une el tanque amortiguador con el tramo aguas abajo, este mismo puede tener revestimiento o no, teniendo como función reducir la posibilidad de erosión en el canal.

1.3.1.2.3 Rápidas

Las rápidas son estructuras hidráulicas que se emplean para unir dos tramos de un canal con pendientes distintas con una alta variación entre estas para una distancia muy corta. A demás se emplean para producir una reducción de las cargas hidráulicas importantes en las corrientes con velocidades altas. La función es disminuir la velocidad y generar el cambio régimen de flujo supercrítico a sub crítico.

a.3.1 Elementos de una Rápida

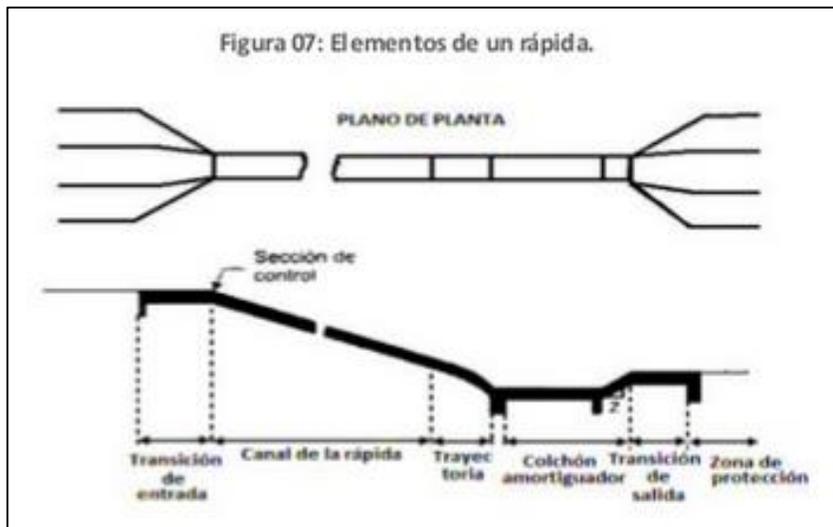


Figura N° 13. Rápida (Béjar, 2005).

Transiciones: Son empleadas para evitar la generación de ondas en el flujo. Una variación repentina del área hidráulica, sea convergente o divergente, hay la posibilidad de que dichas ondas ocurran, estas pueden causar inconvenientes, ya que estas se desplazan por el tramo inclinado y el tanque amortiguador de energía. (Béjar, 2005)

Tramo inclinado: El área hidráulica de una rápida abierta es rectangular, pero las particularidades del flujo de otras geometrías de áreas, se deben tomar en cuenta en que la supresión de ondas influye altamente en el diseño. La economía y simplicidad de construcción son tomados en cuenta para la selección de una sección hidráulica. (Béjar, 2005).

Trayectoria: Si el amortiguador de energía es un tanque, un tramo pequeño y pronunciado debe unirse la trayectoria con el tanque amortiguador.

Poza disipadora: Para un tanque amortiguador el agua fluye desde el tramo pequeño de creciente pronunciada a una velocidad elevada que la velocidad crítica. La variación repentina en la pendiente, donde la pendiente baja del piso del tanque amortiguador se junta con el tramo pequeño de pendiente pronunciada, fuerza al agua hacia un resalto hidráulico y la energía es reducida en la turbulencia resultante.

1.3.1.2.4 Caídas Escalonadas

El agua que fluye en estructuras de excedencias con pendientes elevadas genera energía que pueden producir velocidades altas en tramos cortos de este modo, si se presenta el caso del fenómeno de la cavitación pueden causar daños que pueden ser devastadores. Por lo que una caída escalonada da una mejor opción, que es disipar de manera progresiva por medio de los escalones la energía.

Elementos de una Caída Escalonada

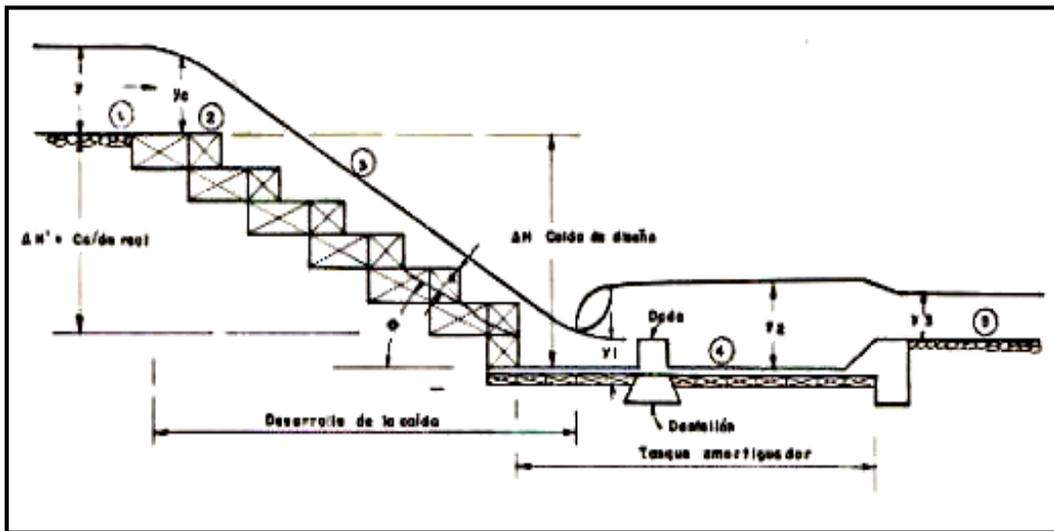


Figura N° 14. Caída Escalonada (Béjar, 2005).

Transiciones: Se emplean básicamente para empalmar longitudes de canales con geometrías distintas en diseño, su función es evitar pérdidas de energía excesivas.

Tramo escalonado: La sección usual para una caída escalonada es rectangular, contará con los escalones necesarios para disipar la suficiente energía y evitar grandes daños, así como salvar el desnivel donde será colocada.

Poza disipadora: En La Cascada se cuenta con una poza en cada escalón por lo que la disipación de energía es más eficaz que en una caída escalonada ordinaria. Finalmente se tiene una poza de mayor tamaño al pie de la caída, la cual culmina con la disipación de energía e

inmediatamente después se encuentra la transición que da paso a la continuación del canal alimentador.

1.3.1.2.5 Vertederos Escalonados

La utilización de vertederos escalonado es muy antigua, existen información de este tipo de estructuras hidráulicas desde hace 3300 años (Grecia ,1300 A.C: Irak, 694 A.C., Túnez, 100 D.C., Siria, 100-200 D.C, Libia, 200-300 D.C. y Portugal, 300 D.C.), (Chanson H., 1994 y 2001). Se emplearon con el propósito de disipar la energía del agua, en algunas veces para dar estabilidad a las construcciones sobre las que se colocaron. Se puede afirmar que, a nivel mundial han desarrollado un gran apogeo una vez que la construcción de las cortinas de concreto compactado con rodillo CCR. han sido más empleadas a partir de los años 80's, En México unos de los vertederos escalonados que existen es el vertedor que esta sobre la presa Las Blancas, en el estado de Tamaulipas1998. Flores, A. (2015).

1.3.1.2.5.1 Ventajas de los Vertederos Escalonados

Tienen proceso constructivo más económicos y más rápido debido al concreto compactado con rodillo (CCR).

Los vertederos escalonados disipan mayor energía del flujo al fluir por la huella de los escalones en comparación de un vertedor de fondo liso.

Los vertederos escalonados reducen el riesgo de producir problemas de cavitación.

Las dimensiones de la poza de disipación son menores con respecto al de vertedor liso.

1.3.1.2.5.2 Desventajas de los Vertederos Escalonados

Han sido utilizadas en alturas menores de 72 m excepto en México en el vertedor El Zapotillo con una altura de 122 m.

Existen pocos estudios del flujo escalonado el cual no ha sido completamente estudiado, y todavía hay muchas incógnitas por determinar.

1.3.1.2.6 Disipación de Energía en Canales con Pendiente Fuerte

En Canales diseñados con inclinaciones fuertes producen grandes velocidades en el flujo, en el que en muchos casos superan la máxima admisible para la protección de los materiales utilizados comúnmente en la construcción de dichos canales.

Para escoger la clase de amortiguador se tendrán en cuenta los siguientes criterios:

Energía del flujo.

Economía y mantenimiento (ya que éste eleva mucho el costo).

Características del cauce aguas abajo (roca, suelo erosionable, etc.)

Fijación de las vías de acceso, casa de máquinas, y demás estructuras hidráulicas ya que su seguridad no debe quedar comprometida.

Efecto de las subpresiones y del vapor de agua sobre las instalaciones.

Daños causados a la fauna y la flora por la erosión.

Proyectos y poblaciones aguas abajo. (Del Toro, 2013)

Algunas clases amortiguadores de energía son los siguientes:

Bloques de concreto o Baffles

La ubicación de estos elementos es en el fondo del pozo amortiguador para equilibrar el resalto hidráulico generando una fuerza en dirección aguas arriba. A demás se pueden colocar en el

tramo del canal de descarga, interpuestos, para forzar al flujo y tenga un desplazamiento prolongado y más curvo, generando una reducción de la velocidad.

Dientes o dados

Se ubican al inicio de pozo amortiguador para extender el flujo también se pueden ubicar en los vertederos y canales de descarga para reducir la energía por medio del choque. En el caso que se ubiquen en la huella dispersan el choque en un área mayor.

En investigaciones realizadas se ha determinado que este tipo de disipadores dan buenos resultados en caudales bajos, pero no en caudales altos, ya que el agua se distribuye con fuerzas altas y es arrojada en forma de arco desde lo alto y al al impactar genera socavación en el fondo del canal.

Escalones

Se utilizan de forma común en canales de descarga en la cual la altura o cambio de pendiente se logra con el diseño de estructuras de perfil escalonado, que genera una reducción de la velocidad en el flujo y disipan la energía mediante el choque e introducción de aire al agua.

1.3.2 Variable Dependiente

1.3.2.1 Evaluación de Diseño Hidráulico de la Caída Escalonada.

En obras hidráulicas se diseñan caídas escalonadas para salvar desniveles en el terreno el cual es trayectoria para el paso de un canal, el diseño hidráulico de la caída escalonada “La Cascada” se basa principalmente en la amortiguación de la caída del agua a un canal y de esta forma lograr la disipación de la energía del flujo generada en el desnivel o pendiente fuerte. Un factor determinante para el diseño de caídas escalonadas es la altura (h), la longitud (l) de la grada y el valor de la relación (h/l) que haya entre estas, y de la importancia de los tipos de flujo que se presenten según estas características.

El diseño de una caída escalonada tiene por objetivo dirigir el flujo de agua a partir de una sección superior a una sección inferior de un canal, por medio de un plano vertical el cual permite la disipación de energía causada por el desnivel.

El agua que fluye por canales de fondo escalonado es altamente turbulenta y muestra autoaireación o “aguas blancas”, para distinguir correctamente las propiedades del flujo, dicha aireación continuamente debe tomarse en cuenta. (Chanson y Gonzáles, 2007).

1.3.2.1.1. Funcionamiento Hidráulico

En el diseño de estructuras hidráulicas con velocidades de valores elevados es común que se presenten problemas originados por altas presiones vacuométricas (inferiores a la presión atmosférica) que pueden producir daños a las estructuras por efecto de la cavitación.

Una de las formas más factibles de evitar daños por efecto de la cavitación es insertar aire en el flujo de agua, generando un fluido con burbujas de aire, para lograr que el aire ingrese a la masa del flujo puede ser de forma forzada o de forma natural.

El flujo en estructuras escalonadas antiguamente se conocía como flujo autoaireado o aguas blancas, aún es una incógnita el comportamiento del flujo en estructuras escalonadas.

En estructuras hidráulicas escalonadas, la presencia de alta turbulencia del flujo en las cercanías de las gradas produce la reducción de la zona de flujo irrotacional si se compara con un vertedor de rápida lisa una vez que alcanza el punto donde se inicia la aireación del flujo de forma natural, generándose de forma constante un alto contenido de aire en el flujo que desde este último punto se incrementa y se equilibra.

Este flujo se presenta una vez que se forma las ondas de Froude en una rápida lisa generalmente se debía a una pendiente muy fuerte en una rápida y a una alta rugosidad del acabado de esta. (Ricardi-2011).

1.3.2.1.2. Ondas de Froude

El número de Froude se define con la relación A/T como la longitud característica o bien con el nombre de tirante Hidráulico que en el caso de canales rectangulares coincide con el tirante del flujo; por lo tanto, el número de Froude se expresa por:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * \frac{A}{T}}}$$

Ecuación 4. Número de Froude.

En donde:

A = Área de la sección hidráulica.

T = Espejo de agua.

El número de Froude define tres tipos de flujo, dando como valor neutro al número 1 que indica la frontera de la categorización.

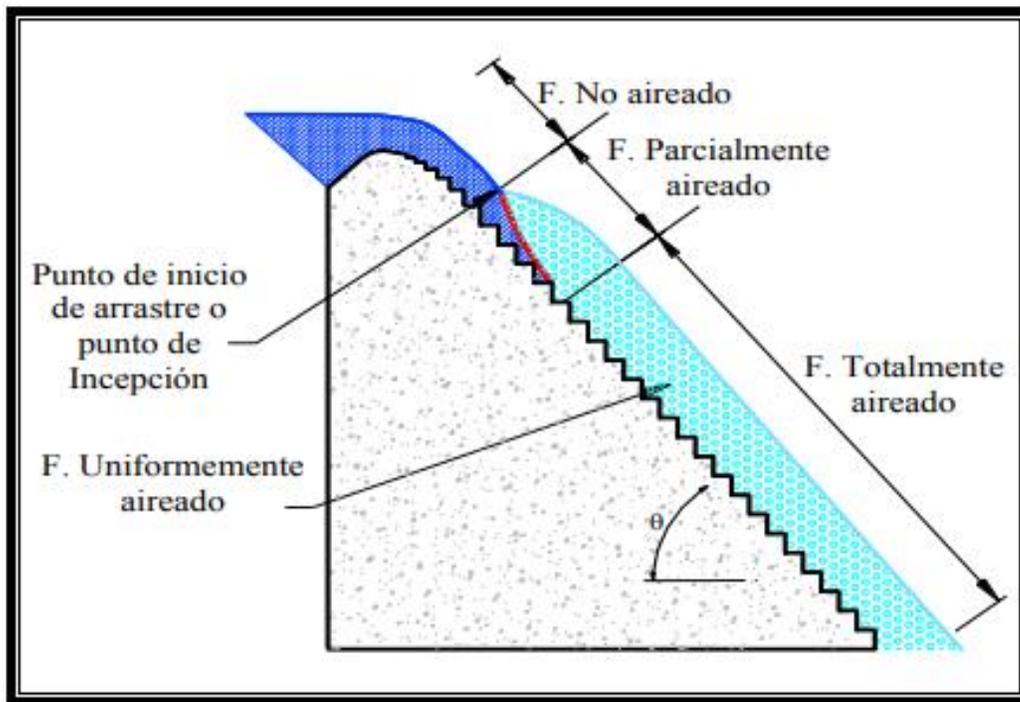


Figura N° 15. Funcionamiento de una rápida escalonada (Ricardi, 2011).

En un flujo que da valores de Froude mayores que uno, quiere decir que se presenta un flujo súper crítico el cual tiene velocidades o fuerzas inerciales mayores que la relación de peso o fuerzas gravitatorias, pero en el caso de que el valor de Froude sea menor que uno indica que las fuerzas gravitatorias son mayores que las fuerzas inerciales definiendo que se tiene un flujo subcrítico y para valores de Froude =1 se tiene el flujo crítico.

1.3.2.1.2. Tipos de Flujo en una Caída Escalonada

El comportamiento del flujo en una caída escalonada depende directamente del caudal en que opere en la caída, según el caudal de la caída pueden presentarse tres tipos de flujo, flujo saltante (conocido también como escalón por escalón o “NAPPE”), flujo transitorio, y flujo rasante (conocido también como “SKIMMING”).

a. Régimen de Flujo Saltante (NAPPE)

En caudales bajos, el agua fluye en formas de caídas consecutivas, que saltan de una grada a otra, golpeando en la dirección de la grada. Según Chanson (2002) el flujo saltante puede

dividirse en tres subtipos: flujo saltante hidráulico total (NA1), flujo saltante hidráulico parcial (NA2) y flujo saltante sin salto (NA3).

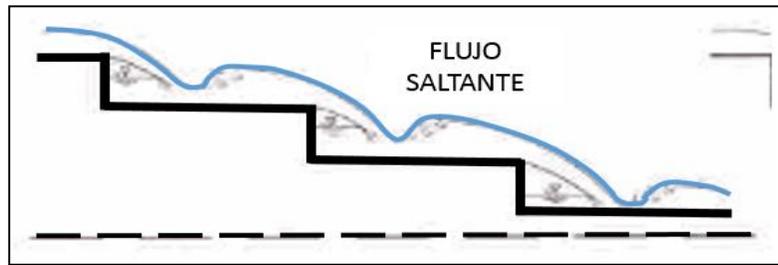


Figura N° 16. Flujo Saltante.

a.1. El Flujo NAP1

Es un flujo en el cual se puede apreciar un salto hidráulico completamente desarrollado, para caudales bajos y de tirantes hidráulicos pequeños que se puede relacionar con longitudes de escalones largas.

a.2. El Flujo NAP2

Es un flujo con un salto hidráulico parcialmente desarrollado para caudales bajos que también se pueden relacionar con longitudes de escalones amplias.

a.3. El Flujo NAP3

Es un flujo que se identifica de forma común por la ocurrencia de saltos en grandes descargas, pero antes de producirse el flujo rasante, por lo general se puede observar este tipo de flujo en plantas de escalones inclinados.

Según investigaciones que se han realizado (Chanson, 2002) se comprobó que existe un rango de transición entre flujo Saltante y flujo Rasante, conocido como flujo Transitorio (TRA), y ocurre de la siguiente manera:

Flujo Saltante NAP Flujo Transitorio (TRA) Flujo Rasante (SKIMMING)

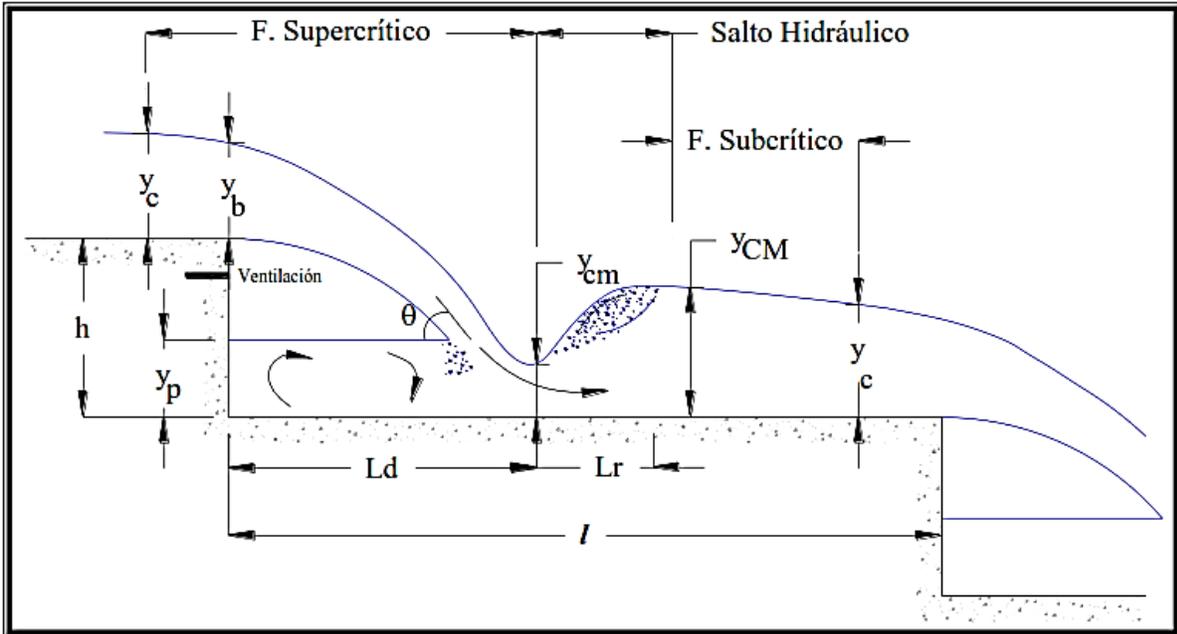


Figura N° 17. Flujo Saltante NA1 (Ricardi-2011).

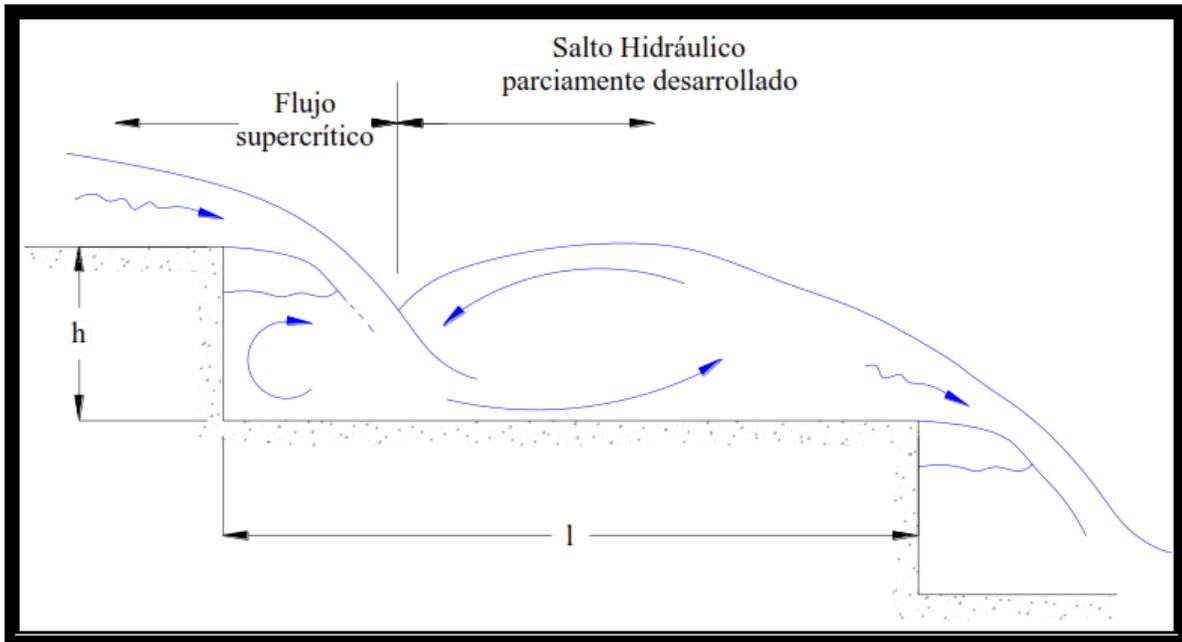


Figura N° 18. Flujo Saltante NA2 (Ricardi, 2011).

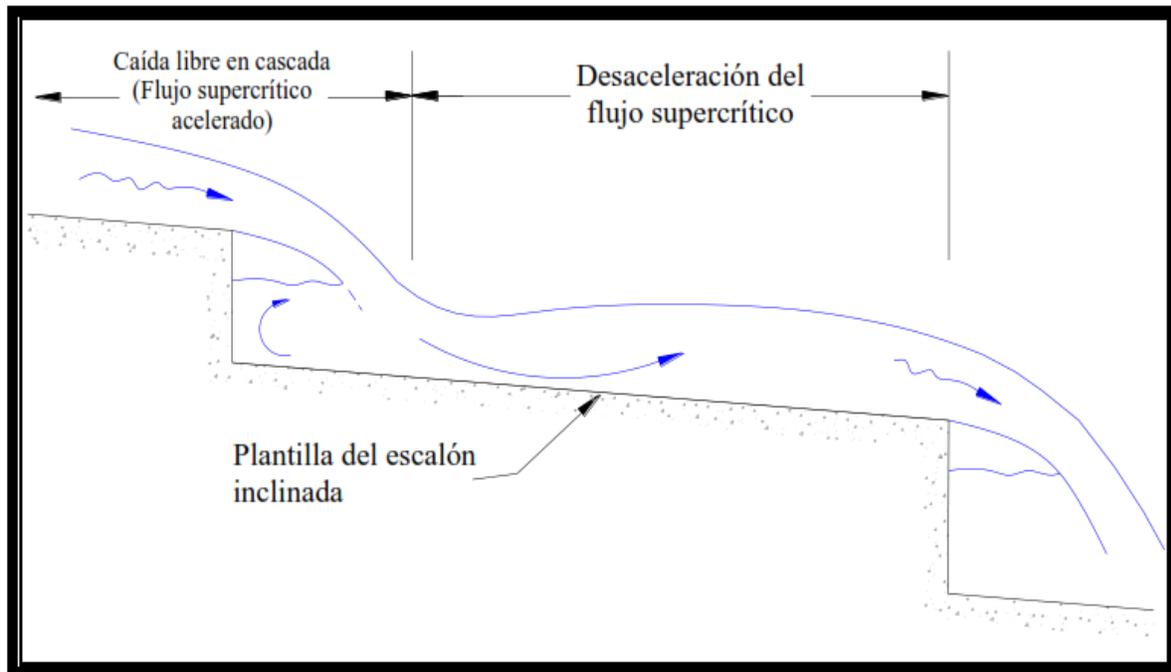


Figura N° 19. Flujo Saltante NA3 (Ricardi, 2011)

b. Régimen de Flujo Transitorio

En caudales intermedios se produce el flujo transitorio, este flujo se presenta con fuertes fluctuaciones hidrodinámicas y una apariencia confusa con una mayor aireación en el flujo y gran cantidad de atomización o “spray”, lo que causa que el cambio de las propiedades del flujo de una grada a otra, a pesar de algunos estudios que se han realizado por algunos investigadores es poca la información que se tiene sobre este tipo de flujo.

Según Chanson y Toombes (2004), este flujo se subdivide en flujo Transitorio con cavidades de aire de diversos tamaños debajo de la corriente principal del flujo (TRA1) y flujo transitorio donde dichas cavidades de aire alternan con vórtices de flujo recirculante (TRA2).

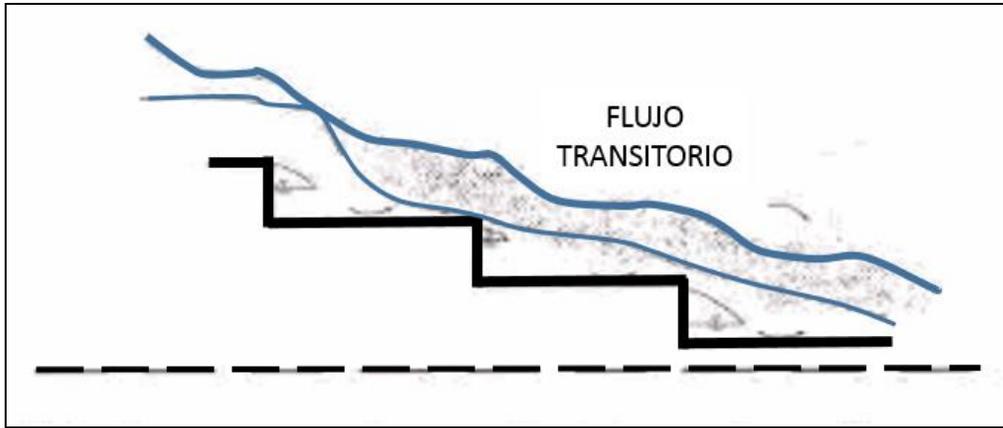


Figura N° 20. Flujo Transitorio.

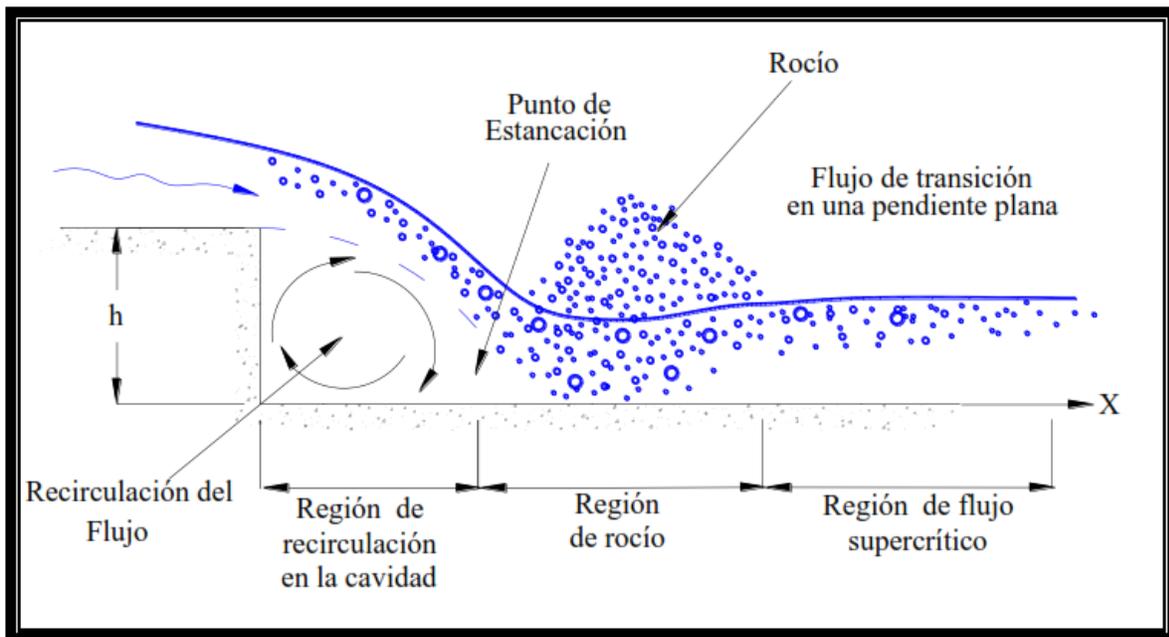


Figura N° 21. Flujo Transitorio (Ricardi, 2011)

c. Flujo Rasante (SKIMMING)

Para caudales mayores se presenta el flujo rasante, el cual se desliza de manera uniforme sobre el fondo formado por los vértices de las gradas, bajo la corriente del agua, en la concavidad de las gradas, se presentan remolinos de flujo recirculante, estos remolinos se originan debido la

transmisión del esfuerzo de corte con el flujo principal, esto influye altamente en la disipación de energía.

Según Chanson (1997) el flujo rasante lo subdividió en SK1 y SK2 para pendientes de ($5^\circ < \Theta < 22^\circ$), y SK3 para pendientes $\Theta > 22^\circ$.

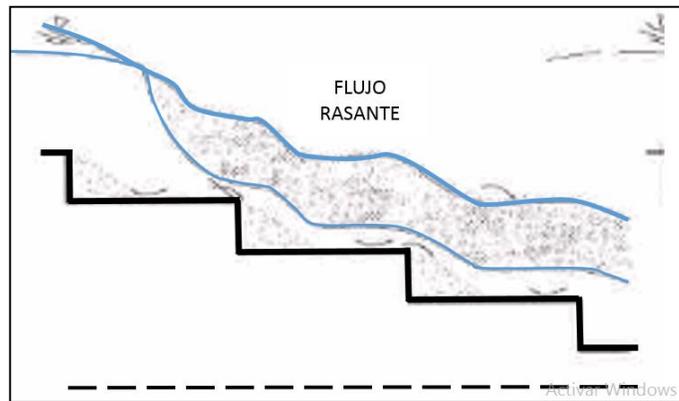


Figura N° 22. Flujo Rasante

c.1 Flujo Rasante (SK1)

Se produce en caudales bajos, con los vórtices recirculares que se concentran solo en la zona de aguas arriba de la huella del escalón; la corriente principal del flujo impacta aproximadamente en la mitad de la huella del escalón y escurre paralelo al escalón, provocando fricción entre el flujo y la huella.

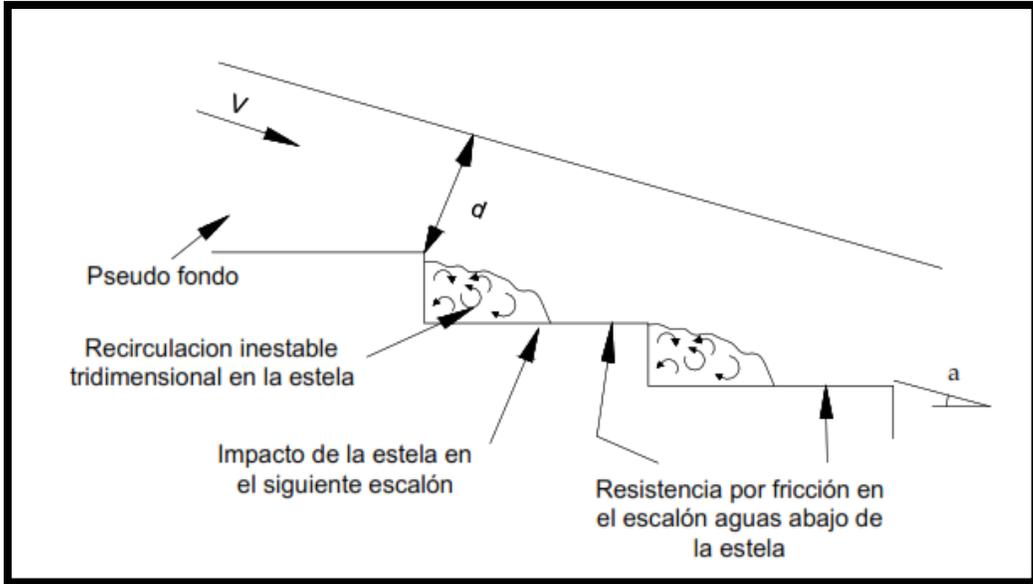


Figura N° 23. Flujo Rasante SK1. (Flores , 2015).

c.2 Flujo Rasante (SK2)

Se produce semejante al pseudofondo formado por los escalones, los vórtices que se presentan debajo del flujo se concentran en casi toda la longitud de la huella del escalón, interponiéndose en momentos con el siguiente vórtice aguas abajo.

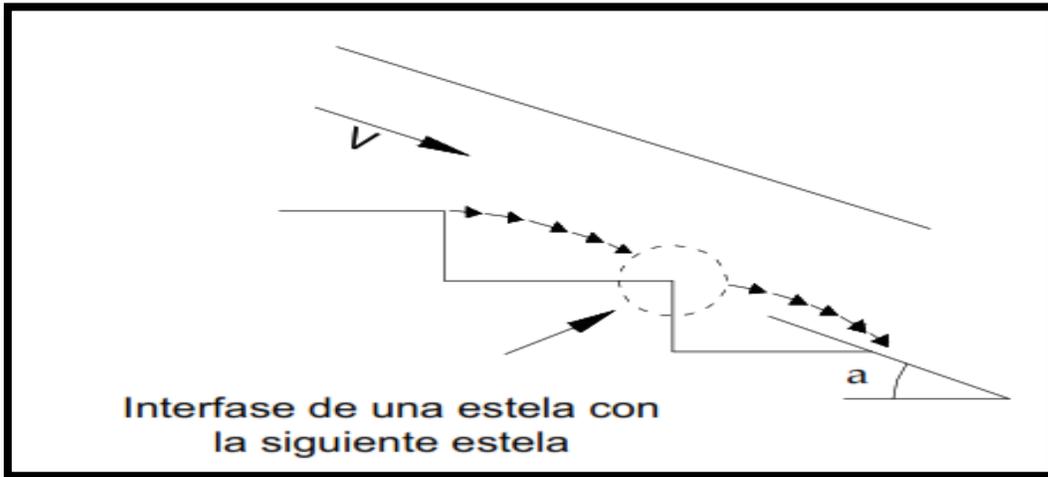


Figura N° 24. Flujo Rasante SK2. (Flores , 2015).

c.3 Flujo Rasante (SK3)

Se produce cuando la corriente también escurre semejante al pseudofondo, particularmente de la forma del escalón, pero en este tipo de flujo los vórtices recirculantes muestran un tamaño cuasi-estable.

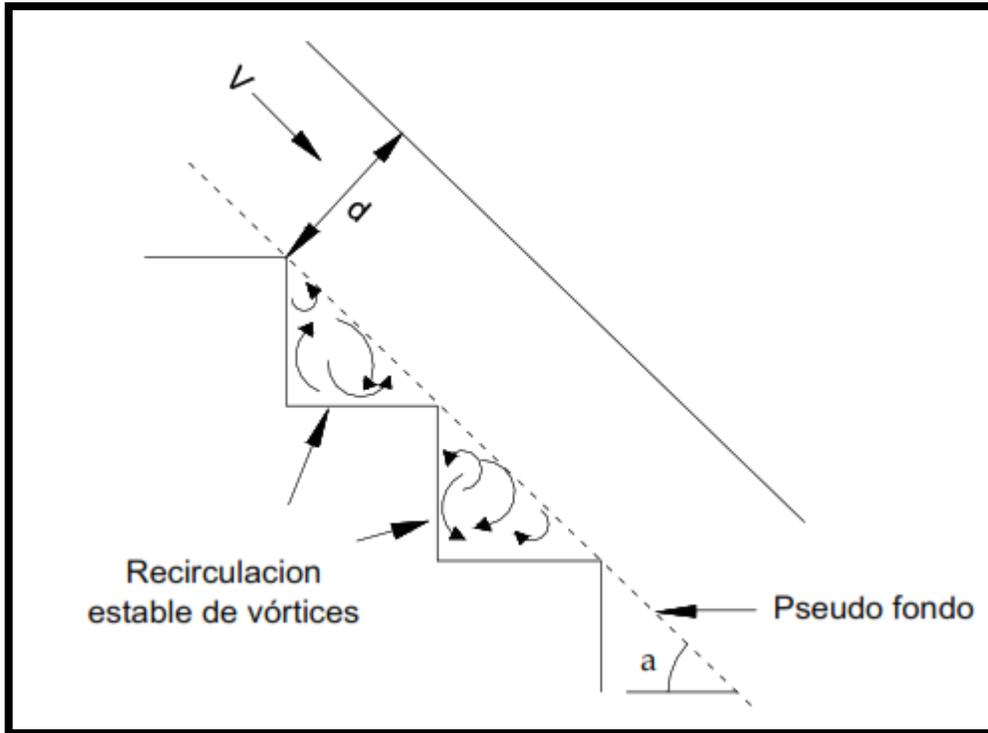


Figura N° 25. Flujo Rasante SK3. (Flores , 2015).

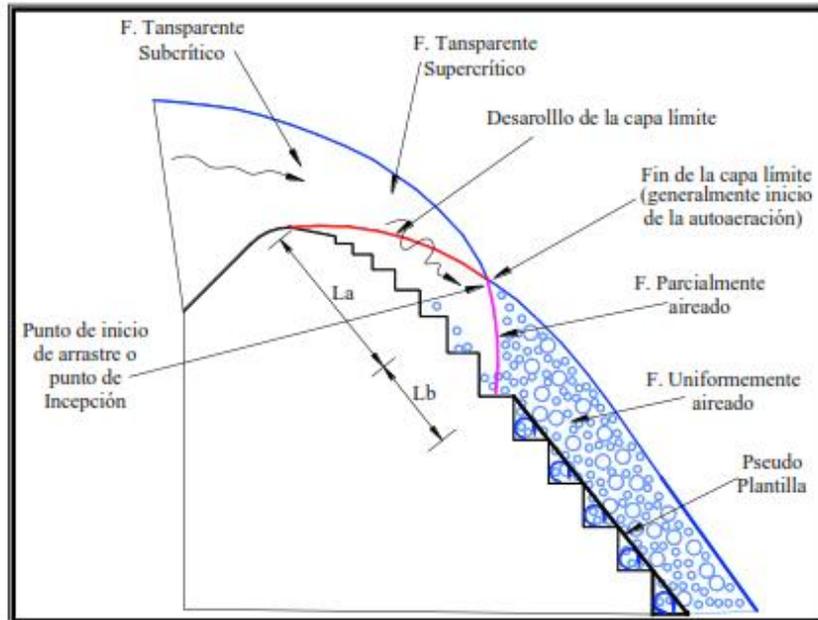


Figura N° 26. Flujo Rasante en Forma General (Ricardi, 2011).

1.3.2.1.3. Aireación y Pérdidas de Energía.

Para las estructuras en el cual la carga hidráulica a la que está sujeta el vertedor es baja, el coste del proyecto puede aumentar si se llegara a utilizar un vertedor tipo Creager o WES y hasta puede ser antirreglamentario, funcionando favorablemente una estructura escalonada con un flujo NAP.

Una de las características que no favorecen la utilización estructuras de excedencias de gran pendiente y altura es la erosión por efecto de cavitación de las superficies sometidas a altas velocidades del flujo que además puede mostrarse aguas debajo de cualquier obstáculo como los bloques de disminución de energía, variantes de dirección del flujo o por la rugosidad y el acabado de las paredes y superficies de la planta del canal de conducción. (Wood, 1991).

Un NAP, alcanza a producir un resalto hidráulico en el interior de la huella que sumado el impacto del chorro logran la reducción de energía de la carga hidráulica total.

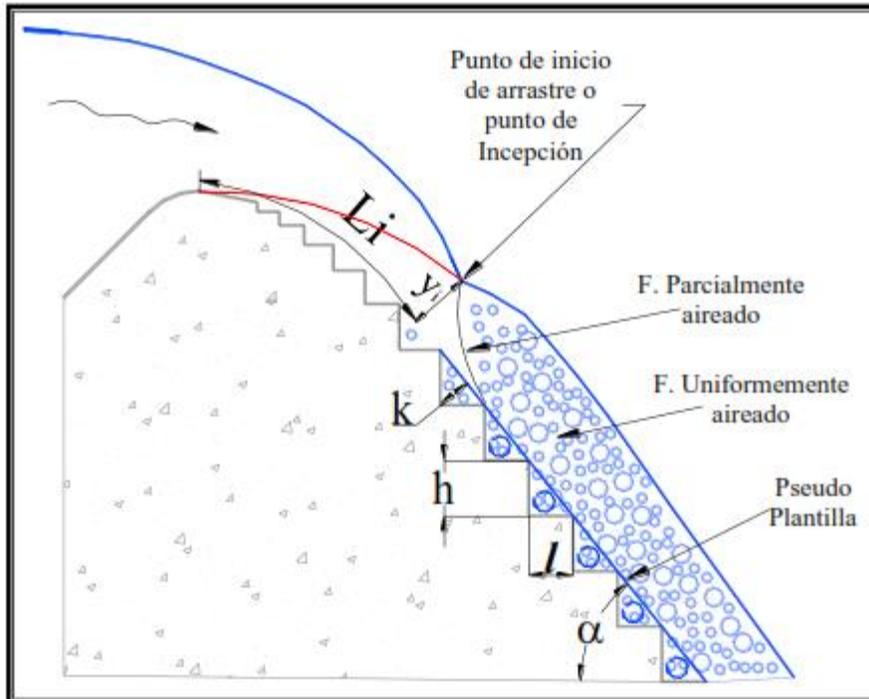


Figura N° 27. Localización del PI y características de la rápida (Ricardi, 2011)

1.3.2.1.3 Determinación del Tipo de Flujo en una Rápida Escalonada

La actividad de la aireación se puede presentar en el NAP y el SKIMMING, como se ha explicado anteriormente; en el NAP se manifiestan pequeñas descargas de agua, y se observa como una serie de caídas de agua en cada grada.

Si aumenta el caudal, el flujo pasa por una transición a un SKIMMING; Chanson (1994), determinó que el comienzo del flujo rasante se muestra cuando la cavidad de aire que se presenta bajo el chorro de los escalones desaparece, y este volumen es inundado por el flujo.

De otro modo, en relación a lo anterior, no se ha demostrado de forma trascendente el límite de desunión entre un NAP y un SKIMMING, determinándose por tanto un rango o zona en las que las variantes geométricas, irregularidades en los escalones y variaciones pequeñas del caudal pueden modificar el tipo de flujo y su funcionamiento; generalmente utilizan de forma común

los parámetros h , l , Θ , y_c (Altura de escalón, Huella de escalón, ángulo de inclinación de la rápida y Tirante crítico al inicio).

A continuación, se muestran algunas ecuaciones que establecen el tipo de flujo en una rápida escalonada.

Essery y Horner en 1971 (Rajaratnam, 1990), determinó que, para escalones horizontales, el inicio de un Skimming se encuentra cerca del límite de:

$$\frac{y_c}{h} = 0.8$$

Ecuación 5. Inicio de Flujo Rasante. (Essery y Horner, 1971).

Es decir, en el caso que se tenga un valor menor de 0.8 y se verifica que:

$$0.4 < \frac{h}{l} < 0.9$$

El flujo que se muestra es un NAP; por otra parte, si el tirante crítico entre la altura de escalón es mayor, entonces se presenta un Skimming.

Sorensen (Rajaratnam, 1990) en sus experimentos, establece que el flujo NAP se presenta para:

$$\frac{y_c}{h} = 0.16$$

Ecuación 6. Inicio de Flujo Saltante o NAP. (Rajaratnam, 1990).

Rajaratnam, 1990, determina la **Ecuación 7**, como frontera entre el NAP y el SKIMMING.

$$\frac{y_c}{h} > \frac{4}{5} \quad \text{para } \text{Tan}\alpha = \frac{h}{l} \quad 0.4 \leq \frac{h}{l} \leq 0.9$$

Ecuación 7. Límite Entre NAP y SKIMMING. (Rajaratnam, 1990).

Diez-Cascón, 1991, determina experimentalmente la **Ecuación 8** para la frontera de SKIMMING y NAP.

$$\frac{y_c}{h} = 0.9 \text{ para } \text{Tan}\alpha = \frac{h}{l} = 1.333$$

Ecuación 8. Límite entre SKIMMING y NAP). (Rajaratnam, 1991).

Degoutte 1992, desarrolla la **Ecuación 9 y 10** en vertedores escalonados construidos con gaviones, determinando el límite entre el NAP y el SKIMMING.

$$\frac{y_c}{h} = 0.74 \text{ para } \text{Tan}\alpha = \frac{h}{l} = 0.333$$

Ecuación 9. Límite ente NAP y SKIMMING para $h/l=0.333$. (Degoutte, 1992).

$$\frac{y_c}{h} = 0.62 \text{ para } \text{Tan}\alpha = \frac{h}{l} = 1.0$$

Ecuación 10. Límite ente NAP y SKIMMING para $h/l=1$. (Degoutte, 1992).

Chanson en 1994 establece experimentalmente la **Ecuación 11**, en la cual el SKIMMING ocurre para descargas mayores que el valor crítico definido como:

$$\frac{y_c}{h} = 1.057 - 0.465 \frac{h}{l} \quad \text{para } 0.2 < \frac{h}{l} < 1.3 \quad \dots \dots \dots 1.8$$

Ecuación 11. Límite de SKIMMING. (Chanson, 1994).

Ohtsu & Yasuda (1999), estudiaron las investigaciones obteniendo dos ecuaciones que pueden ser utilizadas para definir la frontera superior del régimen NAP y la frontera inferior del SKIMMING, estas son las **Ecuaciones 12 y 13**.

$$\frac{y_c}{h} = \frac{\left(1.43 - \frac{h}{l}\right)^{0.26}}{1.4} \quad \text{para } 0.1 \leq \frac{h}{l} \leq 1.43$$

Ecuación 12. Límite Superior entre NAP y SKIMMING. (Ohtsu & Yasuda, 1999).

$$\frac{y_c}{h} = 0.862 \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.165} \quad \text{para } 0.1 \leq \frac{h}{l} \leq 1.43$$

Ecuación 13. Límite Inferior entre NAP y SKIMMING. (Ohtsu & Yasuda, 1999).

Las investigaciones realizadas por Sánchez (2001), determina el cambio del NAP al SKIMMING con la **Ecuación 14**; válida para estructuras escalonadas con pendientes entre 11° a 52°

$$\frac{y_c}{h} = 0.983 - 0.171 \frac{h}{l} \quad \text{para } 0.2 \leq \frac{h}{l} \leq 1.28$$

Ecuación 14. Límite entre NAP y SKIMMING. (Sánchez, 2001).

Los estudios realizados por Chanson (2002) establece las siguientes ecuaciones, en la que precisa un flujo en transición (TRA), determinando las fronteras entre un NAP y un TRA, con la **Ecuación 15**, así como el límite de un TRA a un SKIMMING con la **Ecuación 16**.

$$\frac{y_c}{h} = 0.89 - 0.4 \frac{h}{l} \quad \text{para } 0.5 \leq \frac{h}{l} \leq 1.7$$

Ecuación 15. Límite ente NAP y TRA. (Chanson, 2002).

$$\frac{y_c}{h} = 1.2 - 0.325 \cdot \text{tg}\theta \quad \text{para } 0.5 \leq \text{tg}\theta \leq 1.7 \quad \dots \dots \dots 1.12$$

Ecuación 16. Límite ente TRA y SKIMMING. (Chanson, 2002).

Por último, Chanson & Toombes (2004) determinaron el límite superior e inferior para la ocurrencia del flujo transitorio.

Límite inferior para la ocurrencia del flujo transitorio TRA.

$$\frac{y_c}{h} > 0.9174 - 0.381 \cdot \frac{h}{l} \quad \text{para } 0 < \frac{h}{l} < 1.7$$

Ecuación 17. Límite ente NAP y TRA Chanson & Toombes (2004).

Límite superior para la ocurrencia del flujo transitorio TRA.

$$\frac{y_c}{h} < \frac{0.9821}{\left(\frac{h}{l} + 0.388\right)^{0.384}} \quad \text{para } 0 < \frac{h}{l} < 1.5$$

Ecuación 18. Límite ente TRA y SK Chanson & Toombes (2004).

La ocurrencia de cualquier tipo de flujo depende del caudal de operación y de las características geométricas de los escalones, con los resultados de las investigaciones de Chanson (2002), Yasuda (2001) y Ohtsu (2004) se ha logrado plasmar la siguiente gráfica la cual relaciona la altura h del escalón con el tirante crítico y_c (h/y_c) y las dimensiones de los escalones (h/l). La siguiente gráfica es de gran ayuda para estimar el tipo de flujo en canales escalonados.

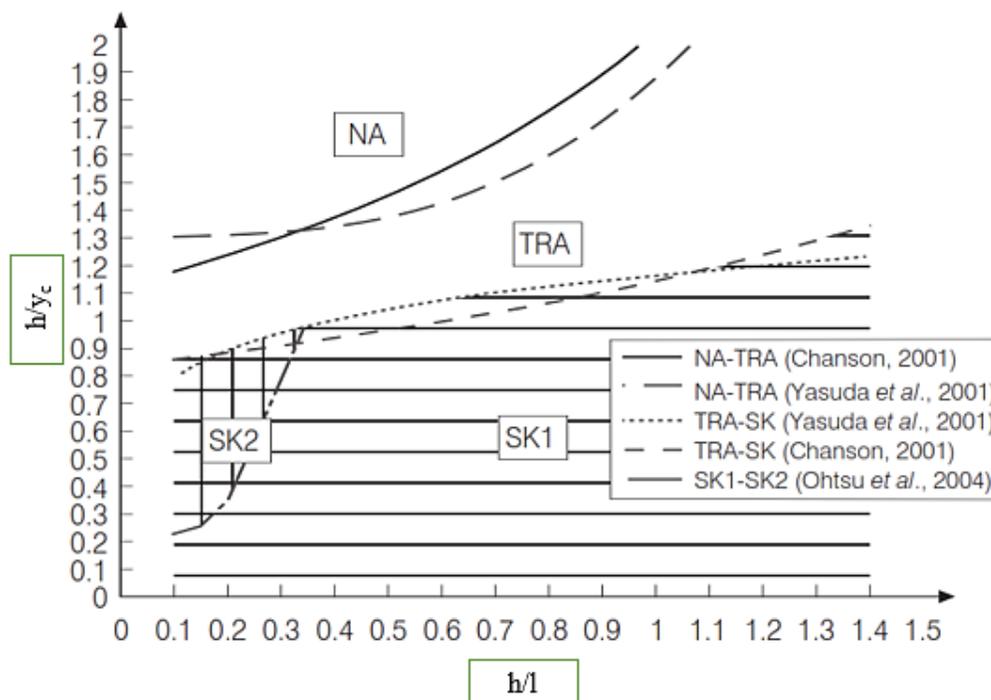


Figura N° 28. Criterios de cambio de régimen en vertedores. (Chanson & Gonzáles, 2004).

La siguiente tabla también es de gran ayuda para clasificar el subtipo de flujo Saltante, teniendo como dato la relación tirante crítico y altura de escalón y_c/h con altura y longitud de escalón h/l .

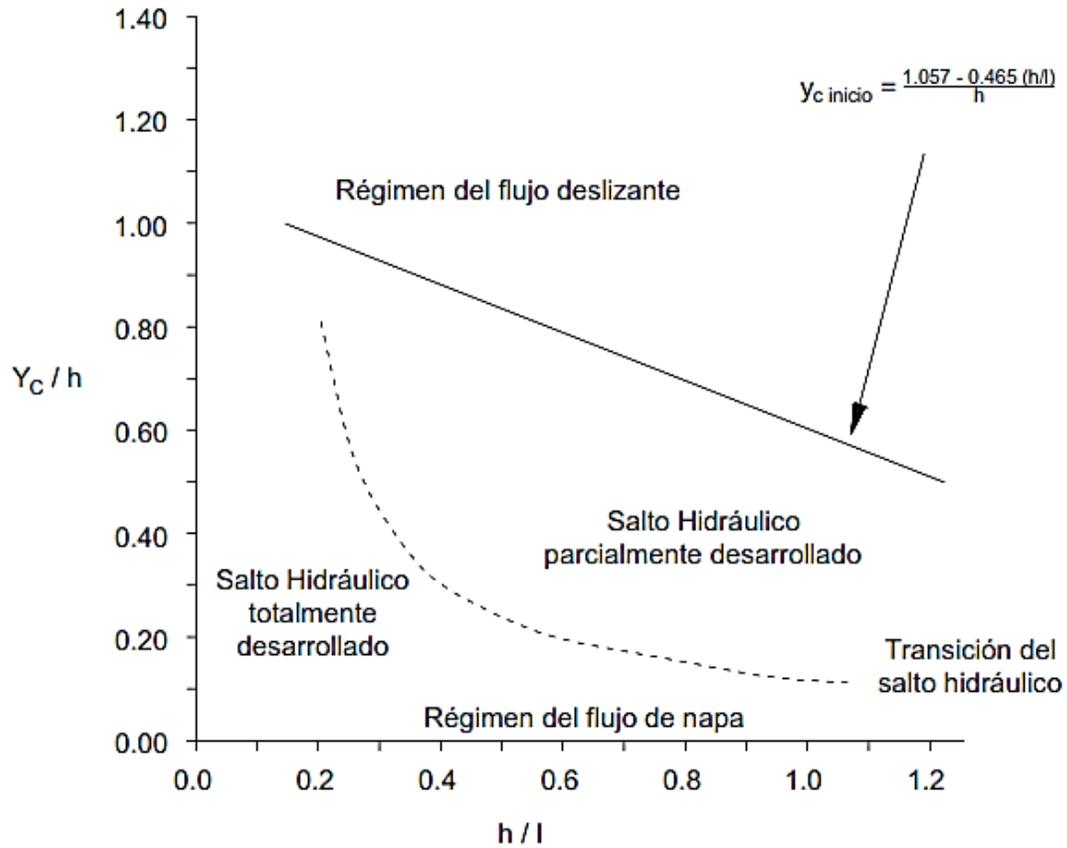


Figura N° 29. Predicción de los flujos (Chanson, 1994).

1.3.2.1.4 Teorías del Flujo Rasante

En este régimen el flujo circula por los vértices de la grada, semejante a la esquina de la línea formada con los contrapasos. Puede decirse, como se puede inferir que, dicho perfil se considera como el fondo del canal, es decir, en un nuevo pseudofondo. El flujo ubicado entre el pseudofondo y la planta real del canal, queda entonces disipado por la recirculación del flujo, lo que hace que se generen dichos vórtices. En este tipo de flujos, la generación de flujo turbulento en el fondo del canal hace que se produzca la disminución de la energía (Chanson, 1996). Los vórtices se producen en una zona triangular que abarca desde la huella a la altura del escalón, rotando en un flujo aireado.

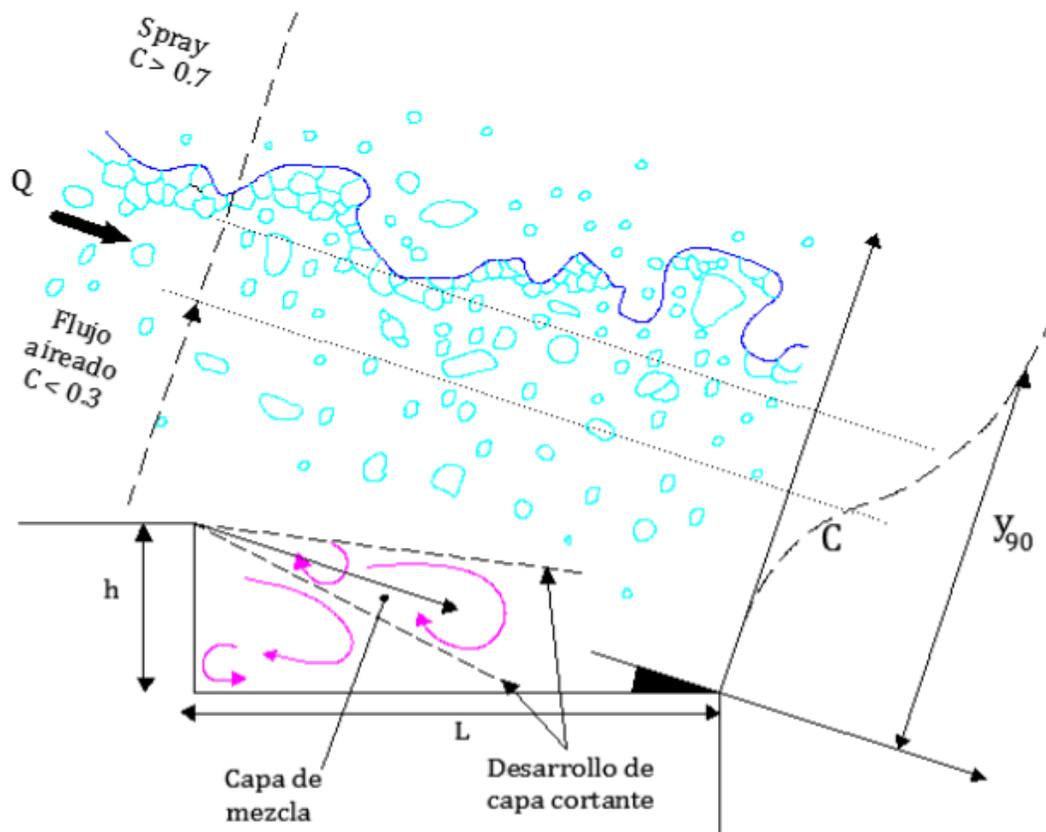


Figura N° 30. Esquema de Flujo Rasante. (Rosado Castillo, 2017)

Al generarse el flujo rasante, al inicio del tramo del canal no se produce ingreso de aire, pero en la planta del canal existe turbulencias en el flujo o vórtices recirculantes. Cuando el margen de la capa límite turbulenta logra llegar al nivel de la superficie libre, se genera el arrastre de aire hacia la superficie libre. Este arrastre de aire produce un flujo bifásico turbulento, que se ve reflejado por una concentración de aire en el agua.

La congregación de aire en el agua se considera como la masa de aire no disuelto retenido en una masa de agua. De acuerdo con Chanson (1994), la concentración media del aire se expresa como:

$$\bar{C} = \frac{1}{Y_{90}} \int_0^{Y_{90}} C \, dy$$

Ecuación 19. Concentración de Aire.

El tirante característico d se calcula de la siguiente manera

$$d = \int_0^{Y_{90}} (1 - C) \, dy = (1 - \bar{C}) y_{90}$$

Ecuación 20. Tirante Característico.

Una vez calculado el tirante característico, la velocidad media V se calcula con la ecuación de continuidad.

$$\bar{V} = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{b \cdot d}$$

Ecuación 21. Velocidad Media.

La variedad del flujo sobre los canales de perfil escalonado depende del gasto y de la conformación o geometría de los escalones.

Ohtsu al. (2004) estableció a partir de una serie de ensayos en un grupo amplio de canales escalonados con diferentes pendientes ($5.7^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$) y alturas de escalones (h), que existen algunas variaciones en los perfiles del flujo en canales escalonados bajo el régimen de flujo rasante, en el cual por su comportamiento se clasifica en dos tipos, un Tipo A, para el cual un flujo semi uniforme se desarrolla a lo largo de todo el canal, independiente de la altura relativa h/y_c y un tipo B, en el cual, se puede distinguir que no se presenta un flujo uniforme totalmente desarrollado en los bordes de los escalones, sino que se muestra un flujo cuasi paralelo en la planta del canal (Rosado Castillo, 2017). **Figura N° 31.**

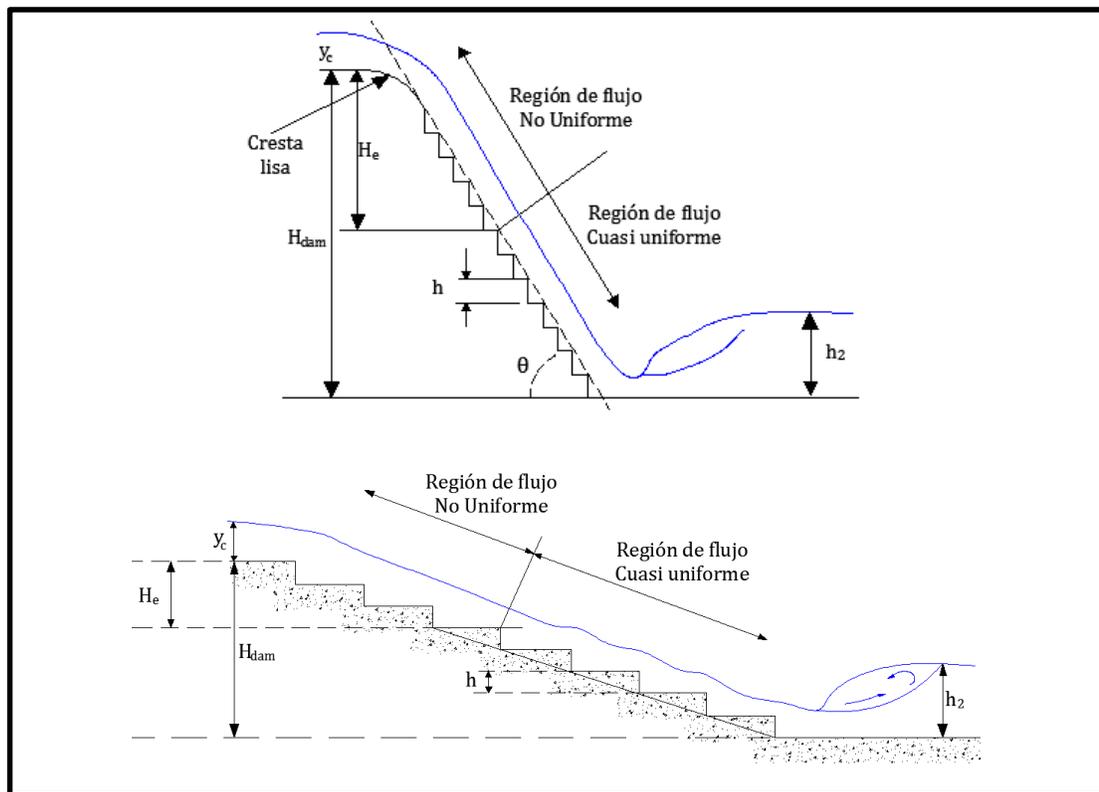


Figura N° 31 Identificación de región no uniforme y cuasi uniforme, según Ohtsu al. (2004), a) $\theta > 19^\circ$

Ohtsu investigó que en canales de perfil escalonado con pendiente entre, $19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$, se presenta un flujo tipo A, pero en canales con pendiente entre $5.7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ$, se pueden presentar las dos condiciones de flujo, tipo A y tipo B. En la **Figura N° 32** se presenta de manera gráfica los diferentes tipos de flujos rasantes que se pueden producir en canales de perfil escalonado.

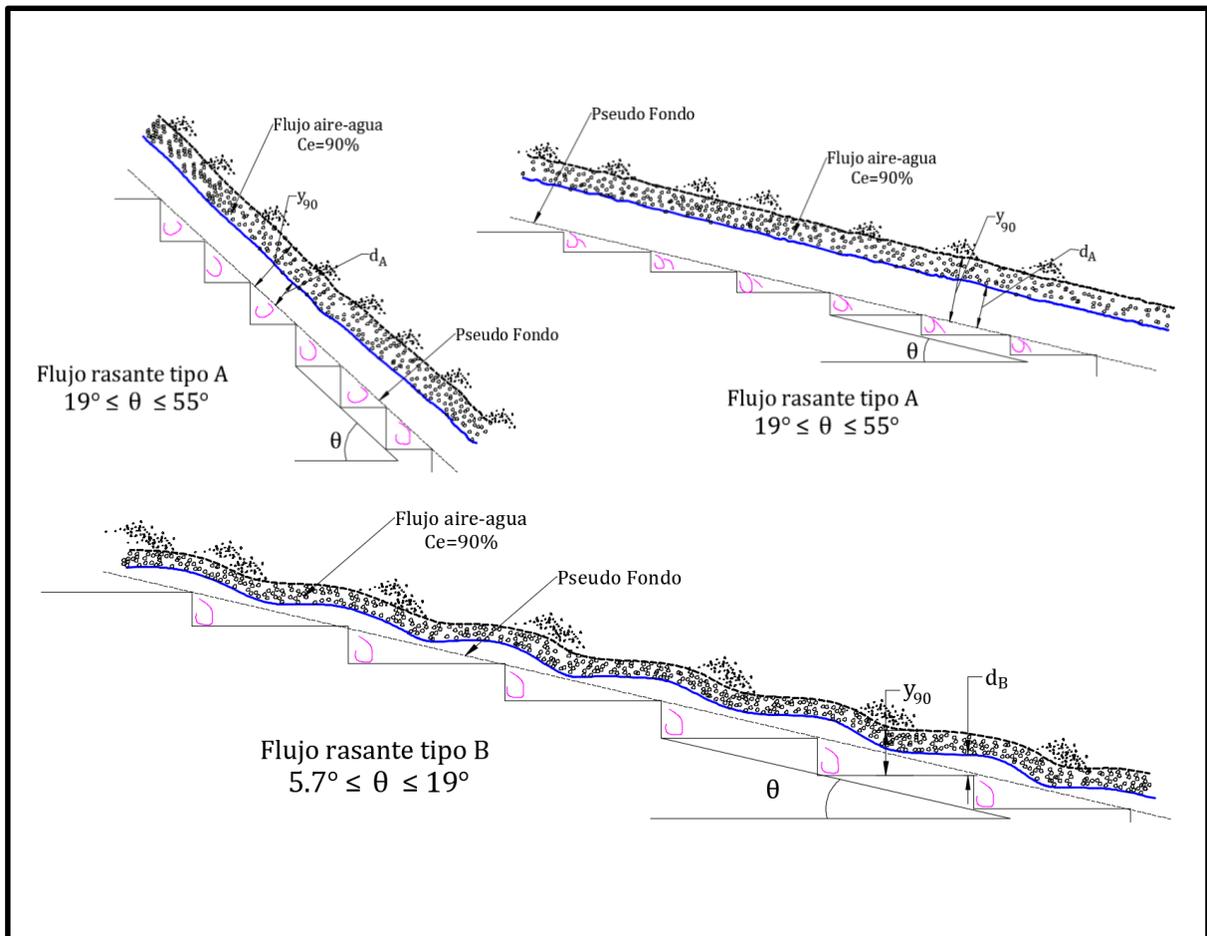


Figura N° 32. Esquema de tipos de flujos rasantes Ohtsu et al. (2004).

1.3.2.1.4.1 Concentración media del aire.

Chanson (1994) realizó una investigación en base a resultados conseguidos por Straub & Anderson (1958) y Aivazyán (1986) estableció que la concentración media de aire es autónoma de la descarga, de la rugosidad relativa, y del tirante del flujo, y que al mismo tiempo éste era una función de la pendiente del canal.

Según Chanson (1994) en canales de perfil escalonado con pendientes hasta 50°, la concentración media del aire puede ser aproximada como:

$$\bar{C} = 0.9 \sin \theta$$

Ecuación 22. Concentración Media de Aire. (Chanson, 1994).

Para canales con pendientes mayores de 50°, la concentración media del aire podrá ser interpolada de la Tabla 3-1(Chanson, 1994).

Tabla 3. Valores de concentración media del aire para diferentes pendientes (Straub & Anderson, 1958).

Pendiente θ (°)	Concentración Media de Aire \bar{C}
0.0	0
7.5	0.161
15	0.241
22.5	0.31
30.0	0.41
37.5	0.5669
45.0	0.622
60.0	0.68
75.0	0.72

(Matos, 1999) determinó que la concentración media del aire en canales escalonados está asociada con la pendiente mediante la siguiente ecuación.

$$\bar{C} = 0.76(\sin \theta)^{0.82}$$

Ecuación 23. Concentración Media de Aire. (Matos, 1999).

Según (Ohtsu, 2004) en el flujo rasante completamente desarrollado la concentración media del aire depende del ángulo del canal (θ), y adicionalmente, de la altura relativa (h/y_c) y puede ser expresado con la siguiente ecuación:

$$\bar{C} = D - 0.3 \cdot e^{\left(-5 \cdot \left(\frac{h}{y_c}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{h}{y_c}\right)\right)}$$

Ecuación 24. Concentración Media de Aire. (Ohtsu, 2004).

$$D_1 = 0.30 \quad (R^2 = 0.692) \quad \rightarrow \quad \text{para } 5.7^\circ < \theta < 19^\circ$$

$$D_2 = -0.00024 \cdot \theta^2 + 0.0214 \cdot \theta - 0.0357$$

$$(R^2 = 0.743) \rightarrow \text{para } \theta \geq 19^\circ \text{ y } 0.1 \leq h/y_c \text{ } (h/y_c)_s$$

$$(h/y_c)_s = \frac{7}{6} (\tan \theta)^{1/6}$$

Ecuación 25. Altura Relativa. (Ohtsu, 2004))

1.3.2.1.4.2 Punto de ingreso de aire para la formación del flujo rasante (“Punto de Incepción”)

En el régimen de flujo rasante existe un ingreso de aire a lo largo del canal. El inicio de aireación o ingreso del aire se fija en la región donde la capa límite turbulenta o capa viscosa, llega a la superficie libre, atrapando una cantidad de aire disuelto.

González & Chanson (2007) determinaron que, en el inicio de la región de aireación, la turbulencia es tan elevada que se rompe la tensión superficial y la fuerza de flotación de las burbujas, ingresando hacia aguas abajo del punto de aireación el aire atrapado. Luego de atrapar dicho aire, el flujo tiende a uniformizarse manteniendo las condiciones hacia aguas abajo del canal, constantes o en equilibrio.

La definición del punto de ingreso de aire en canales escalonados, es un parámetro relevante en el diseño de este tipo de canales, ya que éste, está directamente asociada con el fenómeno de cavitación en canales, la reducción de la energía y determinación de los tirantes en los flujos (Wu et al., 2013). En la región no aireada, el flujo actúa como un flujo gradualmente variado. (Rosado Cantillo, 2017).

La incógnita más interesante en el principio de la aireación en canales escalonados es el gasto, por otra parte, la pendiente y la altura del escalón (macro-rugosidad) también tienen una influencia significativa (Estrella, 2013).

El punto de inicio de aireación se ha fijado dentro del vertedor de dos maneras:

La primera determina una longitud desde el punto más elevado del cimacio, realizando un desplazamiento sobre la curvatura y la rápida hasta la fijación del ingreso de aire o punto de inicio (Esta es la manera tradicional de fijación de puntos en un vertedor) **Figura N° 33**.

La segunda manera (Mateos, 1999), determina el criterio para ubicar la cota en la que inicia la aireación, siendo ésta, la longitud vertical desde el punto más elevado del barraje hasta el punto medio del escalón, en el cual las burbujas de aire se mantienen estables en el interior del mismo **(Figura N° 34)**.

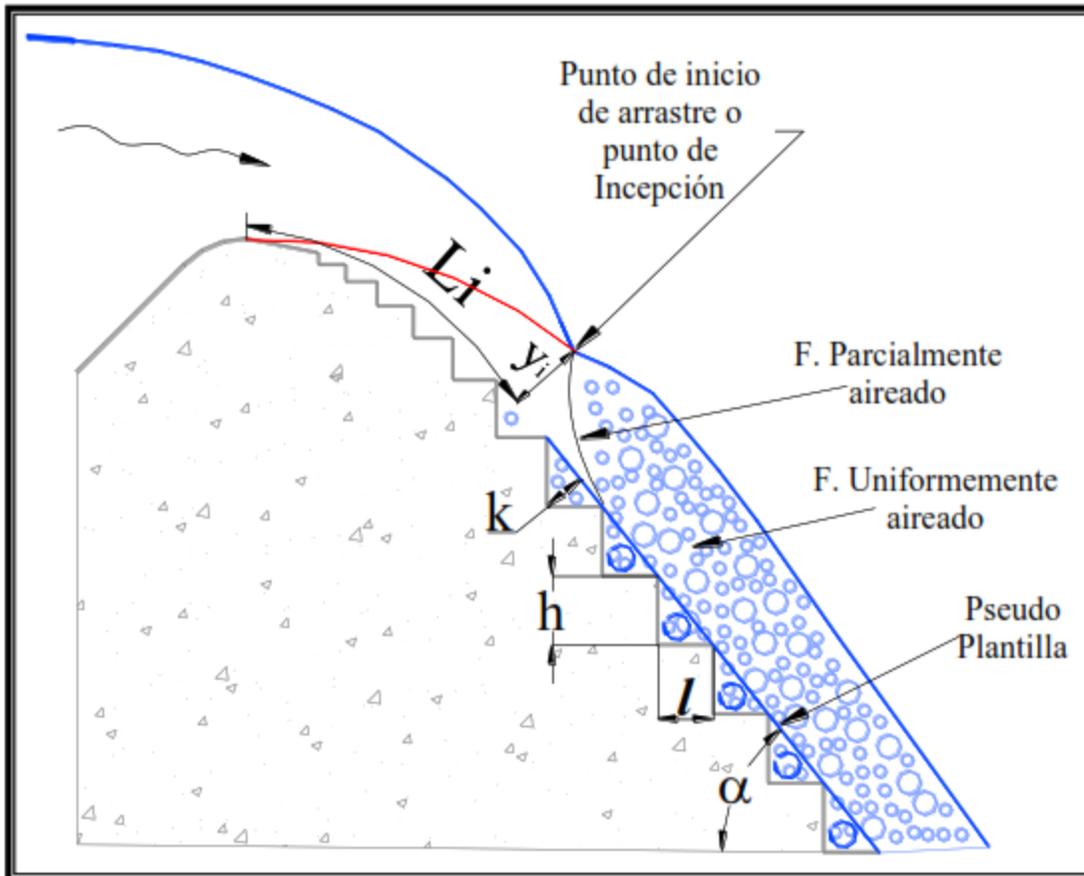


Figura N° 33. Localización del PI y características de la rápida. (Matos 1999).

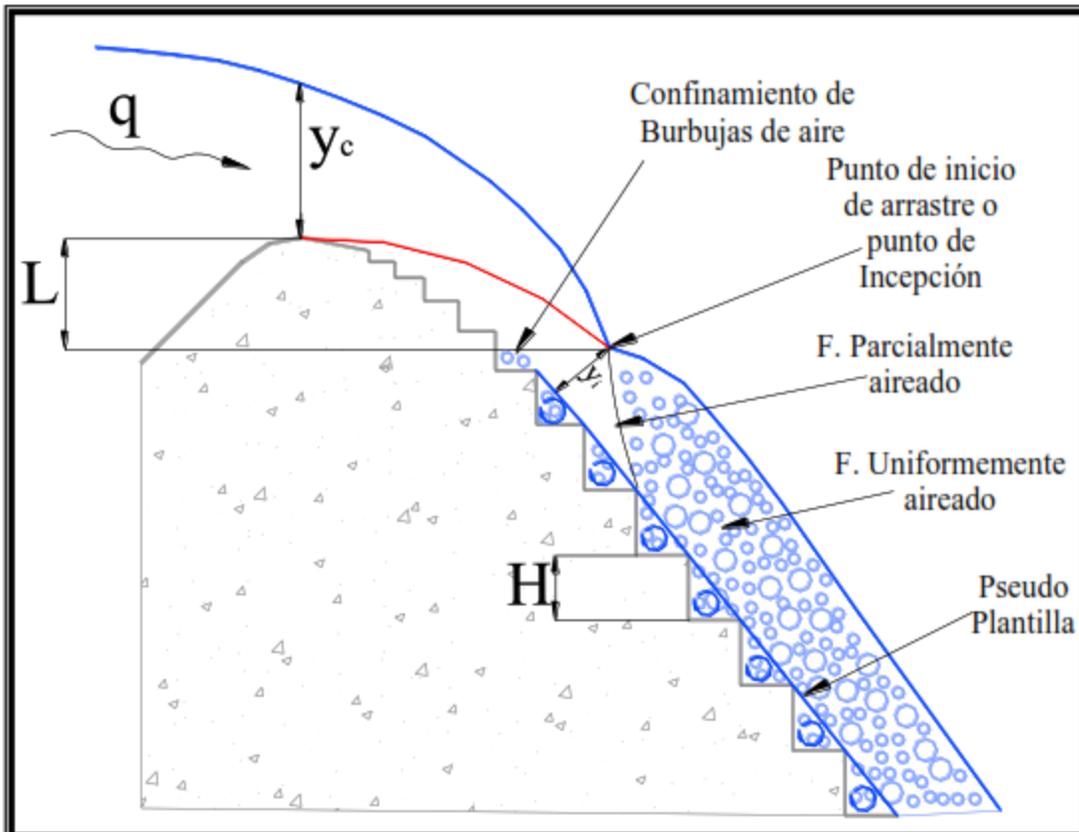


Figura N° 34. Localización del punto de Inicio (Matos 1999).

(Wood, 1983) realizó un estudio de regresión múltiple con resultados conseguidos experimentalmente y analíticamente por Keller y Rastogi (1977) derivó una ecuación para el cálculo directo del hito del principio de la aireación, en un canal de pendiente uniforme, tomando en cuenta la expresión de capa límite viscosa (**Ecuación 26**).

$$\frac{l}{K_s} = 13.6 \cdot (\sin \theta)^{0.0796} \cdot F^{*0.713}$$

Ecuación 26. Capa Límite Viscosa. Wood.

Chanson & Toombes (2002) elaboraron un estudio estadístico de varios experimentos sobre canales escalonados, con el propósito de definir el principio de la aireación asociado al número de Froude rugoso y disminución de energía; las pendientes de los canales comprendían un rango de entre 16° y 53°. Los datos estudiados fueron extraídos de las investigaciones elaboradas por medio de modelos y prototipos de Haddad (1998), Sorensen (1985), Beitz & Lawless (1992),

Bindo, et. al (1993), Frizell (1992), Essery & Horner (1978), Tozzi (1992), Chamani & Rajaratnam (2001), entre otros. (Rosado Cantillo, 2017).

$$F^* = \frac{q}{\sqrt{g \cdot \sin \theta \cdot (h \cos \theta)^3}} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot \sin \theta \cdot (h \cos \theta)}}$$

Ecuación 27. Número de Froude Rugoso

Con los análisis realizados Chanson & Toombes (2002) establecieron que para ángulos (θ) entre 15.9° y 22° , y $F^* < 3.8$, con la siguiente ecuación se obtiene buenos resultados.

$$\frac{Li}{h \cos \theta} = \frac{12.34}{(\sin \theta)^{0.0796}} \cdot F^{*0.465}$$

Ecuación 28. Capa Límite Viscosa, Chanson & Toombes

En canales escalonados con $F^* > 2$, la anterior ecuación no tiene buena aproximación, para esta condición de valores, la ecuación mostrada por Chanson (1995) predice el comportamiento real del flujo de mejor manera (**Ecuación 29**).

$$\frac{Li}{h \cos \theta} = \frac{19.72}{(\sin \theta)^{0.0796}} \cdot F^{*0.713}$$

Ecuación 29. Capa Límite Viscosa, (Chanson, 1995.)

Chanson (2002) cotejó los datos recibidos de prototipos y determinó las siguientes ecuaciones para ubicar el punto de principio de la región de aireación:

$$\frac{Li}{h \cos \theta} = 9.719 (\sin \theta)^{0.0796} \cdot F^{*0.713}$$

Ecuación 30. Capa Límite Viscosa. (Chanson, 2002)

$$\frac{d_i}{h \cdot \cos \theta} = \frac{0.4034}{(\sin \theta)^{0.04}} \cdot (F^*)^{0.592}$$

Ecuación 31. Tirante en el Punto de Inicio de Aireación. (Chanson, 2002)

(Meireles, 2012) Determinó las siguientes ecuaciones para calcular la distancia del principio de aireación y el tirante inicial.

$$\frac{Li}{K_s} = 6.75 F^{*0.76}$$

Ecuación 32. Longitud de Inicio de Aireación. (Meireles, 2012)

$$\frac{d_i}{K_s} = 6.35 F^{*0.59}$$

Ecuación 33. Tirante en el Punto de Inicio de Aireación. (Meireles, 2012)

(Ohtsu, 2004) estableció que el punto de principio de aireación se orienta a mantenerse para algunos valores de ángulos (θ) si la altura relativa del escalón h/y_c es mayor que 0.5. (Rosado Cantillo, 2017).

Para $5.7^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$ y $0.1 \leq h/y_c \leq (h/y_c)_s$

$$\frac{H_e}{y_c} = \frac{\left[5.7 + 6.7e^{\left(-6.5 \cdot \frac{h}{y_c}\right)} \right]}{(-1.21 \cdot 10^{-5} \theta^3 + 1.60 \cdot 10^{-3} \cdot \theta^2 - 7.13 \cdot 10^{-2} \cdot \theta + 1.30)}$$

Ecuación 34. Relación de Energía Total y Tirante Crítico. (Ohtsu, 2004).

1.3.2.1.4.3 Resistencia al Flujo.

En vertedores de fondo plano, la mayor parte de la disipación de energía se debe a la fricción entre flujo y la planta del canal. En vertedores escalonados hay otros mecanismos que elevan la fricción (vórtices recirculantes bajo de la corriente principal e intercambios de momentum entre ésta y la capa límite que se genera aguas abajo de cada vértice). En canales escalonados con pendiente baja, la combinación de estos mecanismos incrementa mucho más la resistencia al flujo. Esta investigación muestra factores de fricción experimentales para vertedores escalonados con pendientes de 16 y 22°. Y más aún sus limitaciones en flujos bifásicos turbulentos, la fórmula de Darcy-Weisbach se usó para calcular los factores de fricción experimentales debido a su uso común en el diseño de estructuras hidráulicas. (Chanson, 2002)

1.3.2.1.4.4 Pérdida de Energía en Flujo Rasante.

En la región estable de un flujo rasante totalmente desarrollado, la teoría de momentum demuestra que la fricción se opone a la componente en la dirección del flujo del peso del volumen del fluido. Por lo que para los cálculos del Flujo Rasante se considera un factor de Fricción f y mediante estudios experimentales se obtuvo resultados para valores del Factor de Fricción Experimental f_m los cuales fueron comparados con una gruesa aproximación que ajustó 188 datos experimentales medidos en modelos de laboratorio con pendientes bajas a moderadas (Chanson, 2002).

Estas investigaciones obtuvieron la **Ecuación 35**:

$$\frac{1}{\sqrt{f_m}} = 2.43 - 0.2676 \cdot \ln\left(\frac{h \cos \theta}{DH}\right)$$

Ecuación 35. Factor de Fricción. (Chanson, 2002)

Donde:

Fm= Factor de Fricción Experimental.

DH= Diámetro Hidráulico.

De la cual se despeja fm:

$$fm = \left(\frac{1}{2.43 - 0.2676 \cdot \ln \left(\frac{h \cdot \cos \theta}{DH} \right)} \right)^2$$

Ecuación 36. Ecuación despejada de Factor de Fricción. (Chanson, 2002)

1.3.2.1.4.5 Tirante Característico del Flujo Rasante.

Boes & Hager (2003) obtuvieron algunas ecuaciones para calcular el Tirante Característico del flujo uniforme (Rasante) asociado al número de Froude rugoso y normalizado por medio de la altura del escalón **Ecuación 37**.

$$Si \quad 30^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$$

$$\frac{d}{h} = 0.23 F^{*0.65}$$

Ecuación 37. Tirante Característico. (Boes y Hager, 2003).

De otra manera relacionando el tirante Crítico (y_c) y el ángulo θ del canal puede ser calculado con la siguiente ecuación.

$$\frac{d}{y_c} = 0.215 \cdot (\sin \theta)^{-1/3}$$

Ecuación 38. Tirante Característico con relación al Tirante Crítico.

En el caso de que el canal es lo bastante largo como para que el flujo logre tener características de estabilidad (Flujo Uniforme), el calado característico del flujo se determina como:

$$d = y_c \cdot \sqrt[3]{\frac{fe}{8 \cdot \sin \theta}}$$

Ecuación 39. Tirante Característico. (Chanson, 2002)

donde f_e es el valor experimental del Factor de Fricción de Darcy correspondiente al flujo aire-agua, el cual es inversamente proporcional a la concentración media de aire en el flujo (\bar{C}) y se calcula como:

$$\frac{f_e}{f_m} = 0.5 \cdot \left(1 + \tanh \left(2.5 \cdot \frac{0.5 - \bar{C}}{\bar{C} \cdot (1 - \bar{C})} \right) \right)$$

Ecuación 40. Factor de Fricción de Darcy. (Chanson, 2002).

La Concentración Media de Aire \bar{C} se puede calcular con la **Ecuación 19**. Gonzales y Chanson, 2002. Propusieron que una vez que el calado característico de flujo se conoce, se determina la velocidad U_w (ecuación 43), y_{90} (ecuación 20), el bordo libre B.L. = $0.4 \cdot y_{90}$ y la altura de pared $h_w = 1.4 \cdot y_{90}$.

En el caso contrario que el canal no es lo bastante largo como para que el flujo logre características de equilibrio, el calado característico del flujo se deduce integrando la ecuación de la energía, donde la pendiente de fricción S_f para canales anchos rectangulares se calcula como:

$$S_f = -\frac{\partial H}{\partial x} = \sqrt{\frac{f_e}{8}} \cdot \frac{q_w^2}{g \cdot d^3}$$

Ecuación 41. Pendiente de Fricción.

En la cual H es la energía total del flujo y x es la distancia a lo largo de la planta del canal desde la cresta hasta la región de flujo gradualmente variado.

Diversos autores han procurado de utilizar este criterio para determinar el calado de flujo característico y los factores de fricción de flujo, vulnerando diversos conceptos básicos, ya que esta ecuación es efectiva solamente para flujos totalmente desarrollados. Se debe mencionar que este criterio es complicado y no cumple para todos los casos. (Chanson, 2002).

De otra forma puede emplearse para el diseño inicial de vertedores escalonados, donde el flujo no logra las características de estabilidad (González, 2005).

Este método se fundamenta en la combinación de datos experimentales en flujos en desarrollo (aguas arriba del punto de ingreso de aire) y flujos con características en equilibrio. (Chanson, 2002).

$$\text{Para } 7 < \frac{H_{m\acute{a}x}}{y_c} < 20$$

$$\frac{U_w}{V_{m\acute{a}x}} = 0.00107 \cdot \left(\frac{H_{m\acute{a}x}}{y_c}\right)^2 - 0.0634 \cdot \left(\frac{H_{m\acute{a}x}}{y_c}\right) + 1.202$$

Ecuación 42. Velocidad Adimensional.

En el cual $H_{m\acute{a}x}$ es la energía total aguas arriba del embalse y $V_{m\acute{a}x}$ es la velocidad de flujo ideal al pie del vertedor.

$$\text{Para } \frac{H_{m\acute{a}x}}{d_c} > 20$$

Cuando el rango anterior supera el valor de 20 la Velocidad Media U_w se calcula con la Ecuación de Continuidad.

$$U_w = V = \frac{Q}{A}$$

Ecuación 43. Ecuación de Continuidad.

Una vez que la velocidad adimensional $U_w/V_{m\acute{a}x}$ se conoce, la velocidad U_w y el calado bajo el vertedor (d) puede determinarse utilizando un práctico procedimiento iterativo, en el cual se asume inicialmente que la velocidad ideal de flujo $V_{m\acute{a}x}$ es similar a la velocidad máxima al pie del vertedor.

$$V_{m\acute{a}x} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{m\acute{a}x}}$$

Ecuación 44. Velocidad Máxima Asumida al Pie del Vertedor.

Obteniendo U_w , el tirante (d) se determina utilizando la ecuación de continuidad y luego se calcula el valor real de la velocidad ideal de flujo por medio de la ecuación de Bernoulli:

$$V_{m\acute{a}x} = \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_{m\acute{a}x} - d \cdot \cos \theta)}$$

Ecuación 45. Velocidad Ideal Real de flujo.

Una vez que se obtuvo la velocidad ideal de flujo $V_{m\acute{a}x}$, se obtiene el valor final de U_w usando nuevamente la **Ecuación 42**. Para finalizar se recalcula el calado característico de flujo (d) con la ecuación de continuidad. Este ciclo se repite hasta obtener valores de las velocidades y tirantes al pie del vertedor que converjan.

Cuando ya se obtiene el Tirante Característico (d), se calcula y_{90} con la **Ecuación 20**, el borde libre B.L. = $0.4 \cdot y_{90}$ y la altura de pared $h_w = 1.4 \cdot y_{90}$. En vertedores escalonados, trabajando con flujo rasante, el factor de fricción puede asumirse como $f_e = 0.2$.

Dadas las mismas condiciones de ángulo θ del canal el tirante del flujo bifásico también puede ser calculado con la siguiente ecuación.

$$y_{90} = 0.50 \cdot F^{(0.1 \cdot \tan \theta) + 0.5}$$

Ecuación 46. Tirante correspondiente a un 90% de Concentración de Aire.

Boes & Hager (2003), además concluyeron que para algunas descargas relativas yc/h , tanto d , como y_{90} , disminuye con un aumento del ángulo del canal.

1.3.2.1.4.5 Altura Máxima de Escalón.

En flujos rasantes, la capacidad del vertedor aumenta y la resistencia al flujo disminuye al reducir la altura de escalón (Chanson, 1995). En tal caso extremo, cuando las gradas son muy pequeñas, éstas demuestran una rugosidad muy baja o depreciable para el flujo, y las reducciones de energía se disminuyen severamente. Entonces hay que asegurarse de que el caudal adimensional yc/h elegido sea menor que el máximo yc/h para el cual los escalones dejan de representar una superficie rugosa. Utilizando fundamentos de resultados experimentales en

canales de roca con elevadas rugosidades, se sugiere una máxima altura de escalón. (Chanson, 1995)

$$h \leq 15 \cdot y_c \cdot \cos \theta$$

Ecuación 47. Altura Máxima de Escalón.

1.3.2.1.5 Metodología de diseño para Flujo Rasante

(González y Chanson, 2007), expusieron un procedimiento para el diseño de canales escalonados de pendiente moderada utilizando dos modelos experimentales y una recolección de varios datos experimentales. El procedimiento estuvo centrado en calcular la eficiencia en la reducción de la energía en canales escalonados utilizados en presas de baja altura y con una pendiente entre 16° y 22° . Dichos investigadores demostraron que, a la fecha de la investigación, solo existían dos procedimientos para diseñar canales escalonados, reductores de energía una Ohtsu et al. (2004) y otra de Chanson (2002), las cuales habían sido verificadas en canales de alta pendiente $> 30^\circ$. (Rosado Castillo, 2017).

Este método propuesto por González & Chanson (2007) para el diseño de canales escalonados sujetos al régimen de flujo rasante tiene el siguiente procedimiento:

- A. Calcular el gasto de diseño, escoger el ancho del canal (B), medir la altura de la presa (H_{dam}) y seleccionar la pendiente del canal (S_o).
- B. Determinar el tirante crítico del flujo (y_c) sobre la cresta del vertedero y calcular la relación h/y_c .

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Qe^2}{B^2 * g}}$$

Ecuación 48. Tirante Crítico.

- C. Asegurar las características de flujo rasante con la **Ecuación 16**.

$$\frac{y_c}{h} > 1.2 - 0.325 \cdot \text{tg} \Theta$$

D. Ubicar el punto de ingreso de aire o “Punto de Incepción” (**Li, di**) con la **Ecuación 30** y **Ecuación 31**.

E. Asegurar que la rugosidad equivalente sea relevante con la **Ecuación 47**.

$$h \leq 15 \cdot Yc \cdot \cos \theta$$

F. Determinar si se producirá un flujo rasante completamente desarrollado o un flujo gradualmente variado, si:

$$\frac{yc}{h} < \frac{1}{0.1193 \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta^{0.259} \cdot \frac{L^{0.935}}{h \cdot \cos \theta}}$$

Ecuación 49. Condición para Flujo Rasante Completamente Desarrollado.
se producirá un flujo Rasante completamente desarrollado.

determine la concentración media del aire, usando la aproximación de Ohtsu et al. (2004)

Ecuación 24.

Determine el factor de fricción de un canal de pendiente plana (sin escalones), usando la **Ecuación 42**.

Determine el factor de fricción para el canal escalonado **Ecuación 49**.

Determine la altura media del flujo **Ecuación 39**.

Determine la velocidad media del flujo

Si $\frac{yc}{h} > \frac{1}{0.1193 \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta^{0.259} \cdot \frac{L^{0.935}}{h \cdot \cos \theta}}$ el flujo se encuentra en la región

gradualmente variado.

Calcule la relación $\frac{U_w}{V_{m\acute{a}x}}$, con la **Ecuación 42** y **Ecuación 45**.

A partir de la ecuación de continuidad determine la altura media **Ecuación 19**.

Determine la concentración media del aire **Ecuación 24**, asuma $f = 0.2$.

Determine el tirante y_{90} , de la **Ecuación 20**.

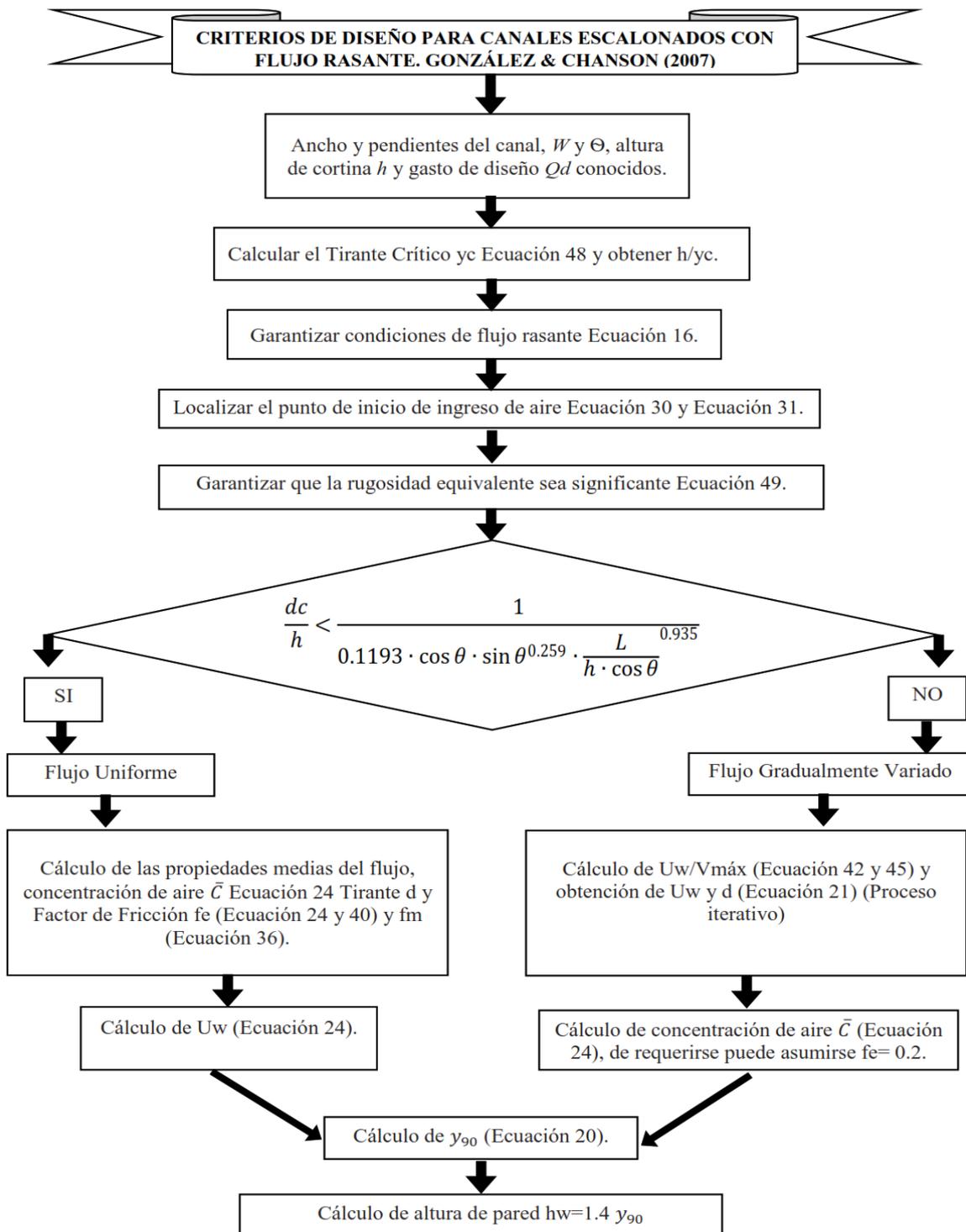
Determinar la altura de pared como:

$$h_w = 1.4 \cdot y_{90}$$

Ecuación 50. Altura de Pared del Canal.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo establecido por González & Chanson (2007), para determinar las particularidades del flujo rasante en canales escalonados.

Tabla 4. Criterios de Diseño para Canales Escalonados con Flujo Rasante. Gonzáles & Chanson (2007).



1.3.2.1.6 Teorías del Flujo Saltante (NAP).

Un flujo en régimen saltante se reconoce por mostrar caídas libres del flujo, que impactan progresivamente sobre la planta del canal, grada a grada, Chanson (1994). El flujo sale de una grada con una superficie libre determinada, y cae en la siguiente grada; si este flujo, al caer, logra quedar sobre los límites de la huella del canal, se genera un salto hidráulico parcial o totalmente desarrollado, Amador (2005). En caso contrario el flujo iniciará a caer de forma asimétrica o confusa sobre las gradas, llegando, en algunas ocasiones, a no chocar con el escalón más próximo.

1.3.2.1.6.1 Flujo Saltante con Resalto Hidráulico Completamente Desarrollado (NAP1).

En este régimen o subtipo de flujo saltante denominado también como flujo saltante con resalto hidráulico completamente desarrollado (NAP1) se presenta cuando operan gastos bajos o en ocasiones en donde la pendiente del canal (h/l) es pequeña.

Instantáneamente luego de la caída, evoluciona un flujo de altas velocidades en régimen supercrítico, y aguas abajo, en razón de la pendiente del escalón, se muestra un flujo subcrítico, por lo cual se forma un salto hidráulico, como resultado de la transición de un flujo en régimen supercrítico y un flujo en régimen subcrítico. Posteriormente de que el flujo logra el tirante mayor o también denominado tirante conjugado mayor y_2 (flujo subcrítico), y exactamente antes de aproximarse a la arista exterior de la grada, el flujo pasa por el tirante crítico como se puede observar en la siguiente figura.

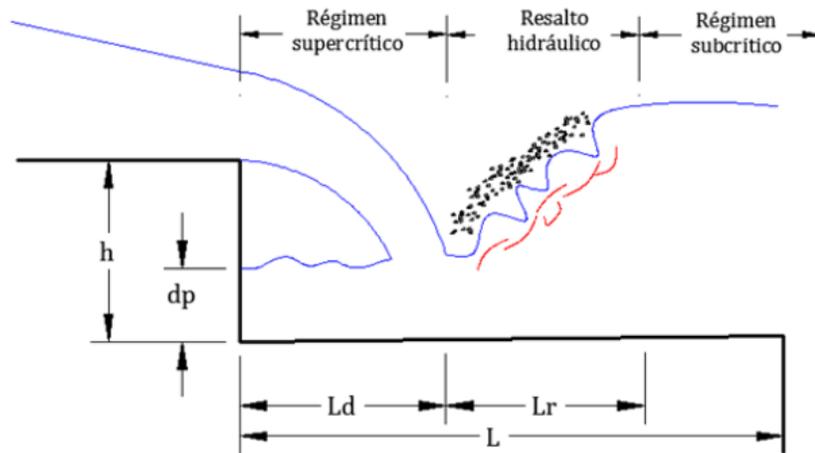


Figura N° 35. Flujo saltante con resalto completamente desarrollado (Ricardi, 2011).

El salto hidráulico se produce con fuertes pulsaciones y como si el flujo ingresara en efervescencia, evidencia indiscutible de la inclusión del aire. Al ingresar el agua en una región de velocidades menores (flujo subcrítico), se disminuye la velocidad del flujo por consecuencia de la resistencia debida a la fricción, por lo cual se genera el aumento repentino del tirante. Durante esta secuencia se genera una disminución de carga o pérdida de energía, que se disipa en forma de calor. Marbello (2006).

De esta manera, se puede asegurar que el flujo saltante, con salto hidráulico completamente desarrollado, se generará si la huella del escalón o longitud es mayor que la distancia de caída del chorro, más la longitud del resalto hidráulico.

Empleando las ecuaciones del curso dirección que sigue el chorro y tomando en consideración los principios de cantidad de movimiento, Chanson (2000) estableció unas ecuaciones para determinar el comportamiento del flujo saltante, con resalto completamente desarrollado y parcialmente desarrollado. En la siguiente imagen, se tiene un esquema con los parámetros principales del flujo, desarrollados en flujos de tipo saltante.

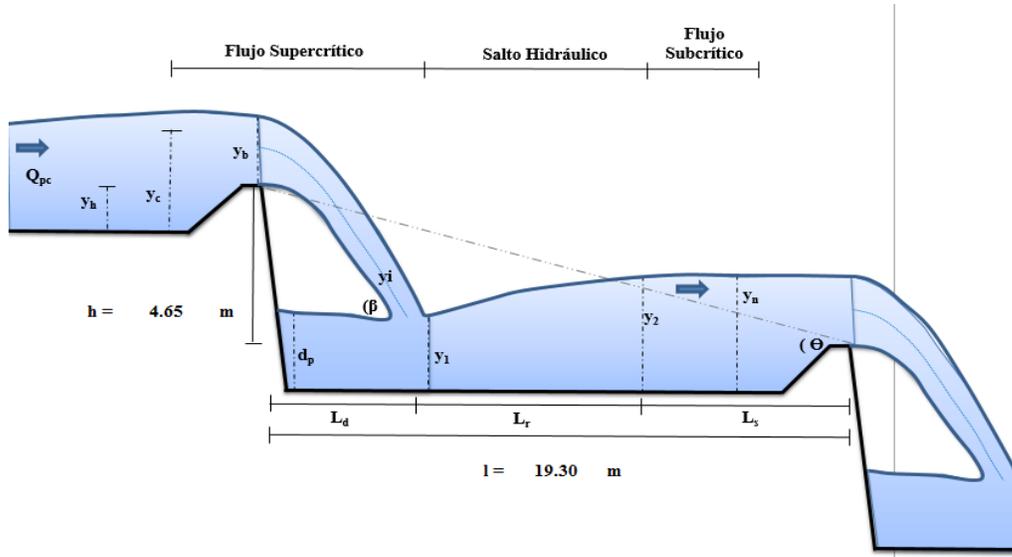


Figura N° 36. Parámetros básicos del flujo en régimen saltante.

$$\frac{y_1}{h} = 0.54 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{1.275}$$

Ecuación 51. Profundidad conjugada menor (y_1).

$$\frac{y_2}{h} = 1.66 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{0.81}$$

Ecuación 52. Profundidad conjugada mayor (y_2).

$$\frac{d_p}{h} = \left(\frac{y_c}{h} \right)^{0.66}$$

Ecuación 53. Profundidad del flujo aguas arriba del chorro en caída (d_p).

$$\frac{L_d}{h} = 4.30 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{0.81}$$

Ecuación 54. Distancia de impacto del chorro (L_d).

$$\frac{y_i}{h} = 0.687 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{1.483}$$

Ecuación 55. Espesor del chorro en caída libre (y_i).

$$\tan(\beta) = 0.838 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{-0.586}$$

Ecuación 56. Ángulo de inclinación del chorro (β).

$$\frac{L_r}{y_1} = 8 \left[1.5 - \left(\frac{y_c}{h}\right)^{1.5} \right]$$

Ecuación 57. Longitud del resalto hidráulico (L_r).

$$y_b = 0.715 \cdot y_c$$

Ecuación 58. Tirante en el borde del escalón (y_b).

Se tiene en consideración que las anteriores ecuaciones a los flujos saltantes se han empleado, sin tener en consideraciones las limitaciones. Chanson (1996), manifiesta que estas ecuaciones son aproximadas solamente pueden ser utilizadas siempre y cuando el flujo de aproximación sea subcrítico, caso contrario se deben de utilizar otras teorías.

1.3.2.1.6.2 Flujo Saltante con Resalto Hidráulico Parcialmente Desarrollado (NAP2).

Al elevar el gasto o la longitud del escalón es muy pequeña, el resalto hidráulico no logrará desarrollarse por completo. El flujo, antes de que se genere el salto, descenderá sobre la siguiente grada. Esta clase de comportamiento del flujo, se define como resalto hidráulico parcialmente desarrollado. Dado el caso, para calcular el tirante conjugado mayor del salto hidráulico, será necesario definir el perfil general del flujo gradualmente variado. (Ricardi, 2011).

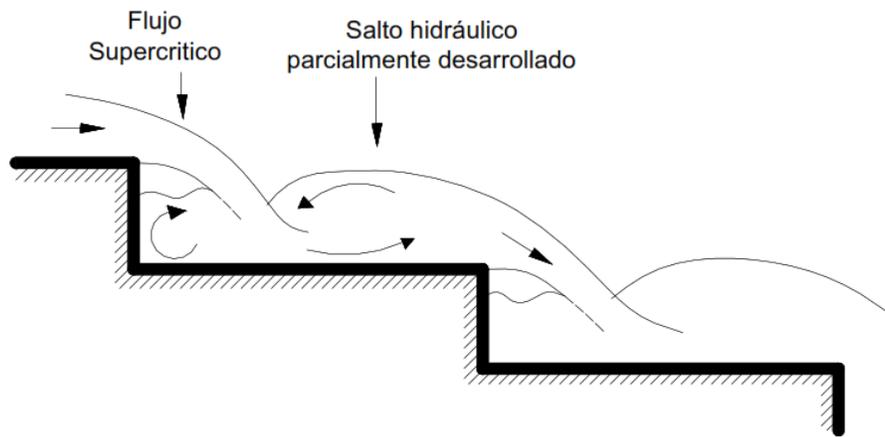


Figura N° 37. Flujo saltante con resalto hidráulico parcialmente desarrollado (NAP2). (Flores, 2015)

1.3.2.1.6.3 Flujo Saltante Sin Resalto Hidráulico (NAP3).

Una tercera condición del subtipo de flujo saltante se genera cuando el flujo no llega a alcanzar a salir del régimen de flujo supercrítico ($F > 1$), y no se genera el resalto hidráulico. Para que se produzca esta condición, debe aumentar el caudal o incrementar la pendiente; el flujo que se genere sobre el escalón siempre será supercrítico, la reducción de la energía solamente será por efecto de los impactos del flujo contra la huella de los escalones.

Las características del flujo saltante sin resalto hidráulico NAP3, no se pueden prever con ninguna especie de cálculos analíticos convencionales (Amador, 2005).

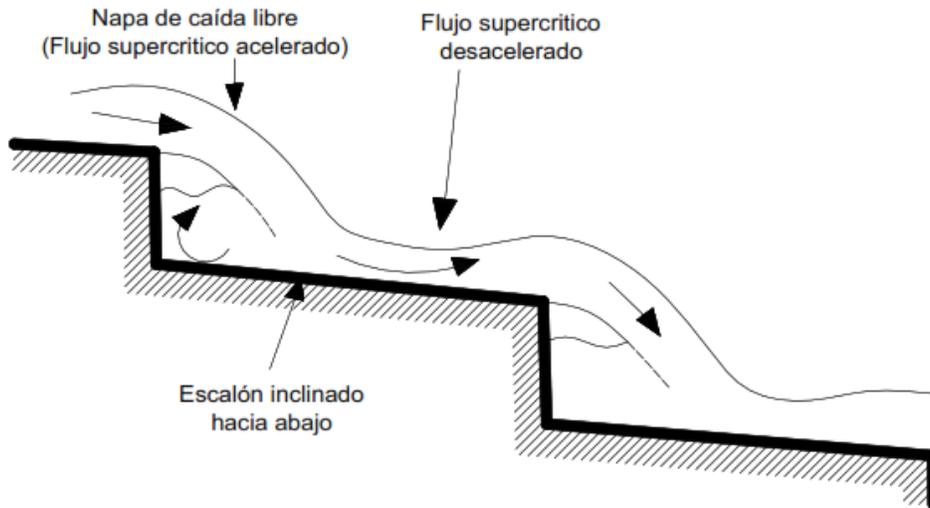


Figura N° 38. Flujo saltante sin resalto hidráulico (NAP3). (Flores, 2015).

Tomando en cuenta la física de un objeto en caída y en movimiento, cuando un elemento es arrojado con una velocidad inicial horizontal, este genera dos clases de movimientos, uno de manera rectilínea en dirección horizontal, con aceleración nula y otro en la dirección vertical con aceleración igual a la gravedad, esta dirección que toma el elemento se constituye en un tiro parabólico. Este tipo de comportamiento desarrollados en objetos en caídas, también se produce en el agua; en un flujo saltante la velocidad del flujo en el borde del escalón se muestra en sentido horizontal, una vez el flujo deja el escalón, la aceleración horizontal del chorro toma valor cero y se produce un flujo con aceleración vertical, relacionado a los efectos de la gravedad (Rajaratnam & Chamani, 1996).

Para un objeto en caída libre el recorrido horizontal, puede ser definido por medio del producto de la velocidad de salida del objeto por el tiempo que toma el elemento en alcanzar el suelo (ecuaciones de tiro parabólico) (Ricardi, 2011).

Las expresiones que determinan un flujo en caída o saltante para una línea de corriente son:

$$X = v_b \cdot t_c$$

Ecuación 59. Ecuación del Movimiento Parabólico.

$$y = h + \frac{y_b}{2} - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t_c^2$$

Ecuación 60. Ecuación de una Línea de Flujo en Corriente.

Donde $X = L_d$ y cuando $y = 0$

sabiendo que:

$$t_c = \frac{L_d}{V_b}$$

Ecuación 61. Tiempo despejando Ecuación de Movimiento parabólico.

$$h + \frac{y_b}{2} = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

Ecuación 62. Ecuación de una Línea de Flujo en Corriente Con $y=0$.

Reemplazando la **Ecuación 61** en la **Ecuación 62**, resulta:

$$(2h + y_b) \cdot \frac{V_b^2}{g} = L_d^2$$

Ecuación 63. Primera Aproximación de Distancia de Impacto.

Ecuación de continuidad:

$$q^2 = V_b^2 * y_b^2$$

$$\frac{q^2}{y_b^2} = V_b^2$$

Ecuación 64. Ecuación de Continuidad.

Reemplazando la **Ecuación 64** en la **Ecuación 63**, resulta:

$$(2h + y_b) \cdot \frac{q^2}{g \cdot y_b^2} = L_d^2$$

Ecuación 65. Segunda Aproximación de Distancia de Impacto.

Tirante crítico

$$y_c^3 = \frac{q^2}{g}$$

Ecuación de Tirante crítico

Reemplazando **Ecuación de Tirante Crítico** en **Ecuación 66**, queda:

$$L_d^2 = (2h + y_b) * \frac{y_c^3}{y_b^2}$$

Ecuación 66. Tercera Aproximación de Distancia de Impacto.

Dividiendo por h, se obtiene que:

$$\frac{L_d}{h} = \left(\frac{y_c}{h}\right)^{3/2} \cdot \sqrt{\frac{h}{y_b} \cdot \left(1 + 2 \frac{h}{y_b}\right)}$$

Ecuación 67. Distancia de Impacto del Chorro.

Según Rajaratnam & Chamani (1996), la velocidad del flujo una vez choca con la masa de agua almacenada en la huella, puede ser determinada de la siguiente forma:

$$\frac{V_{DI}}{V_c} = \sqrt{\left(\frac{y_c}{y_b}\right)^2 + 2 \frac{h + \frac{y_b}{2} - d_p}{y_c}}$$

Ecuación 68. Ecuación de Distancia de Impacto del Chorro.

$$\tan \beta = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{d_p}{y_c}} \cdot \sqrt{\frac{h + \frac{y_b}{2} - d_p}{y_c}}$$

Ecuación 69. Ángulo de Inclinación de Chorro.

Para calcular el tirante del flujo en la capa aireada se puede emplear las siguientes ecuaciones:

$$\frac{d_p}{y_c} = \sqrt{\frac{1 + 2(1 - \cos \beta) \left(\frac{V_{DI}}{V_c}\right)^3}{\frac{V_{DI}}{V}}}$$

Ecuación 70. Profundidad de Flujo en la Capa Aireada.

$$\frac{y_1}{y_c} = \frac{\sqrt{2}}{\frac{1}{\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{h}{y_c} + \frac{3}{2}}}$$

Ecuación 71. Tirante Conjugado Menor.

Renna & Fratino (2010) a partir de un estudio experimental recomiendan una metodología para calcular los parámetros de un flujo saltante supercrítico, indiferente al tipo del flujo de aproximación (subcrítico o supercrítico). El proceso plantea un método iterativo:

Lo primero que los investigadores proponen es calcular la altura del flujo de aproximación (subcrítico o supercrítico), mediante la siguiente expresión.

Si el flujo de aproximación es subcrítico, se inicia de la aproximación de Marchi (1993), quien manifiesta que el tirante de un flujo subcrítico en caída se puede determinar cómo, una relación con el tirante crítico:

$$Y_b = 0.706 * \frac{y_b}{y_c}$$

Ecuación 72. Profundidad de un Flujo Subcrítico en Caída.

Si el flujo de aproximación es supercrítico.

$$y_b^3 - 3y_b \cdot y_o^2 - \frac{6}{y_o} y_b + 6 = 0$$

Ecuación 73. Profundidad de un Flujo Supercrítico en Caída.

Puesto que se tendrían dos variables en la expresión, se deberá partir de un tanteo, donde

$$Y_0 = \frac{h}{y_c}$$

y esta se deberá asumir en un rango entre 0 a 1.

Posteriormente de emplear la ecuación de Bernoulli entre el escalón superior y la sección localizada aguas arriba del punto de impacto, se determina la velocidad del chorro, antes de impactar la capa aireada.

$$V_{AI} = \sqrt{2 \cdot g \cdot (y_b + h - d_p) \cdot V_b^2}$$

Ecuación 74. Velocidad del Chorro antes del Impacto.

De la ecuación de continuidad se podrá calcular v_b , y el tirante de la capa aireada se deberá suponer. El ángulo del chorro antes de impactar la capa aireada será

$$\cos \beta = \frac{V_x}{V_{AI}}$$

donde:

$$V_x = V_b \left(1 + \frac{1}{2F_b^2} \right)$$

Ecuación 75. Velocidad Horizontal del Chorro.

Por otra parte, asumiendo que la inclinación del chorro en la caída es igual al ángulo de impacto en la cavidad aireada, se puede decir entonces:

$$V_m = \frac{V_{AI}}{2} (1 + \cos \theta)$$

Ecuación 76. Velocidad Vertical del Chorro.

La velocidad del flujo luego del impacto, se calcula de la siguiente manera:

$$V_{DI} = \sqrt{V_m^2 + 2g(d_p - y_i)}$$

Ecuación 77. Velocidad del Chorro después del Impacto (Renna & Fratino).

Para conocer el tirante del flujo aguas abajo del impacto se debe aplicar la siguiente ecuación de tercer orden:

$$y_i^3 - \frac{y_i}{2g}(V_m^2 + 2gh) + \frac{q^2}{2g} = 0$$

Ecuación 78. Profundidad del flujo aguas abajo del Impacto.

Utilizando la ecuación de momentum entre la sección del escalón y la sección de impacto aguas abajo del chorro, se puede calcular d_p :

$$d_p = \sqrt{(y_i^2 - y_b^2) + \frac{2}{g}q(V_i - V_b)}$$

Ecuación 79. Profundidad de flujo en la capa aireada (Renna & Fratino).

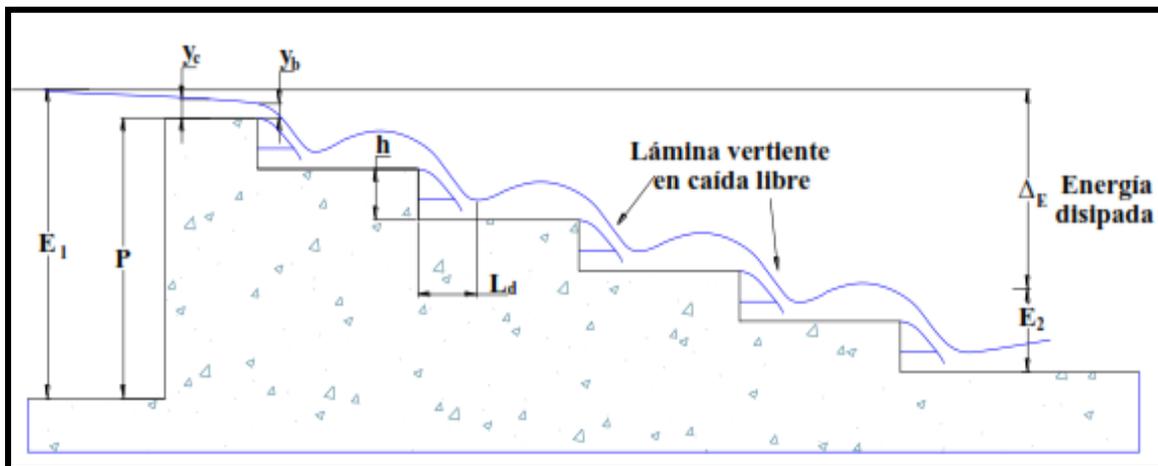


Figura N° 39. Parámetros de un vertedero con NAP (Ricardi-2011).

Dónde:

y_b = es el tirante del flujo en la orilla del escalón

y_c = es el tirante crítico

En este mismo escalón, el tirante crítico se encuentra a una distancia de alrededor de 3 a 4 veces y aguas arriba del borde del escalón (Chanson, 2002; Henderson, 1966).

1.3.2.1.7 Teorías del Flujo Transitorio

El flujo transitorio fue clasificado por primera vez por medio del uso de modelos físicos de canales escalonados en el año 1997 por los investigadores Ohtsu y Yasuda, donde se observó que, entre el régimen del flujo Saltante y el régimen Rasante, se produce un régimen intermedio, conocido como régimen de flujo Transitorio.

El régimen de flujo Transitorio se caracteriza por la cohabitación del flujo saltante y el flujo rasante en diferentes gradas. A lo largo del trayecto del canal, se pueden observar cavidades o vacíos de aire en algunas gradas, mientras que en otros se muestra una recirculación estable del flujo o también llamados vórtices recirculantes. (Amador, 2005)

El régimen de flujo de transición muestra una apariencia desordenada con gran aireación del flujo, donde, a causa de las alteraciones y a la no concordancia del flujo, no es posible definir el perfil real de flujo. Este tipo de régimen de flujo se conoce por generar fuertes pulsaciones y salpicaduras a lo largo del recorrido, mostrando variaciones de las características del flujo (Llano, 2003).

Las pulsaciones y salpicaduras que produce en el régimen de flujo Transitorio también se le conoce como rocío, atomización o spray.

En el diseño de canales de fondo escalonado se recomienda evitar la formación del régimen de flujo Transitorio (Chanson, 2002).

Chanson & Toombes (2002) expusieron una particularidad del régimen de flujo Transitorio; no obstante, los estudios y los datos que se tienen acerca de este régimen de flujo son muy limitadas. En esta investigación se tipificó el comportamiento del flujo Transitorio en dos: uno que presenta cavidades de aire de diversos tamaños, entre la parte inferior del flujo y el fondo de la huella del escalón, y el segundo, donde dichas cavidades, son alternadas bajo los escalones, con vórtices recirculantes de flujo secundario (González & Chanson, 2007).

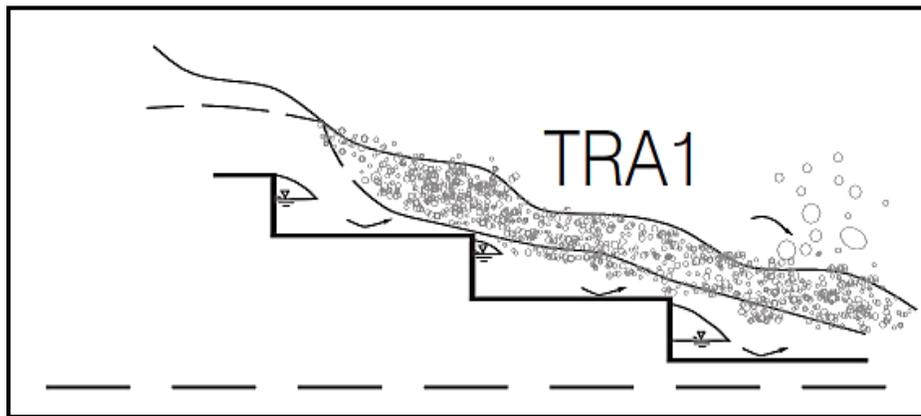


Figura N° 40. Flujo Transitorio con cavidades de aire (TRA1) (González & Chanson, 2004).

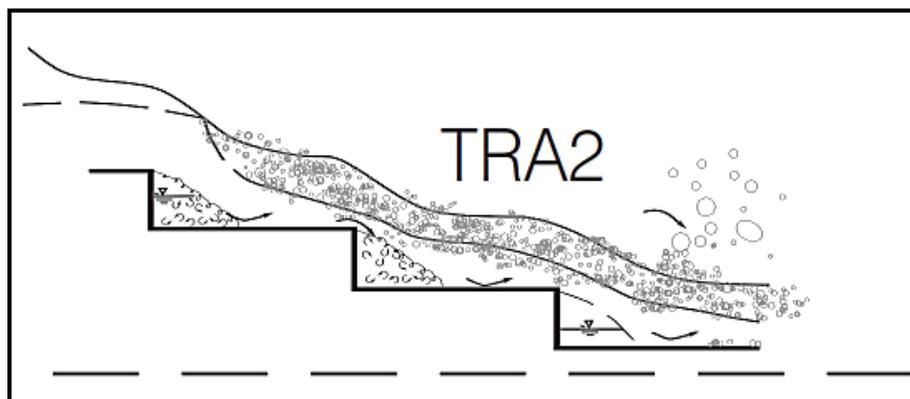


Figura N° 41. Flujo Transitorio con cavidades de aire y vórtices (TRA2) (González & Chanson, 2004).

1.3.2.1.8 Diseño de Tanques Amortiguadores

El uso de tanques amortiguadores tiene la finalidad de disipar la energía del flujo supercrítico que se genera bajo una estructura de descarga, como pueden ser rápidas, caídas entre otros.

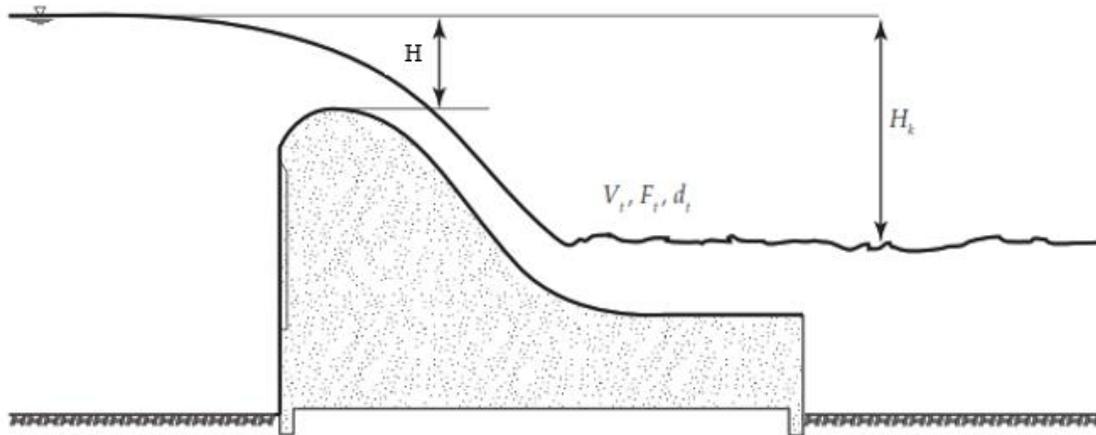


Figura N° 42. Parámetros para el diseño de una cubeta tipo USBR, Design of Small Dams, 1960.

Donde:

H = Carga hidráulica sobre el vertedor (m).

H_k = Carga Hidráulica del Vertedor hasta aguas abajo del mismo (m).

La función que cumplen estas estructuras consiste en las teorías del resalto hidráulico, es decir transformar las elevadas velocidades del flujo supercrítico en velocidades que no afecten a las estructuras o cauce aguas abajo, produciendo una disipación de energía.

El propósito general del diseño de los tanques amortiguadores es la siguiente: a partir del caudal de diseño Q_d , se puede calcular el tirante normal en el río aguas abajo de la presa, esta será la altura del agua a la salida del pozo amortiguador. También con el caudal Q_d y un ancho asumido en el pozo, es posible conocer el tirante hidráulico en la sección 1 (y_1) y la velocidad del agua (V_1). Por otra parte, se puede determinar el calado conjugado del resalto hidráulico (y_2). Si se resta a (y_2) el calado y_n del río, se obtiene la elevación del piso del pozo amortiguador.

Por otra parte, el pozo trabajará para varios caudales menores que el caudal de diseño $0 \leq Q \leq Q_d$, esto causará que el resalto se desplace hacia aguas abajo; cuando los calados conjugados sean mayores que los normales en el río, y de otro modo, el resalto se desplaza hacia aguas arriba ahogando a la rápida, disminuyendo su eficiencia en la disipación de energía. Arreguín y Alcocer (2010).

Esto produce la necesidad de conseguir una combinación apropiada de las dimensiones del pozo disipador, que es en lo que se fundamenta específicamente el diseño hidráulico de estas estructuras.

1.3.2.1.8.1 Tanque Rectangular Tipo St. Anthony Falls (SAF)

Este pozo analizado en el SAF Hydraulics Laboratory, Minnesota University, es utilizado para obras de excedencia menores, como presas derivadoras o caídas en canales donde el número de Froude está en el rango entre 1.70 y 17.00.

El método de cálculo es el siguiente: se calcula el calado con la longitud L_B , ver **Figura 43**, el cual se obtiene con la ecuación:

$$L_B = 4.5 \left(\frac{y_n}{F_1^{0.76}} \right)$$

Ecuación 80. Longitud del Tanque Tipo SAF.

Donde:

$y_n = y_d$ = Tirante después del salto hidráulico (m).

F_1 = Número de Froude en la sección 1.

La altura de los dientes de la rápida es la misma que la del tirante de llegada y_a , y su ancho y separación igual a $0.75 y_a$.

La altura del umbral de salida h_{umb} debe ser:

$$h_{umb} = 0.07y_n$$

Ecuación 81. Altura de Umbral de Salida (SAF).

la altura de la plantilla del pozo respecto al nivel de descarga y_n' es:

$$y_n' = \left(1.10 - \frac{F_1^2}{120}\right) \cdot y_n \quad \text{para } 1.70 \leq F_1 < 5.5$$

Ecuación 82. Profundidad del Tanque Tipo SAF con Froude 1.7 - 5.5.

$$y_n' = 0.85 \cdot y_n \quad \text{para } 5.5 \leq F_1 < 11$$

Ecuación 83. Profundidad del Tanque Tipo SAF con Froude 5.5 - 11.

$$y_n' = \left(1.0 - \frac{F_1^2}{800}\right) \cdot y_n \quad \text{para } 11 \leq F_1 < 17$$

Ecuación 84. Profundidad del Tanque Tipo SAF con Froude 11 - 17.

La altura de la pared del canal o estructura debe ser $hw = y_n/3$ sobre el nivel máximo del agua descargada.

Las demás propiedades geométricas del pozo se muestran en la **Figura 43**.

1.3.2.1.8.2 Tanque Rectangular Tipo USBR (I)

Se utiliza para grandes caídas en canales o presas derivadoras, para el caso de que los números de Froude asilen entre 2.50 y 4.50. Es necesario para contrarrestar las ondas en la superficie del flujo, esto lo alcanza mediante los chorros que son deflectados con los dientes ubicados en el pozo. El diseño de este tipo de pozo se hace empleando la **Figura 45** a partir del número de Froude obtenido.

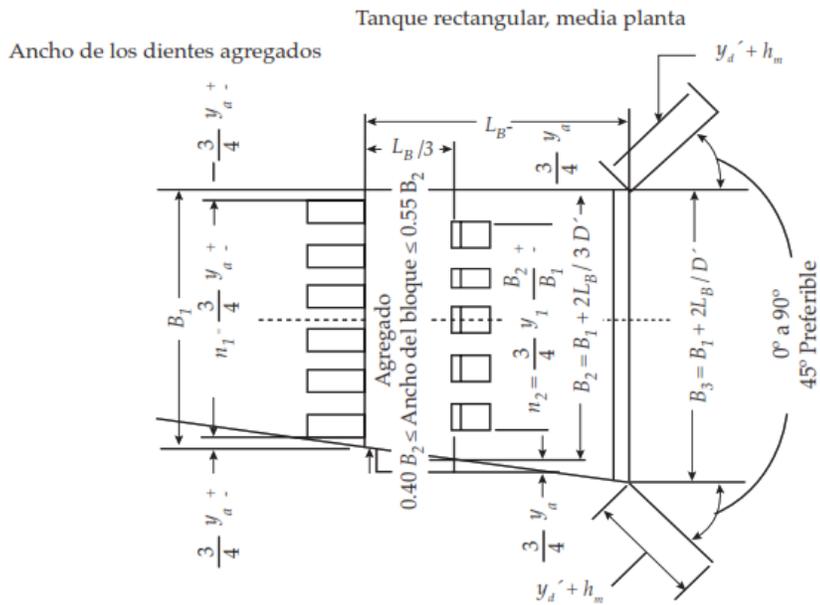
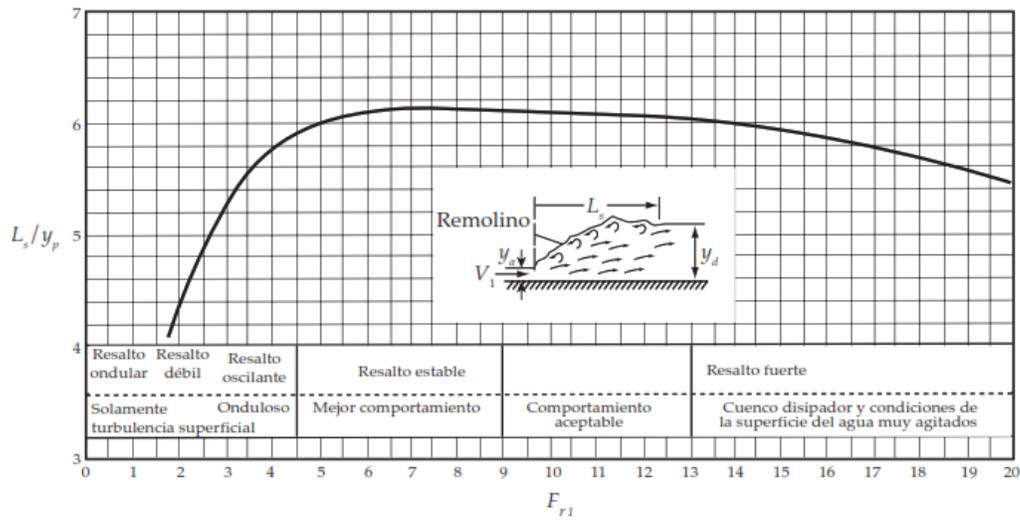


Figura N° 43. Tanque tipo Saint Antony Falls (SAF).

donde:

$L_s = L_r =$ Longitud del resalto hidráulico (m).

$n_1 =$ Distancia entre los bloques extremos del muro (m).

$B_1 =$ Distancia entre los bloques extremos (m).

$B_2 =$ Ancho total para la ubicación de los dientes del tanque (m).

$e_p =$ Distancia entre los dientes extremos del tanque (m).

$W =$ Ancho total del tanque (m).

Para optimizar su eficiencia se sugiere construir los dientes del pozo más angostos que los señalados en la **Figura 45**, ancho = $0.75 y_1$, y ubicar el nivel de la plantilla a una altura 1 respecto al nivel de descarga de 5 a 10% mayor que el conjugado teórico.

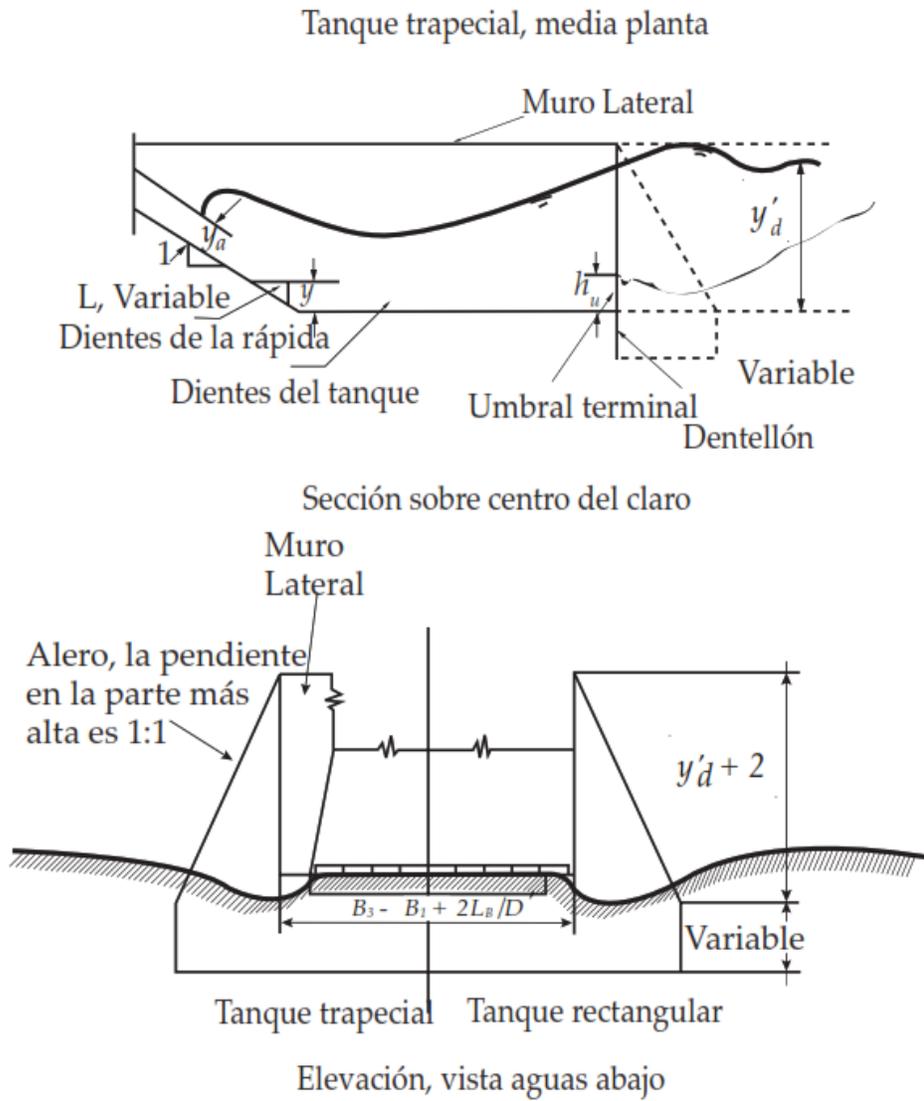


Figura N° 44. Tanque tipo SAF, CFE, 1970.

1.3.2.1.8.3 Tanque Rectangular Tipo USBR (II)

Son utiliza para números de Froude mayores de 4.50 y velocidades de llegada menores de 15.25 m/s. Su diseño puede realizarse siguiendo la **Figura 46**. La altura de la plantilla está dada por el conjugado mayor y_2 .

1.3.2.1.8.4 Tanque Rectangular Tipo USBR (III)

Se utiliza para $F_1 > 4.50$ y velocidades mayores de 15.25 m/seg. Se recomienda en presas altas con velocidades de llegada mayores de 15.00 m/seg, caídas hasta de 60 m y caudales unitarios de 50.00 m² /seg.

Su diseño se realiza de la mano con la **Figura 47**. La plantilla del tanque debe diseñarse de tal forma que se obtenga un ahogamiento del 5.00 % del conjugado mayor teórico, con un ahogamiento menor el resalto hidráulico tiende a salirse del tanque. Arreguín y Alcocer (2010).

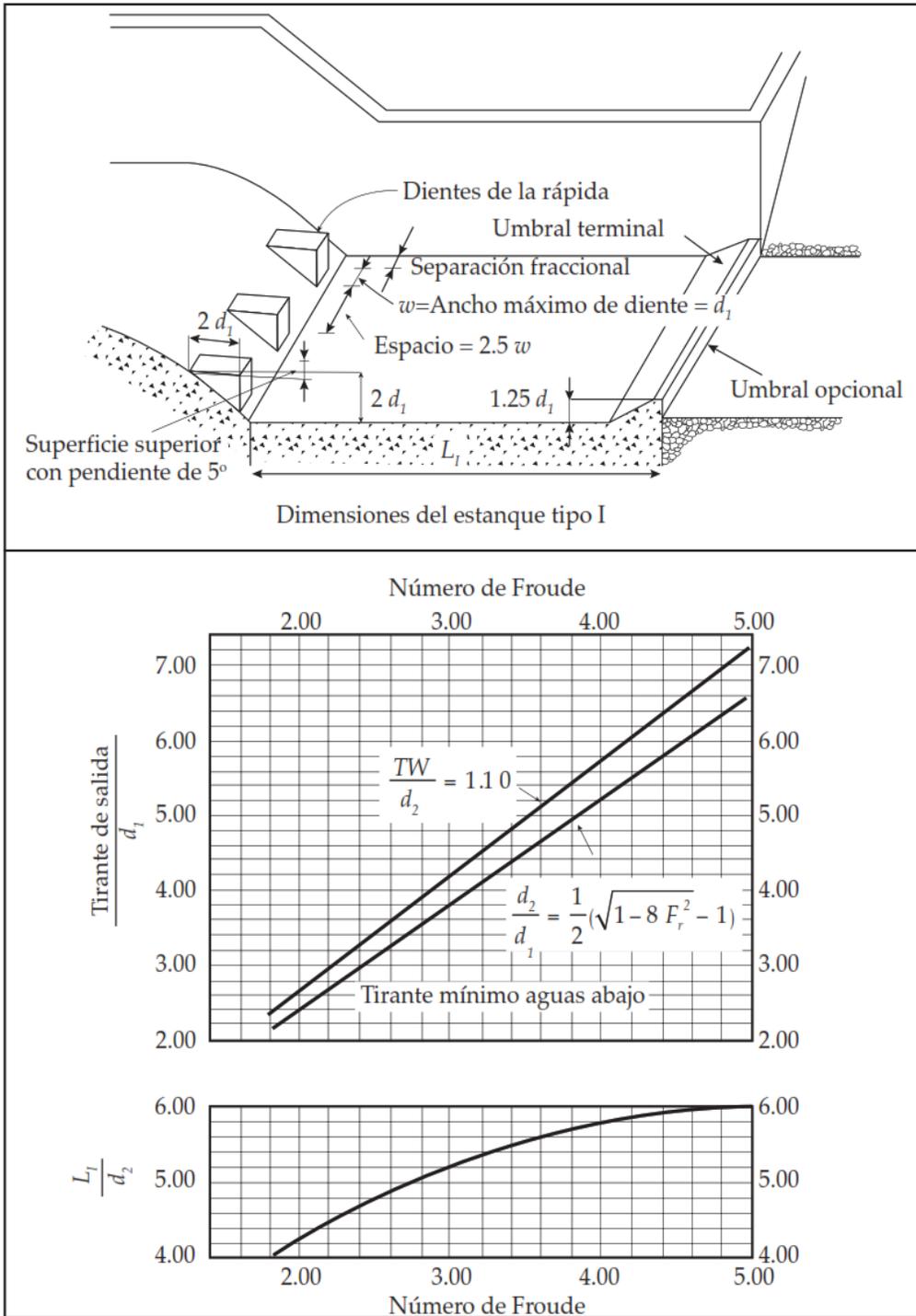


Figura N° 45. Tanque amortiguador tipo USBR I, Design of Small Dams, 1960.

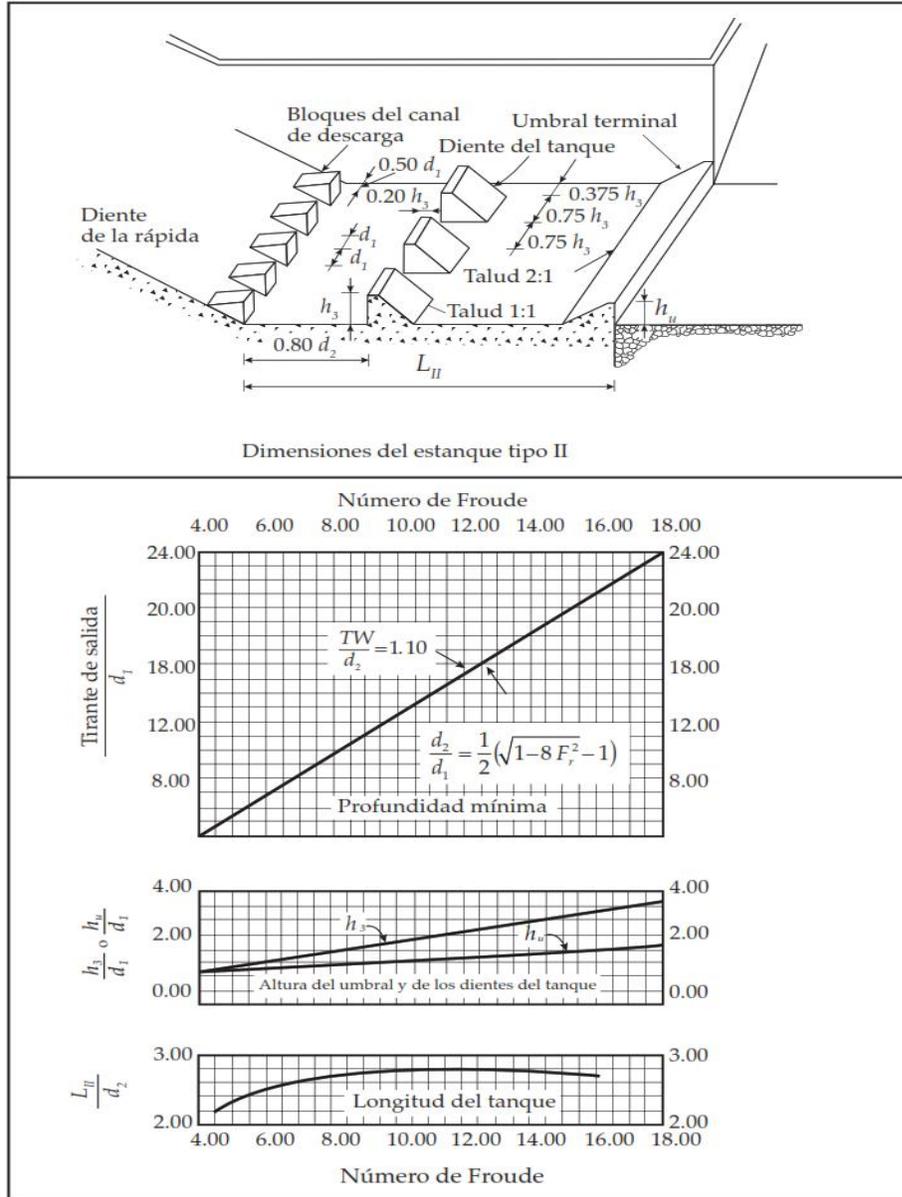


Figura N° 46. Tanque amortiguador tipo USBR II, Design of Small Dams, 1960.

donde:

$d_1 = y_1 =$ Tirante conjugado menor (m).

$d_2 = y_2 =$ Tirante conjugado mayor (m).

$L_I =$ Longitud del estanque tipo I (m).

$L_{II} =$ Longitud del estanque tipo II (m).

$h_3 = h_{ob} =$ Altura del diente del tanque (m).

$a_{ob} =$ Ancho máximo del diente (m).

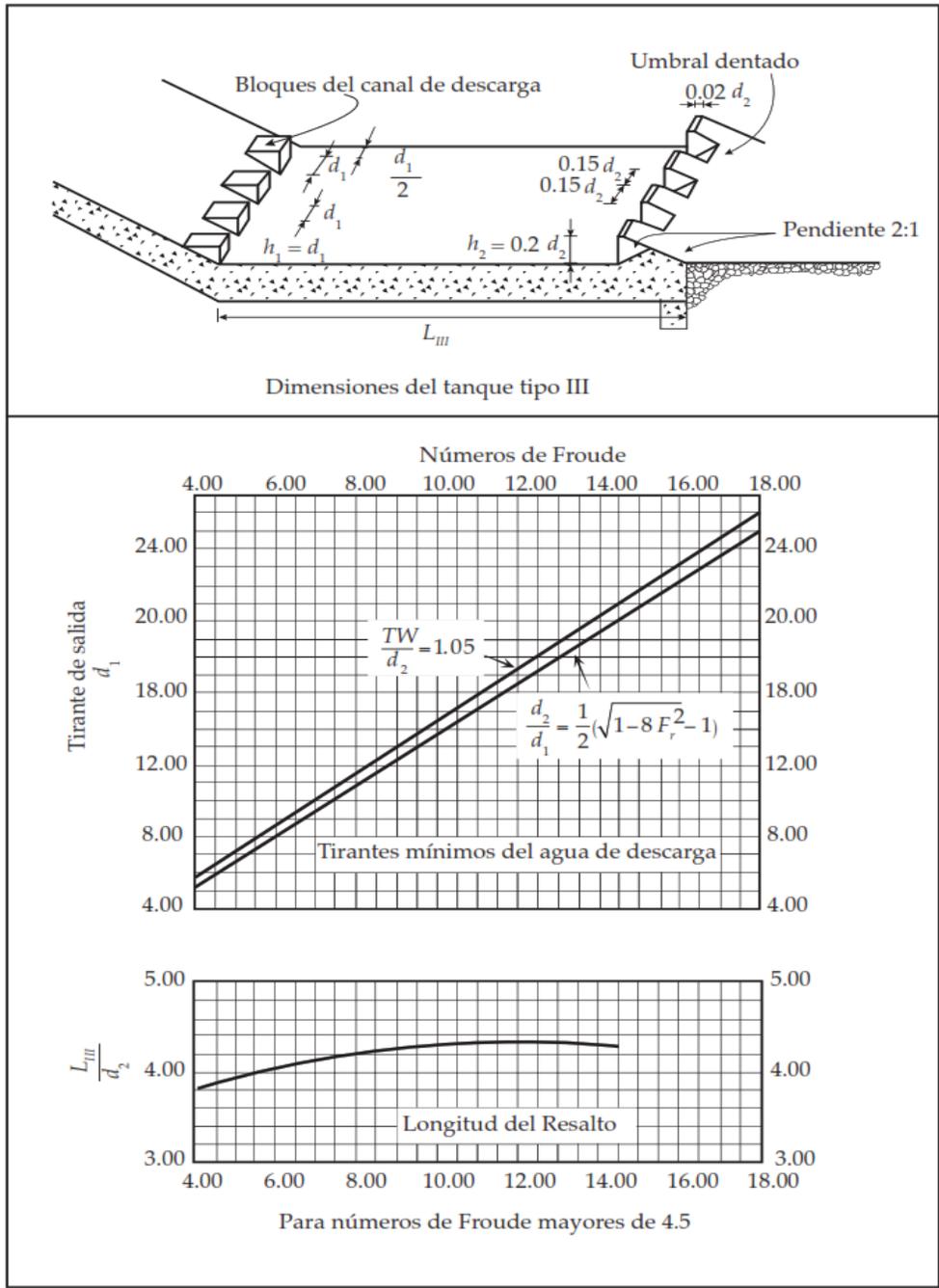


Figura 94. Tanque amortiguador tipo USBR III, *Design of Small Dams*, 1960.

Figura N° 47. Tanque amortiguador tipo USBR III, *Design of Small Dams*, 1960.

donde:

L_{III} = Longitud del estanque tipo III (m).

TW = Tirante de agua. (m).

1.3.2.1.9 Vertederos de Caída Libre

Esta clase de vertederos se utiliza en embalses de arco o de contrafuertes pequeñas o en canales específicamente en saltos de agua para alturas pequeñas, a causa de que la forma de estas estructuras es poco favorable para hacer un canal de descarga.

Por lo consecuente, la dificultad de los vertederos se sintetiza al diseño de la sección de control y del pozo disipador.

Es necesario considerar una correcta aeración bajo la lámina de agua vertida para eludir su derrumbamiento por las presiones bajas que podrían generarse bajo la lámina.

Para el diseño del pozo disipador se realizará teniendo en cuenta dos incógnitas, la longitud de impacto y el caudal unitario q . Estas dos variables pueden juntarse para formar parámetro adimensional conocido como número de caída \bar{D} . Arreguín y Alcocer (2010).

$$\bar{D} = \frac{q^2}{g \cdot h^3}$$

Ecuación 85. Número de Caída.

1.3.2.1.9.1 Tanque para Resalto Hidráulico

Para el diseño de un tanque amortiguador de este tipo se realiza de la siguiente manera:

De forma provisional se asume el desnivel de caída h . Esto se consigue con la obtención del calado conjugado mayor del resalto hidráulico dentro del tanque amortiguador y se precisa el desnivel de la planta del tanque.

Con la obtención de h se determina el número de caída \bar{D} con este dato se ingresa a la **Figura N° 48**, con la que se puede obtener el calado conjugado mayor del resalto hidráulico, se precisa una nueva altura de planta del pozo, se deduce nuevamente h , y se repite el procedimiento hasta que los valores se ajusten para el tirante conjugado mayor. Arreguín y Alcocer (2010).

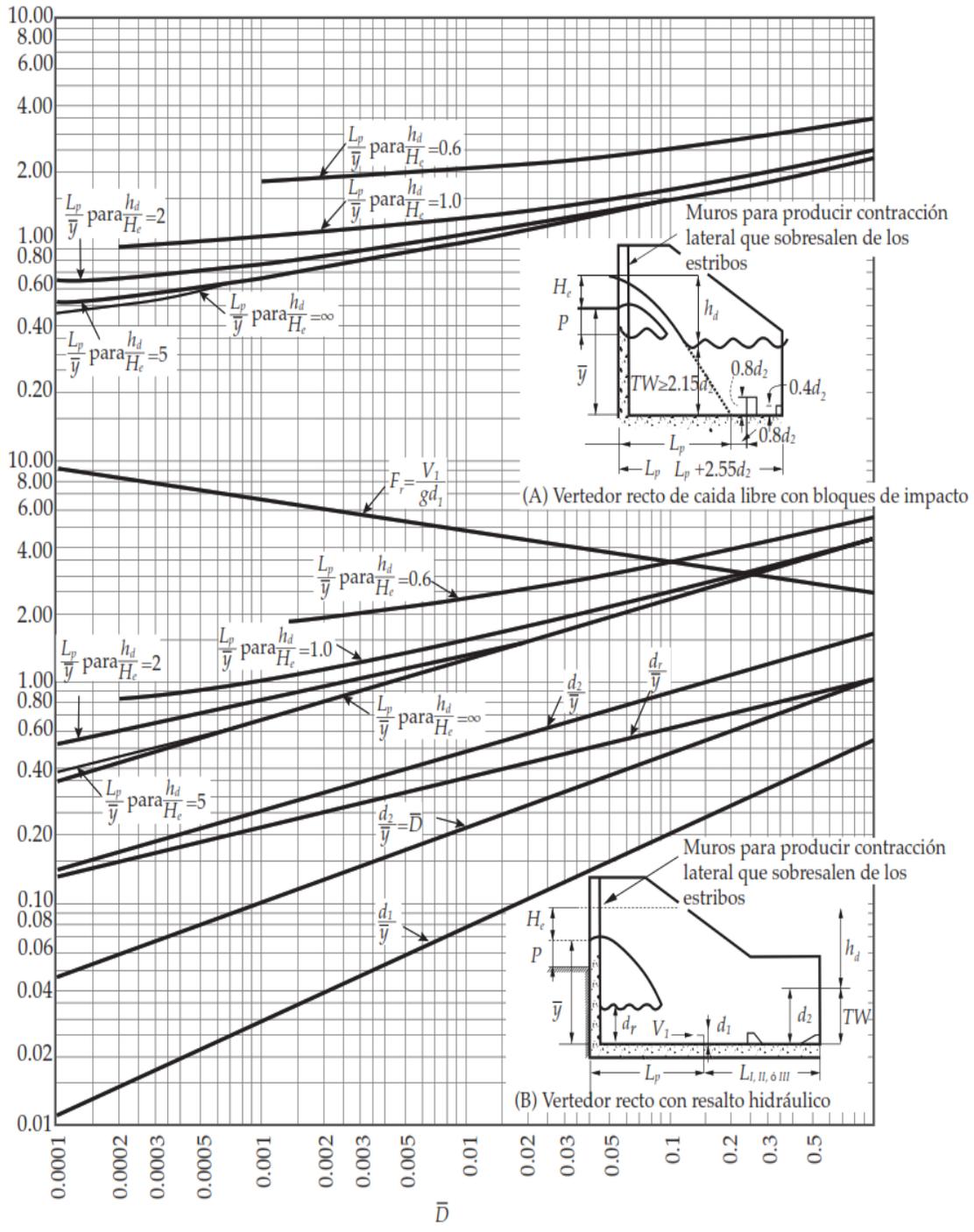


Figura N° 48. Ayuda de Diseño para Tanques Amortiguadores en vertederos de Caída Libre, Design of Small Dams, 1960.

Donde:

$L_p = L_d$ = Longitud de impacto de la lámina de agua (m).

$h_d = H$ = Carga hidráulica total en la entrada del tanque (m).

Seleccionando el número de caída se calcula el tirante conjugado mayor y su número de Froude con la guía de la **Figura N° 48**.

Una vez obtenido los valores anteriormente descritos puede decidirse si se opta por el diseño de un pozo amortiguador USBR Tipo II o III, el cual se armoniza con el diseño anteriormente descrito para tanques amortiguadores.

Se recomienda los siguientes parámetros.

$$L_m = L_d + L_{I,II \text{ o } III}$$

Ecuación 86. Longitud mínima del tanque amortiguador

$$L_{ob} = L_d + 0.80y_2$$

Ecuación 87. Longitud a los Bloques desde la Cima de la Cresta del Vertedor.

$$h_{ob} = 1.50y_1$$

Ecuación 88. Peralte de los Bloques Disipadores.

1.3.2.1.9.2 Tanque para Bloques de Impacto

Se utiliza en casos donde la carga hidráulica es baja bastante variación de los calados del agua, para el diseño seguirá los siguientes criterios:

Inicialmente se sigue los dos primeros pasos del diseño de tanque para resalto hidráulico hasta obtener el número de caída \bar{D} .

Luego se calcula el tirante crítico y_c , posteriormente se calcula la relación L_d/h haciendo uso de la **Figura N° 48**.

Además, se utilizará las siguientes recomendaciones:

$$L_m = L_d + 2.55y_c$$

Ecuación 89. Longitud mínima del tanque amortiguador.

$$L_{ob} = L_d + 0.80y_c$$

Ecuación 90. Longitud a los Bloques desde la Cima de la Cresta del Vertedor.

$$TW = 2.15y_c$$

Ecuación 91. Profundidad Mínima del Tanque.

$$h_{ob} = 0.80y_c$$

Ecuación 92. Altura Óptima del Obstáculo Amortiguador.

$$a_{ob} = 0.40y_c$$

Ecuación 93. Ancho de Obstáculos.

$$h_{umb} = 0.40y_c$$

Ecuación 94. Altura de Umbral de Salida.

1.3.2.1.10 Diseño Hidráulico de Caídas Escalonadas

1.3.2.1.10.1 Descripción General

Estas estructuras están conformadas por una serie de caídas verticales con tanques amortiguadores uno sobre de otro, en forma de escalera. El agua cae en el primer tanque en el cual se forma un resalto hidráulico, disipando la energía y pasa por un vertedero frontal en el cual pasa al siguiente tanque amortiguador, repitiéndose el proceso para los demás tanques.

De esta manera en el flujo no se produce ninguna aceleración a lo largo de las gradas como pasa en los canales de pendientes altas, ya que la energía se disipa antes de caer en la siguiente grada.

Una gran ventaja de estas estructuras es que funcionan muy bien con los gastos intermedios hasta llegar al caudal de diseño.

Es común que las caídas escalonadas se utilicen para caudales menores de 10 m³/seg, pero se han desarrollado algunas variantes en el diseño para que puedan operar correctamente para caudales mayores, estas variantes son las siguientes:

Se anula el vertedero por lo que la caída se transforma en una simple escalera siendo esto un ahorro del material en lo que a costos del proyecto se refiere. El flujo puede tender a acelerarse y discurrir de escalón en escalón, Para no tener este problema la longitud de hulla del escalón debe ser lo suficiente mente larga, según Rumelim la huella del escalón será mayor a la distancia recorrida por la partícula de agua en el chorro más 3 veces la altura del escalón. Sviatoslav Krochin (1986).

Por tal razón, estas estructuras se construyen con pendientes bajas y los parámetros hidráulicos solamente se cumplen para el gasto de diseño.

El umbral al final de cada tanque amortiguador tiene orificios al fondo, de esta manera el agua pasa por encima del umbral y por debajo por orificios, generando una reducción de la carga hidráulica del vertedero y una posibilidad de choque entre los dos chorros favoreciendo a una disipación de energía adicional.

La carga hidráulica del vertedero H está determinada por la formula general:

$$Q = CbH^{3/2}$$

Ecuación 95. Ecuación General del Vertedero.

Donde:

Q = Caudal que fluye por el canal. (m³/seg)

C = Coeficiente de descarga del vertedero.

b = Ancho del canal o del escalón (m).

H = Carga hidráulica del vertedero (m).

El coeficiente de descarga C está en base a la forma del vertedero y varía entre 1.8 y 2.0.

Por tener un b constante como ancho del canal a lo largo de toda la estructura, se puede concluir que la carga H obtenida es igual en los demás vertederos.

El flujo cae teniendo un desplazamiento acelerado reduciéndose progresivamente la vena del chorro. En la planta del tanque este flujo o tirante reducido y_1 se calcula con la siguiente fórmula.

$$y_1 = \frac{q}{\sqrt{2g \cdot (T - y_1)}}$$

Ecuación 96. Tirante Conjugado menor del Resalto Hidráulico.

Determinándose T de la siguiente manera

$$T = H + y_h + h$$

Ecuación 97. Carga Hidráulica más Carga de posición.

$$y_2 = -\frac{y_1}{2} + \sqrt{\frac{y_1^2}{4} + \frac{2 \cdot y_1 \cdot V_1^2}{g}}$$

Ecuación 98. Tirante Conjugado Mayor del resalto Hidráulico.

En cada escalón, el flujo pasa de régimen supercrítico a un régimen Subcrítico, por medio de la formación de un resalto hidráulico, el cual tiene tirantes conjugados y_1 y y_2 . Dichos tirantes se relacionan por medio de la siguiente fórmula. (Krochin, 1986, p. 271).

Para que el resalto hidráulico generado en el escalón esté sumergido según Shaumian, se debe cumplir lo siguiente:

$$H + h_{umb} > 0.90y_2$$

Ecuación 99. Verificación por Sumergencia N°1.

Además, se debe cumplir que

$$h_{umb} > 0.25y_2$$

Ecuación 100. Verificación por Sumergencia. N°2.

La longitud mínima del escalón debe ser igual a la trayectoria que realiza la partícula del agua en el chorro L_d , más la distancia L_r necesaria para que se forme el resalto hidráulico.

Obteniéndose de la mecánica que

$$L_d = \sqrt{\frac{2y}{g}} \cdot V$$

Ecuación 101. Longitud de impacto del Chorro General.

Estos valores están dados por

$$y = h + 0.5y_b + y_h$$

$$V = \frac{Q}{b \cdot y_b}$$

Teniendo en cuenta los siguientes datos experimentales:

Para el perfil hidrodinámico $y_b = 0.74y_c$ $C = 2.2$

Para el vertedero de pared delgada $y_b = 0.67y_c$ $C = 1.9$

Desarrollando y reemplazando se obtiene la siguiente fórmula para los dos

$$L_d = 1.04q^{1/3}\sqrt{(h + y_h) + 0.22q^{2/3}}$$

Ecuación 102. Longitud de Impacto del Chorro.

La fórmula para calcular la longitud necesaria L_r para la formación del resalto hidráulico según Shaumian es la siguiente:

$$L_r = 3.2 \cdot y_2$$

Ecuación 103. Longitud Necesaria para la Formación del Resalto Hidráulico.

1.3.3 Impacto Ambiental

La construcción de caídas escalonadas, es un conjunto de actividades que se realiza para obtener una caída artificial de agua, en la cual se ocupa un espacio en el medio donde se realiza la construcción, alterando el medio natural del lugar, causando un impacto ambiental, pero dado a la importancia que tienen estas estructuras hidráulicas para cubrir la necesidad de las personas, se pueden realizar actividades que puedan mitigar el efecto que generan este tipo de estructuras en el medio ambiente.

1.3.4 Seguridad y Salud Ocupacional

En la caída escalonada La Cascada se tiene en cuenta el riesgo de caída de una persona, ya que es una estructura al descubierto que por el solo hecho de su gran tamaño representa riesgo para personas que se puedan atrever a entrar en ella, a pesar que hay barandas para evitar que alguien ingrese directamente a la estructura, también se cuenta con un cerco perimétrico de malla metálica que impide el ingreso directo a la zona donde se encuentra La Cascada, cuenta con puertas por donde pueda ingresar personal autorizado, ya sea para mantenimiento o reparaciones; lamentablemente como se sabe, en nuestro país no se tiene mucho cuidado en hacer cumplir estas reglas en estas situaciones, y se comprobó al ver las puertas abiertas en todo momento y varias personas circulando sin ningún control por los lados de las estructura o incluso hasta ingresando a la misma.

1.3.5 Gestión de Riesgos y Prevención de Desastres

La ejecución de proyectos de infraestructura hidráulica como son las caídas escalonadas, son proyectos de gran magnitud, en el cual pueden participar en su proceso constructivo un gran número de personal, maquinaria y equipos especiales para dicho fin, en donde ciertas actividades pueden representar un gran riesgo para la seguridad del personal, por lo tanto se debe brindar al personal los medios y equipos que le brinden seguridad en el trabajo, como son EPP, arnés para trabajos en altura, revisión técnica y mantenimiento de la maquinaria y equipos, de esta forma se podría evitar algún accidente o riesgo que pueda atentar contra la seguridad laboral.

1.3.6 Estimación de Costos

Para la realización de esta investigación se realizará un presupuesto tentativo el cual está basado en la compra de hojas de papel para realizar apuntes, costo de copias en impresiones, empastado de la investigación, compra de planchas de acrílico, ángulos de acero, silicona, tornillos para la construcción del modelo físico, compra de lapiceros, wincha y costo de energía eléctrica, también se tendrá un costo por la obtención de información, además de otro costo en mano de obra para la construcción del modelo físico y costo de movilidad para visitas a campo.

1.3.7 Gestión de Mantenimiento

PLAN DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA, es una guía publicada por el Ministerio de Agricultura y Riego para la capacitación y entrenamiento en el año 2013, esta guía tiene como objetivo brindar una herramienta para el soporte técnico y metodológico que permita un desarrollo integral de los sistemas de riego, conociendo sus componentes y los requerimientos de operación y mantenimiento de la infraestructura hidráulica. A demás del desarrollo de capacidades técnicas y metodológicas en el personal de la Junta, Comisiones y Comités de Usuarios para ejecutar y operativizar actividades relacionadas a la Operación y Mantenimiento y su finalidad en la gestión técnica de las Organizaciones de Usuarios de Agua.

1.3.8 Normativa

1.3.8.2 Técnico

MANUAL DE CRITERIOS DE DISEÑOS DE OBRAS HIDRÁULICAS PARA LA FORMULACIÓN DE PROYECTOS HIDRÁULICOS MULTISECTORIALES Y DE AFIANZAMIENTO HÍDRICO, es un manual publicado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), su publicación se realizó en Lima – Perú en el año 2010, y está orientado a la formulación y diseño de proyectos hidráulicos como: canales abiertos, sifón, aliviaderos laterales, alcantarillas, desarenadores, rápidas, caídas, partidores, aforadores Parshall, bocatomas y presas pequeñas.

1.3.8.3 Ambiental

MANUAL PARA LA EVALUACIÓN DE ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DETALLADO, es un manual publicado por el Ministerio del Ambiente del Perú en el año 2016, este manual sirve como una herramienta guía para la evaluación y aprobación de los estudios de impacto ambiental (EIA) con la finalidad de que los procedimientos se desarrollen de manera efectiva y rápida.

1.3.8.4 Seguridad y Salud ocupacional

MANUAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN EN SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO, es un manual publicado por la Superintendencia Nacional de Fiscalización Laboral (SUNAFIL) Perú, este manual tiene como objetivo proponer un modelo de implementación de un Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo, aplicado a riesgos existentes en el centro de trabajo, con la finalidad de evitarlos o reducirlos.

1.3.8.5 Legal

LEY DEL SISTEMA NACIONAL DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL Y SU REGLAMENTO, es una Ley publicada por el Ministerio del Medio Ambiente del Perú en el año 2011, que tiene como finalidad la creación del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental (SEIA), como una forma única y ordenada de identificación, prevención, supervisión, control y corrección anticipada de los impactos ambientales negativos provenientes de las acciones humanas indicadas en los proyectos de inversión.

1.3.9 Estado del Arte

1.3.9.2 Software

1.3.9.2.1 Hec-Ras

Es un software que fue desarrollado por el Departamento de Defensa de los EE. UU., Cuerpo de Ingenieros del Ejército para administrar los ríos, puertos y otras obras públicas bajo su jurisdicción; ha encontrado una amplia aceptación por parte de muchos otros desde su lanzamiento público en 1995.

El programa HEC-RAS realiza la modelación hidráulica del flujo de agua a través de ríos naturales y otros canales. Las versiones anteriores a la 5.0, el programa realizaba un análisis unidimensional, implicando que no haya un modelado directo del efecto hidráulico de los cambios de forma de la sección transversal, las curvas y otros aspectos del flujo en dos y tres dimensiones. El lanzamiento de la Versión 5.0 introdujo el modelado bidimensional del flujo, así como las capacidades de modelado de transferencia de sedimentos.

1.3.9.3 Equipos de Laboratorio

1.3.9.3.1 Modelo Físico de La Cascada

El modelo físico a escala que se empleará para la presente investigación será de acrílico y a una escala de 1/75 para poder observar de manera clara el comportamiento de los flujos a analizar durante los ensayos.

1.3.10 Definición de Términos

a. Caída escalonada:

Esta estructura hidráulica cumple con varias funciones importantes que justifican su uso, es como su nombre lo indica, una caída por donde pasa el fluido y consta de escalones, las dimensiones de estos escalones dependen del caudal máximo, del lugar donde se colocara, de la altura que se salvará con esta estructura, siendo esta una de sus funciones más relevantes, para la presente investigación, la estructura a analizar tiene una altura de 42.7 metros, también es importante para aumentar la resistencia al flujo y la disipación de energía por medio de los escalones.

b. Estructura Hidráulica

Se refiere por estructura hidráulica a una construcción, donde el elemento dominante tiene que ver con el agua, se puede decir que las obras hidráulicas tienen el fin de controlar, dirigir y distribuir el agua, cualquiera sea su origen, con fines de aprovechamiento o de defensa. Existen numerosas estructuras de este tipo que cumplen distintas funciones, y es responsabilidad del ingeniero, designar donde va ir y que función va a cumplir cada estructura según los conocimientos adquiridos y problemas que se necesiten resolver u objetivos que se quieran cumplir con el empleo de una estructura hidráulica.

c. Canal alimentador

Un canal alimentador es una estructura hidráulica que tiene como fin, proveer de agua a un reservorio, en la presente investigación se analiza una caída escalonada que se encuentra en el tramo del canal alimentador del proyecto Tinajones, este canal empieza aguas arriba, donde se capta el agua del río chancay por medio de la bocatoma Racarrumi y luego de 16.08 Km llega al reservorio Tinajones. Esencialmente se puede decir que su función es la de alimentar el reservorio transportando el agua captada de un río.

d. Modelo Físico

Un modelo es una representación de un sistema físico por medio de un montaje con objetos reales que reproducen el comportamiento del sistema representado, en la ingeniería un modelo físico a escala es una construcción en un tamaño reducido pero proporcional a sistema original, donde se pueden realizar ensayos y/o pruebas que simulen el comportamiento real y de esta manera analizar de forma representativa los fenómenos o distintas situaciones que se podrían dar en el sistema real. Para el análisis es importante tener siempre en cuenta que el modelo es solo una representación en un tamaño reducido, por lo que se debe tratar de recrear de la manera más similar posible las condiciones que se estudiarán y que haya confianza en los resultados obtenidos.

e. Flujo Saltante

El flujo saltante es el movimiento del flujo de escalón a escalón también llamado “nappe”, de ahí la denominación de saltante, esta condición se da cuando hay una intensidad baja del flujo

o caudal, de esta manera la cantidad de agua que pase por la estructura va saltando de escalón a escalón hasta llegar a la base de la estructura donde continua el canal alimentador y se dirige hacia el reservorio.

f. Flujo Transitorio

Este flujo se observa cuando el vertedor opera con gastos intermedios, esta condición presenta fuertes fluctuaciones y tiene una apariencia caótica, lo cual genera que las propiedades de flujo cambien de un escalón a otro. Este flujo ya tiene la suficiente energía como para empezar a generar daños en la estructura.

g. Flujo Rasante

Este flujo se llega a observar cuando hay gastos mayores, caudal máximo o cerca a este, por la cantidad de fluido que circula por la estructura, se puede observar como su nombre lo dice, un flujo rasante, un flujo que esta tan por encima de los escalones que puede formar una especie de línea recta donde aún se pueden formar los vértices de los escalones. Este flujo sin duda es el que genera más exigencia a la estructura y en caso de un mal diseño, los daños pueden ser graves.

h. Proyecto Tinajones

Este proyecto es un símbolo de la región norte del país, un gran proyecto de suma importancia para el sector agrícola y para el desarrollo de la región Lambayeque, se ha aprovechado el agua de los ríos Chotano, Conchano y Chancay beneficiando el riego de más de 85,000 hectáreas de cultivos, generando una potencia de 95 MW y 600 GWh/año, a través de la central hidroeléctrica de Carhuaquero. Las principales obras del Sistema Tinajones fueron ejecutadas en el período 1950 a 1990 en el marco de la Primera Etapa con el apoyo financiero del Gobierno Alemán. Sus obras alcanzaron una inversión superior a los US\$ 180 Millones de dólares; siendo éstas las obras de derivación de los ríos Chotano y Conchano a través de los túneles Chotano y Conchano, respectivamente; obras de captación, almacenamiento y descarga del Reservorio de 320 MMC de capacidad, como la Bocatoma Racarrumi, Canal Alimentador, Reservorio Tinajones, Canal de Descarga y Obras de Distribución del Sistema de Riego, conformada por el Repartidor La Puntilla, Repartidor Desaguadero y Canal Taymi.

i. Caudal

El caudal es la cantidad de fluido que circula a través de una tubería, cañería, oleoducto, río, canal, etc., por unidad de tiempo. Normalmente se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo. El caudal máximo o de diseño es la mayor cantidad de agua que podrá circular por la estructura diseñada con este valor, este caudal es obtenido por medio de estudios hidrológicos y solo pueden ser superados por un evento extraordinario.

j. Escalones

Los escalones o peldaños, para una caída escalonada, son la parte principal de la estructura, ya que muy aparte de que son quienes les dan el nombre, también son las que realizan las funciones por la que se escogió ese tipo de estructura, ya sea la disipación de energía, salvar desniveles, y dependiendo de la altura, tendrán los escalones sus respectivas dimensiones, logrando de esta manera llevar de forma eficiente el agua hacia su siguiente destino.

k. Transición

Es una pequeña estructura que sirve para pasar de un tipo de sección a otro, ya sea de un canal a otro, de un canal a otro tipo de estructura o alguna otra forma de combinación que se le pueda dar, pero que finalmente puede ser una reducción o un ensanchamiento, según lo requerido, se procederá a diseñar la transición y darle la forma necesaria para que no genere grandes alteraciones en el flujo.

l. Cavitación

Es la formación de cavidades llenas de aire dentro de un líquido en movimiento, esta combinación de agua y aire puede generar daños en una estructura hidráulica, por lo que los diseños evitan tener este tipo de fenómenos, aunque para algunos lo mejor es controlar sus efectos y dejar que ocurran.

m. Reservorio

Es una especie de recipiente de gran tamaño que tiene como función almacenar algún líquido, en la presente investigación se relaciona el reservorio Tinajones que cuenta con 320 MMC de capacidad y puede llegar a abastecer de agua hasta a 85000 Ha de irrigación.

1.3.11 Ciencias Aportantes a la Investigación

1.3.11.2 Hidráulica

La hidráulica es la rama de la física que estudia el comportamiento de los líquidos en función de sus propiedades específicas. Es decir, estudia las propiedades mecánicas de los líquidos dependiendo de las fuerzas a las que son sometidos. Todo esto depende de las fuerzas que se interponen con la masa y a las condiciones a las que esté sometido el fluido, relacionadas con la viscosidad de este. Gracias a la hidráulica se puede analizar los comportamientos del líquido en movimiento y diseñar estructuras según las demandas y condiciones que genere el paso del líquido a través de dicha obra.

1.3.11.3 Mecánica

Es la rama de la física que estudia y analiza el movimiento y reposo de los cuerpos, y su evolución en el tiempo, bajo la acción de fuerzas. Modernamente la mecánica incluye la evolución de sistemas físicos más generales que los cuerpos másicos. En ese enfoque la mecánica estudia también las ecuaciones de evolución temporal de sistemas físicos como los campos electromagnéticos o los sistemas cuánticos donde propiamente no es correcto hablar de cuerpos físicos.

1.3.11.4 Física

Es una de las ciencias naturales que se encarga del estudio de la energía, la materia y el espacio-tiempo, así como las interacciones de estos tres conceptos entre sí.

1.3.11.5 Matemática

Es una ciencia formal que, partiendo de axiomas y siguiendo el razonamiento lógico, estudia las propiedades y relaciones entre entidades abstractas como números, figuras geométricas o símbolos matemáticos.

1.4 Formulación del Problema

¿En qué medida el análisis del flujo Rasante, Transitorio y Saltante empleando un modelo físico influye en el diseño hidráulico de la caída escalonada?

1.5 Justificación e Importancia del Estudio

La construcción de estructuras abarca ciertos factores; tales como el diseño, ubicación, ejecución, control y mantenimiento, lo cual significa que de no realizar de manera correcta uno de estos aspectos involucraría que la estructura hidráulica se convierta en un potencial riesgo.

Las caídas escalonadas se construyen en el Perú con concreto armado, mampostería, o la unión de ambos como el caso de La Cascada, este criterio depende del proyectista teniendo en cuenta varios factores como las dimensiones de la estructura, el costo, la disponibilidad de los materiales a usar en la zona, entre otros.

Las caídas escalonadas son utilizadas para funciones específicas como salvar desniveles, lo cual influye en las dimensiones de los escalones según la distancia tanto vertical como horizontal que se tenga, también disipan la energía que se genera al caer el fluido una altura considerable, de esa manera las gradas paso a paso van controlando la energía generada y al llegar al pie de la caída escalonada, se puede continuar con el canal sin mayores problemas.

1.5.1. Justificación Tecnológica

Una caída escalonada con errores en el diseño representa una gran amenaza para el sistema donde trabaja. En la presente investigación se está analizando la caída escalonada La Cascada, una estructura hidráulica que se encuentra en el canal alimentador del Proyecto Tinajones, un proyecto de gran importancia a nivel regional y por lo mismo una falla en esta caída escalonada representa un gran riesgo, de esta manera se optó por revisar el diseño de la estructura mediante un modelo físico a escala.

1.5.2. Justificación Ambiental

La proyección de caídas escalonadas genera un impacto ambiental en medida al tamaño de la misma, muchas veces los beneficios no justifican el uso de estas estructuras, pero otras como el caso de La Cascada se puede decir que compensa de gran manera, ya que es parte importante del Proyecto Tinajones.

1.5.3. Justificación Social

Las caídas escalonadas son estructuras que por sí solas tienen una importancia dependiendo del sistema al que sirvan. En la presente investigación se analiza La Cascada la cual forma parte del Canal Alimentador del Proyecto Tinajones, el cual es de gran importancia, ya que genera un gran impulso de toda la región Lambayeque, por tal motivo de manera indirecta, esta estructura aporta al desarrollo de la región.

1.5.4. Justificación Económica

Los costos en reparación pueden reducirse de manera considerable si se mejora el diseño y se ejecuta de manera que garantice un mejor rendimiento por un periodo más extendido de lo que presenta actualmente.

1.6 Hipótesis

Si se analiza el flujo Rasante, Transitorio y Saltante empleando un modelo físico, entonces se evaluará el diseño hidráulico de la caída escalonada.

1.7 Objetivos

1.7.1. Generales

Analizar el flujo Rasante, Transitorio y Saltante para la evaluación del diseño hidráulico de la caída escalonada.

1.7.2. Específicos

- A. Recolectar información geométrica e hidráulica de la caída escalonada La Cascada perteneciente al canal Alimentador.
- B. Realizar el diseño del modelo físico a escala de la caída escalonada La Cascada.
- C. Realizar análisis hidráulico, construcción y ensayos del modelo físico a escala de la caída escalonada.
- D. Comparar los resultados obtenidos por medio de fórmulas, software y constatando en el modelo físico a escala.

CAPÍTULO II

MATERIAL Y MÉTODO

II. MATERIAL Y MÉTODO

2.1 Tipo y Diseño de Investigación

2.1.1 Tipo de Investigación

Cuantitativo, ya que se orienta al análisis y verificación del diseño hidráulico de la caída escalonada.

2.1.2 Diseño de Investigación

Cuasi-Experimental, ya que se realiza directamente los ensayos en el equipo que es una representación a escala de la estructura en estudio.

2.2 Población y muestra

2.2.1 Población

Caída escalonada “La Cascada” del Proyecto Tinajones con un caudal de diseño de 70 m³/seg (100%) donde se han venido dando constantes reparaciones debido a problemas con su estructura, razón por la que la presente investigación se encargará de evaluar el diseño hidráulico haciendo el análisis de los flujos en un modelo físico a escala.

2.2.2 Muestra

El caudal en el modelo. Se realizó la simulación empleando el equipo con distintos caudales que representan porcentajes del caudal de diseño de La Cascada (15%, 30%, 50%, 75%, 90%, 100%), así mismo se superará el caudal máximo para observar el comportamiento del flujo en el caso de eventos extraordinarios en 120%, 140%, 150%.

2.3 Variable y Operacionalización

2.3.1 Variables

2.3.1.1 Independiente

Modelo Físico De La Caída Escalonada

La Cascada es una caída escalonada que salva una altitud de 42 metros y consta de 12 escalones, su capacidad máxima es de 70 m³/seg y tiene una sección de transición a su salida que permite la continuación del canal alimentador, para esta caída escalonada se construyó un Modelo Físico a escala 1:75. Las caídas son utilizadas ampliamente como estructuras de disipación en irrigación, abastecimiento de agua y alcantarillado y son también necesarias en presas, barrajes y vertederos.

2.3.1.2 Dependiente

Evaluación del Diseño Hidráulico de la Caída Escalonada

El diseño hidráulico de las caídas escalonadas se basa principalmente en la amortiguación de la caída del agua a un canal y de esta forma lograr una disipación de la energía del flujo generada en el desnivel o pendiente fuerte. Un factor determinante para el diseño de caídas escalonadas es la altura (h), la longitud (l) de la grada y el valor de la relación (h/l) que haya entre estas, de la importancia de los tipos de flujo que se presenten según estas características.

2.3.2 Operacionalización

Tabla 5. Cuadro de Operacionalización de Variables.

VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADORES	SUB INDICADORES	ÍNDICES	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	
INDEPENDIENTE	-Flujo Saltante	NAPPE 1	Resalto Hidráulico	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica	
			Tirante crítico	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica	
		NAPPE 2	Resalto Hidráulico	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica	
			Tirante crítico	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica	
		NAPPE 3	Resalto Hidráulico	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica	
			Tirante crítico	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica	
		-Flujo Transitorio	TRA 1	Longitud de recirculación	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica
				Longitud de Rocío	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica
				Longitud de flujo Supercrítico	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica
			TRA 2	Longitud de recirculación	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica
				Longitud de Rocío	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica
				Longitud de flujo Supercrítico	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica
	Modelo físico de La Caída Escalonada	-Flujo Rasante	SKIMMING 1	Punto de inyección	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica
				Región FRV	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica
				Región FGV	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica
				Región FU	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica
		SKIMMING 2	Punto de inyección	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica	
			Región FRV	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica	
			Región FGV	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica	
			Región FU	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica	
		SKIMMING 3	Punto de inyección	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica	
			Región FRV	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica	
			Región FGV	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica	
			Región FU	m	Observación	Guía de Observación	Cinta métrica	
DEPENDIENTE	-Flujo Saltante	NAPPE 1	Resalto Hidráulico	m	Observación	Guía de Observación	Software Microsoft Excel	
			Tirante crítico	m	Observación	Guía de Observación	Software Microsoft Excel	
		NAPPE 2	Resalto Hidráulico	m	Observación	Guía de Observación	Fórmulas en Software Microsoft Excel	
Evaluación del Diseño Hidráulico								

de la Caída
Escalonada

		Tirante crítico	m	Observación	Guía de Observación	Fórmulas en Software Microsoft Excel
	NAPPE 3	Resalto Hidráulico	m	Observación	Guía de Observación	Fórmulas en Software Microsoft Excel
		Tirante crítico	m	Observación	Guía de Observación	Fórmulas en Software Microsoft Excel
	TRA 1	Longitud de recirculación	m	Observación	Guía de Observación	Fórmulas en Software Microsoft Excel
		Longitud de Rocío	m	Observación	Guía de Observación	Fórmulas en Software Microsoft Excel
		Longitud de flujo Supercrítico	m	Observación	Guía de Observación	Fórmulas en Software Microsoft Excel
-Flujo Transitorio	TRA 2	Longitud de recirculación	m	Observación	Guía de Observación	Software Microsoft Excel
		Longitud de Rocío	m	Observación	Guía de Observación	Software Microsoft Excel
		Longitud de flujo Supercrítico	m	Observación	Guía de Observación	Fórmulas en Software Microsoft Excel
	SKIMMING 1	Punto de inyección	m	Observación	Guía de Observación	Fórmulas en Software Microsoft Excel
		Región FRV	m	Observación	Guía de Observación	Fórmulas en Software Microsoft Excel
		Región FGV	m	Observación	Guía de Observación	Fórmulas en Software Microsoft Excel
		Región FU	m	Observación	Guía de Observación	Fórmulas en Software Microsoft Excel
	SKIMMING 2	Punto de inyección	m	Observación	Guía de Observación	Fórmulas en Software Microsoft Excel
-Flujo Rasante		Región FRV	m	Observación	Guía de Observación	Fórmulas en Software Microsoft Excel
		Región FGV	m	Observación	Guía de Observación	Fórmulas en Software Microsoft Excel
		Región FU	m	Observación	Guía de Observación	Fórmulas en Software Microsoft Excel
	SKIMMING 3	Punto de inyección	m	Observación	Guía de Observación	Fórmulas en Software Microsoft Excel
		Región FRV	m	Observación	Guía de Observación	Fórmulas en Software Microsoft Excel
		Región FGV	m	Observación	Guía de Observación	Fórmulas en Software Microsoft Excel
		Región FU	m	Observación	Guía de Observación	Fórmulas en Software Microsoft Excel

2.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos, Validez y Confiabilidad

2.4.1 Técnicas de Recolección de Datos

- a) Observación
- b) Entrevista
- c) Análisis documental.

2.4.2 Instrumentos de Recolección de Datos

2.4.2.1. Guía de Observación

a. Se realizó un levantamiento topográfico con wincha, para la obtención de medidas de los escalones para el cual se utilizará el Formato N°1 Levantamiento Topográfico con Wincha (Ver Anexo N° 1).

b. Se realizó el diseño del modelo físico a escala de la caída escalonada La Cascada que sirvió como guía para la construcción del equipo hidráulico, se utilizó el programa AutoCAD (Ver Anexo N° 11).

c. Se realizó un listado de los accesorios para la compra de estos, se utilizará el Formato N° 2 (Ver Anexo N° 2).

d. Se escaló las dimensiones y caudal de la estructura hidráulica La Cascada, para la construcción del modelo físico, se utilizó el Formato N° 3 para las 9 muestras contempladas en el ítem 2.2.2 (Ver Anexo N°3 y Anexo N°38).

e. Se realizó la verificación del diseño de la caída escalonada La Cascada usando las dimensiones reales de la estructura para evaluar el diseño hidráulico de la caída escalonada para el caudal de diseño (Ver Anexo N°35).

f. Se modeló la caída escalonada La Cascada en el software HEC-RAS, para observar el comportamiento de la estructura para las 9 muestras contempladas en el ítem 2.2.2 (Ver Anexo N°37).

g. Se realizó la comparación entre el diseño con fórmulas, la modelación en HEC-RAS y la observación del modelo físico, se empleó el Formato N° 6 para las 9 muestras contempladas en el ítem 2.2.2 (Ver Anexo N°6).

h. Se realizó un presupuesto del presente proyecto de investigación, para tener constancia del costo del mismo, se utilizará el Formato N° 7 (Ver Anexo N°7).

2.4.2.2. Cuestionario

a. Se entrevistó a una autoridad representante del PEOT (Proyecto Especial Olmos Tinajones), para obtener datos generales de la caída escalonada La Cascada, se utilizó la Hoja de Entrevista N° 1 (Ver Anexo N°9).

2.4.2.3. Guía de Análisis Documental

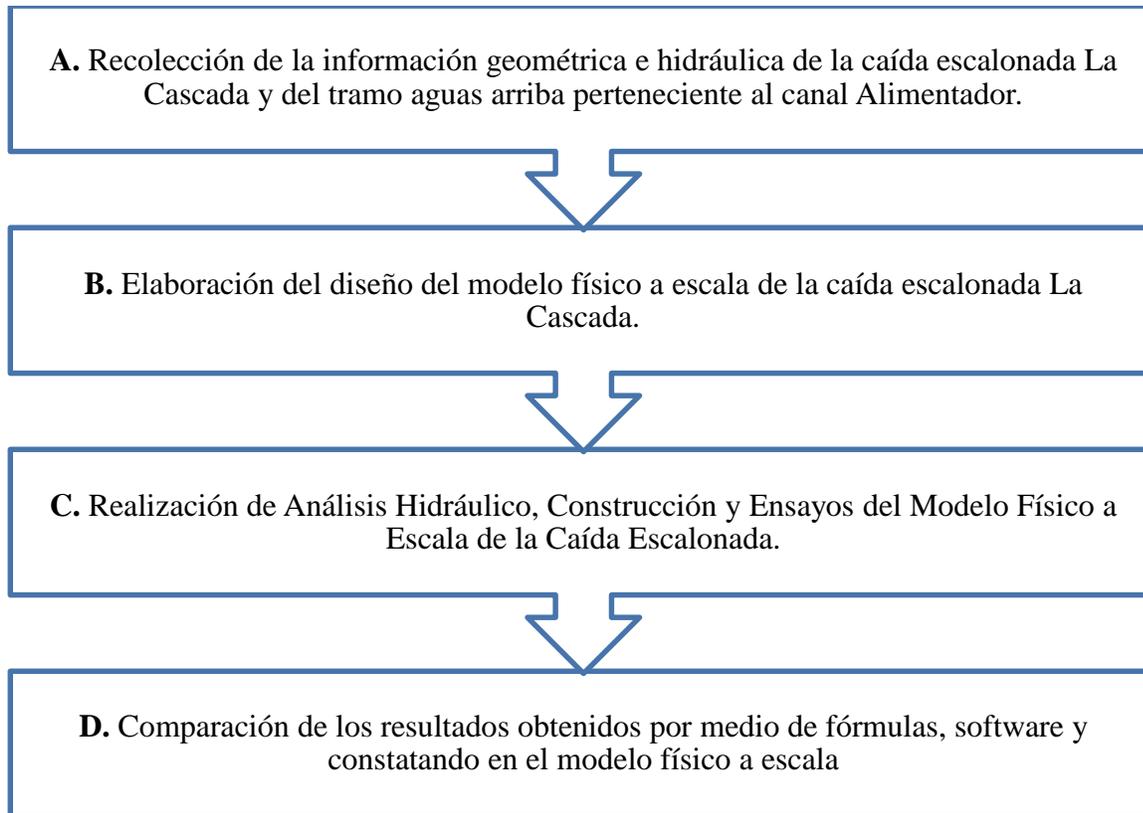
a. Se solicitó información geométrica y hidráulica de La Cascada al PEOT (Proyecto Especial Olmos Tinajones) por medio de una solicitud, que se empleará para la realización de la presente investigación, se presentará la Solicitud N°1 (Ver Anexo N°8).

b. Se utilizó los planos obtenidos en el PEOT para el diseño del modelo físico a escala.

2.5 Procedimientos de Análisis de Datos

2.5.1 Diagrama de Procesos

Tabla 6. Tabla de procesos.



2.5.2 Descripción de Procesos

A. Recolección de la información geométrica e hidráulica de la caída escalonada La Cascada y del tramo aguas arriba perteneciente al canal Alimentador.

A.1. Visita a las oficinas del Proyecto Especial Olmos Tinajones (PEOT)

Se visitará las instalaciones de las oficinas del PEOT en Chiclayo, para solicitar información de La Cascada, se solicitará información geométrica e hidráulica y otras.

Ver Anexo N°8 Solicitud y Anexo N°9 Entrevista.

A.2. Levantamiento topográfico en la Caída escalonada La Cascada. Ver Anexo N°1
Libreta de campo.

Se realizó visitas a campo para inspeccionar el lugar de investigación y hacer un levantamiento topográfico de secciones de La Cascada o de puntos que no se haya obtenido información en las oficinas del PEOT.

El levantamiento topográfico se realizó utilizando wincha.

El proceso de la información obtenida en el levantamiento se realizará en gabinete.

B. Elaboración del diseño del modelo físico a escala de la caída escalonada La Cascada.

B.1. Planos de La Cascada.

Se empleó los Planos de La Cascada obtenidas en las oficinas del PEOT y la información obtenida en campo. Ver Anexo N°45 y Anexo N°1.

B.2. Diseño del Modelo Físico a Escala

Con los planos de La Cascada se realizará la formulación y esbozo del modelo físico a escala en el cual se observará el funcionamiento de la estructura.

El criterio para el diseño final del modelo físico está basado en una estructura metálica tipo mesa para el soporte de la caída escalonada y sus accesorios como son: tuberías y válvulas que suministrarán el agua al equipo, y tanque de almacenamiento o inundamiento entre otros. Ver Anexo N° 44.

B.3. Planificación del Montaje del Equipo y Accesorios

En este objetivo se planificó el tipo de montaje y accesorios que permitirán fijar y dar estabilidad a La Cascada como modelo a escala al momento de realizar los ensayos.

Como accesorios para el montaje se utilizó solamente silicona, tornillos o la combinación de ambos, también es probable la utilización de algún tipo de refuerzo metálico o de plástico para aumentar la estabilidad entre láminas de los escalones. Ver Anexo N° 2.

C. Realización de Análisis Hidráulico, Construcción y Ensayos del Modelo Físico a Escala de la Caída Escalonada.

C.1 Análisis hidráulico de La Cascada.

Se realizó el análisis de las distintas condiciones a la que estará sujeto el modelo físico a escala con fórmulas y usando Excel y el software HEC-RAS.

Los resultados obtenidos en el análisis también se utilizaron para determinar la escala y hacer correcciones en los planos del bosquejo y obtener el diseño final del modelo físico.

C.2 Construcción del Modelo Físico a Escala

Se realizó la adquisición de materiales para la construcción del modelo físico como acrílico, silicona, tornillos, tuberías de PVC de 1", codo 1" (45°-90°), pegamento para PVC, unión universal de 1", abrazaderas de 1", y cortadora de acrílico.

Se realizó un contrato de servicios de una empresa de carpintería metálica para la construcción de la mesa del modelo físico

Se realizó los cortes de las láminas de acrílico según medidas indicadas en los planos del modelo a escala, posteriormente se unirán las piezas de acrílico cortadas a medida, usando silicona, tornillos u otros materiales que permitan fijar y dar estabilidad a las láminas de acrílico.

C.3 Ensayos en el Modelo Físico

Se realizó los ensayos en el modelo físico variando los caudales en porcentajes del caudal máximo de diseño: 15%, 30%, 50%, 75%, 90%, 100% así mismo se superará el caudal máximo para observar el comportamiento del flujo en el caso de eventos extraordinarios en 120%, 140%, 150%.

D. Comparación de los resultados obtenidos por medio de fórmulas, software y constatando en modelo físico a escala.

Se realizó la comparación de los resultados obtenidos con fórmulas y software HEC-RAS y se realizó la constatación con el modelo físico a escala de La Cascada.

Se realizó la validación del diseño hidráulico.

E. Estimación del costo de la evaluación del diseño hidráulico de La Cascada.

Se realizó la cotización de la mesa metálica para el equipo hidráulico en las empresas de servicios de carpintería metálica.

Se realizó la cotización de las planchas de Acrílico en las tiendas distribuidoras de la ciudad de Chiclayo

Se realizó cotización de silicona, tornillos, tuberías de PVC de 1", codo 1" (45°-90°), pegamento para PVC, unión universal de 1", abrazaderas de 1" y cúter.

Se tuvo en cuenta el costo del transporte del material al lugar de armado, costos de pasajes, asesorías externas para la investigación, y costos de mano de obras. Ver Anexo N° 7.

2.5.3. Recursos Humanos

Tabla 7. Recursos Humanos.

Personal	Cantidad	Valor S/.	Total S/.
Técnico de Laboratorio	1	1000	1000
Ingeniero Hidráulico	1	2000	2000
Tesistas	2	2000	4000
Subtotal			7000

Fuente: Elaboración propia

2.5.4. Presupuesto

Tabla 8. Presupuesto.

Detalle	Cantidad	Valor S/.	Total S/.
----------------	-----------------	------------------	------------------

Recursos Humanos	1	7000	7000
Materiales	1	6000	6000
Servicios	1	4000	4000
Subtotal			17000

Fuente: Elaboración propia

2.6. Criterios Éticos

2.6.1 Ética de la Recolección de Datos

Se aplicará formatos de elaboración propia para la evaluación del diseño hidráulico de La Cascada, siendo estos validados por un profesional especialista en Hidráulica. Además, se contará con base teórica actualizada y confidencial, la cual nos servirá como guía para recopilar la información hidráulica del tema en estudio.

2.6.2 Ética de la Publicación

Con los resultados obtenidos, la presente investigación servirá de apoyo para posteriores estudios.

2.6.3 Ética de la Aplicación

La presente investigación generará beneficios tecnológicos, sociales, económicos y ambientales, en beneficio de quién utilizará los resultados de esta investigación.

2.7 Criterios de Rigor Científico

Cuando se habla de calidad de la investigación se alude al rigor metodológico con que se diseñará y desarrollará, y a la confianza que, como consecuencia de ello, se podrá tener en la veracidad de los resultados obtenidos. En general, la idea de calidad de la investigación se asocia por tanto a la credibilidad del trabajo desarrollado. (Cortés & Iglesias, 2004).

2.7.1 Generalidades

Mediante la realización del modelamiento hidráulico se obtuvo la información requerida, para cotejarla con fuentes teóricas y/o software.

2.7.2 Fiabilidad

Todos los estudios realizados en esta investigación son confiables, ya que se ejecutaron según los parámetros de la respectiva norma y asesoramientos brindados por un ingeniero especialista

en Hidráulica. Además, se contó con un óptimo Modelo Físico para la recolección de datos, esto brindó seguridad en la veracidad de los resultados.

2.7.3 Replicabilidad

Los resultados obtenidos en el diseño y modelación de la presente investigación, permanecerán constantes en el tiempo, siempre y cuando sean realizados en laboratorios bien acondicionados e implementados (como el Laboratorio de Hidráulica de la USS).

CAPÍTULO III

RESULTADOS

III.RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la presente investigación realizada empleando una modelación física y se realiza un análisis de los resultados obtenidos desde la obtención de datos hasta de los diferentes ensayos experimentales realizados.

3.1. Resultados en Tablas y Figuras

Se realizó el desarrollo de los objetivos específicos del presente proyecto de investigación a fin de lograr cumplir el objetivo general planteado el cual es: Analizar el flujo Rasante, Transitorio y Saltante para la evaluación del diseño hidráulico de la caída escalonada “La Cascada” del proyecto Tinajones. A continuación, se interpreta los resultados obtenidos por cada objetivo:

3.1.1 Recolección de la información geométrica e hidráulica de la caída escalonada La Cascada

3.1.1.1 Inspección visual de La Caída Escalonada La Cascada.

Se ha realizado una serie de visitas de campo a La Cascada para inspeccionar la zona de estudio, para ver su operación para tomar medidas a las estructuras.

Utilizando una cinta métrica se midió el ancho del canal, teniendo una longitud de 7.95 m, como se observa en la **Figura N° 50**.



Figura N° 50. Medida del ancho del canal.

Según se realizaban las medidas, se anotaba el valor con un lápiz de color en el piso. Como se puede observar en la **Figura N° 51**. También se tomó medida de la altura del canal algo muy

importante para la tomar algunos criterios en el diseño del modelo físico, como se observa en la **Figura N° 52.**



Figura N° 51. Medida del Ancho del Canal $W = 7.95$ m



Figura N° 52. Medida de la altura de pared del canal $h = 2.33$ m

Cada medida realizada se apuntaba en un formato ya preparado anticipadamente, así como el comportamiento de flujo a simple observación.



Figura N° 53. Registro de medidas en formato de levantamiento.

Así también se tomó otras medidas de la estructura.



Figura N° 54. Medida del espesor de la pared lateral del canal $e=0.30$ m.

Se realizó medias adicionales, como se puede observar en el siguiente cuadro.

Tabla 9. Mediciones Adicionales

Elemento	Ancho (m)	Longitud (m)	Altura (m)	Diámetro
Pasarela	1.20	16.30	0.35	
Mochetas	0.40	0.80	1.60	
Tubo de salida				6.00 Pulg.
Puente	4.53	16.30	0.55	

Ver detalle en **Anexo N°1.**

3.1.1.2 Visita a las instalaciones del PEOT

Se realizó una serie de visitas a las Instalaciones de las Oficinas del PEOT (Proyecto Especial Olmos Tinajones) a fin de obtener la información necesaria acerca de la Caída Escalonada La Cascada, para utilizarlo en el diseño y construcción del modelo físico.

Se presentó una Solicitud dirigida al Gerente General del PEOT Ingeniero Juan Moisés Saavedra Jiménez para solicitar la información de manera formal, cumpliendo los protocolos de la institución. para obtener dicha información delegaron al Director del Área de Evaluación de Proyectos (PEOT). Ingeniero Percy Llontop a quien se le realizó una entrevista. Se obtuvo el siguiente resultado.

Tabla 10. Resultados de Entrevista

Descripción	Resultado
Año de construcción	1968 por una empresa alemana
Ubicación	1 km aprox. desde Chongoyape
Caudal de diseño	70 m ³ /s
Periodo de mantenimiento	Una vez al año

Ver detalle en **Anexo N°9**.

En las oficinas del PEOT se sugirió realizar una visita a las oficinas de OPEMA (Oficina de Operación y Mantenimiento del Sistema Mayor Tinajones) el cual se ubica fuera de la ciudad de Chiclayo, En donde se tuvo la atención de un ingeniero representante de OPEMA y nos informó que en dichas oficinas no se encontraba la información geométrica de La Cascada, sugiriendo visitar a las oficinas secundarias que se ubican al costado del ANA y buscar en la planoteca que existe en sus instalaciones para luego solicitar la información requerida, en la cual se encontró los planos de La Caída Escalonada La Cascada. Por medio del Proyecto Especial Olmos Tinajones (PEOT) se obtuvo el Plano Original de La Cascada el cual fue entregado en formato (PDF). Se obtuvo el siguiente resultado.

Tabla 11. Datos obtenidos de La Cascada

Elemento	Dimensión
Altura de toda la caída	42.7 m
Longitud de la caída	225.95 m
Altura de escalón	4.65 m
Ancho de escalón	7.95 m
Largo de escalón	19.30 m

Ver detalle en **Anexo N°45.**

3.1.1.3 Digitalización de los planos obtenidos.

Los planos que fueron otorgado por el PEOT fueron virtuales en Formato PDF posteriormente estos planos se digitalizaron en el software AutoCAD, el cual se puede observar en la siguiente figura y se puede observar de manera general la geometría de La Cascada, además de los detalles de los escalones y sus estructuras de disipación de energía. Para más detalles ver el **Anexo N° 43**. Se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 12. Datos del Plano Digitalizado de La Cascada.

Elemento	Dimensión
Altura de toda la caída	42.7 m
Longitud de la caída	225.95 m
Altura de escalón	4.65 m
Ancho de escalón	7.95 m
Largo de escalón	19.30 m
Altura de umbral de salida	0.95 m
Ancho de umbral de salida	0.60 m
Altura de viga de choque	0.85 m
Ancho de viga de choque	0.60 m
Altura de pared del canal	2.33 m

Ver detalle en **Anexo N°43**.

3.1.2 Diseño del Modelo Físico a escala de la Caída Escalonada La Cascada

3.1.2.1 Diseño del Modelo Físico

Con la información obtenida se elaboró un primer diseño del modelo físico seleccionando la escala 1:75, posteriormente tomando en consideración algunos criterios con respecto al

funcionamiento del modelo físico se elaboró el diseño final del modelo físico quedando con la misma escala antes mencionada, esta escala se seleccionó por representatividad de la estructura y por conveniencia del proceso constructivo de dicho modelo físico. Se puede observar las dimensiones del Modelo Físico de La Cascada a escala 1:75 en la **Tabla 13**.

Tabla 13. Dimensiones del Modelo Físico a Escala.

Elemento	Dimensión a Escala
Altura de toda la caída	1.61 m
Longitud de la caída	3.00 m
Altura de escalón	0.062 m
Ancho de escalón	0.11 m
Ancho total del canal	0.22 m
Largo de escalón	0.26 m
Longitud del depósito de almacenamiento	0.50 m
Ancho del depósito de almacenamiento	0.50 m
Altura del depósito de almacenamiento	0.40 m
Longitud de mesa metálica	4.40 m
Ancho de mesa metálica	1.30 m
Altura de mesa metálica	0.70 m

La selección de los materiales se realizó teniendo en cuenta que éstos sean lo más representativos posibles de la estructura real, pero a la vez estos materiales permitan realizar el análisis del flujo, por lo que representa uno de los obstáculos para lograr las similitudes de la estructura real. El diseño del modelo físico se basó en una estructura de metal como base y

Para una mejor visualización de la forma de la estructura metálica del modelo físico se presenta una vista en 3 dimensiones elaborado en el software AutoCAD como se puede ver en la **Figura N° 57**.

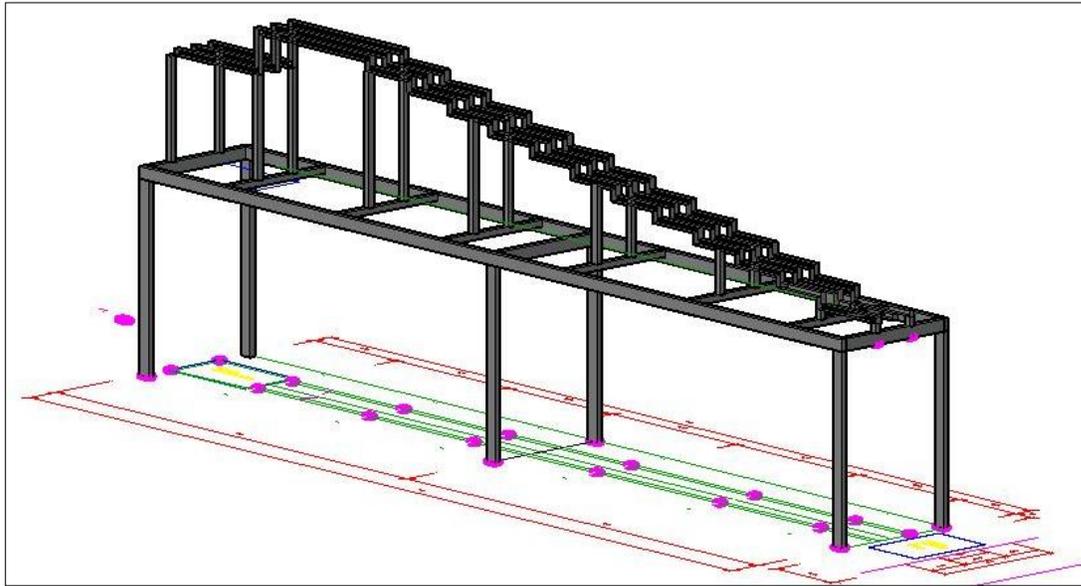


Figura N° 57. Estructura Metálica para el Modelo Físico (AutoCAD 3D).

Se realizó en base al diseño una lista de accesorios necesarios para la construcción del modelo físico a escala de La Cascada. Se obtuvo el siguiente resultado.

Tabla 14. Materiales para construcción del Modelo Físico.

Accesorio	Descripción
Acrílico de 4 mm	Material base del modelo físico a escala
Cortador de acrílico	Instrumento especial que facilita el cortado de acrílico
Tubería PVC 1 pulg	Necesaria para el ingreso de agua al equipo
Codos PVC 1 pulg	Para la dirección de la tubería principal
Mesa metálica	Donde se colocará el modelo físico a escala

Ver detalle en **Anexo N° 2**.

3.1.3. Análisis Hidráulico, Construcción y Ensayos del Modelo Físico a Escala de la Caída Escalonada.

3.1.3.1 Análisis Hidráulico de La Cascada.

3.1.3.1.1 Análisis Hidráulico con Fórmulas.

Se realizó el análisis hidráulico por medio de fórmulas variando el caudal de diseño Q_d con los porcentajes anteriormente indicados, de esta manera se determinó el tipo de flujo y se calculó los tirantes conjugados (y_1 y y_2) y longitud del resalto hidráulico (L_r), longitud de impacto del chorro (L_d), tirante de borde de escalón (y_b), velocidades (V) y Número de Froude (F) por ende se evaluó los parámetros hidráulicos del flujo, los resultados obtenidos se pueden observar en las tablas y figuras que se presentan a continuación.

3.1.3.1.1 Análisis con Fórmulas al 15% (10.5 m³/seg) del Caudal de Diseño.

Tabla 15. Análisis con Fórmulas al 15% (10.5 m³/seg).

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO
CAUDAL AL 15 %

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)				
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
DATOS				
1	Caudal de diseño	Qd	m ³ /seg	70.00
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	15
3	Caudal a evaluar	Qe	m ³ /seg	10.50
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m ³ /seg	5.25
5	Altura de escalón	h	m	4.65
6	Longitud de escalón	l	m	19.30
7	Ancho de escalón	W	m	7.95
8	Longitud de la caída	L	m	225.95
9	Pendiente aguas arriba de la caída.	S		0.001
10	Ancho de Escalón	W	m	7.95
11	Factor de rugosidad de Maning.	n		0.014
12	Altura total de la caída	z	m	45.20
13	Gravedad	g	m/seg ²	9.81
14	Número de escalones	N°e		12
CÁLCULOS				
15	Pendiente del escalón	Θ	°	14
16	Tirante Crítico.	y _c	m	0.35
17	Relación h/l	h/l		0.24
18	Relación yc/h	yc/h		13.13
19	Verificación de Flujo Rasante (Sánchez)	$yc/h < 0.983 - 0.171 \cdot h/l$		Cumple
20	Verificación de Flujo Rasante (Ohtsu y Yasuda)	$yc/h < 0.862 \cdot (h/l)^{-0.165}$		Cumple
21	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 2002)	$yc/h < 1.2 - 0.325 \cdot \text{tg} \Theta$		Cumple
22	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 1994)	$yc/h > 1.057 - 0.465 \cdot h/l$		Cumple
23	Tipo de flujo Saltante		NAP 01	NAPPE 01
24	Tirante Conjugado Menor	y ₁	m	0.09
25	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V ₁	m/seg	7.01
26	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F ₁	Supercrítico	7.29
27	Tirante Conjugado Mayor	y ₂	m	0.96
28	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V ₂	m/seg	0.69
29	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F ₂	Subcrítico	0.22
30	Tirante Normal	y _n	m	0.50
31	Longitud de Resalto	L _r	m	1.11
32	Distancia de Impacto del Chorro	L _d	m	2.48
33	Profundidad del Flujo Aguas Arriba del Chorro de Agua	dp	m	0.85
34	Ángulo de Inclinación del Chorro de Agua	β	°	75
35	Espesor del Chorro de Agua	y _i	m	0.07

ESQUEMA GENERAL DEL DISEÑO DE UN ESCALÓN

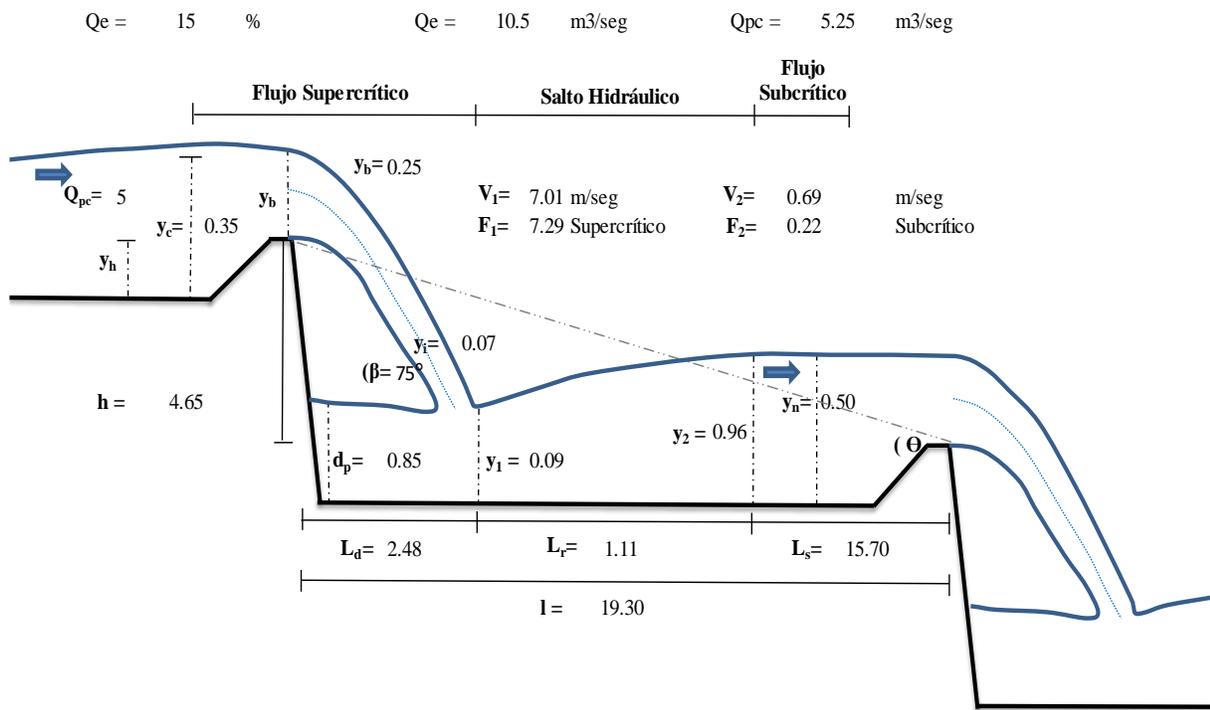


Figura N° 58. Esquema General de un Escalón con caudal al 15% (10.5 m³/seg) del Caudal de Diseño. (Ver Anexo N° 12).

En estos esquemas se presentan los principales parámetros hidráulicos de los escalones con respecto al caudal evaluado.

3.1.3.1.1.2 Análisis con Fórmulas al 30% (21 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Tabla 16. Análisis con Fórmulas al 30% (21 m3/seg).

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO
CAUDAL AL 30 %

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)				
Nº	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
DATOS				
1	Caudal de diseño	Qd	m3/seg	70.00
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	30
3	Caudal a evaluar	Qe	m3/seg	21.00
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m3/seg	10.50
5	Altura de escalón	h	m	4.65
6	Longitud de escalón	l	m	19.30
7	Ancho de escalón	W	m	7.95
8	Longitud de la caída	L	m	225.95
9	Pendiente aguas arriba de la caída.	S		0.001
10	Ancho de Escalón	W	m	7.95
11	Factor de rugosidad de Maning.	n		0.014
12	Altura total de la caída	z	m	45.20
13	Gravedad	g	m/seg ²	9.81
14	Número de escalones	Nºe		12
CÁLCULOS				
15	Pendiente del escalón	Θ	°	14
16	Tirante Crítico.	y_c	m	0.56
17	Relación h/l	h/l		0.24
18	Relación yc/h	yc/h		8.27
19	Verificación de Flujo Rasante (Sánchez)	$yc/h < 0.983 - 0.171 \cdot h/l$		Cumple
20	Verificación de Flujo Rasante (Ohtsu y Yasuda)	$yc/h < 0.862 \cdot (h/l)^{-0.165}$		Cumple
21	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 2002)	$yc/h < 1.2 - 0.325 \cdot \text{tg}\Theta$		Cumple
22	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 1994)	$yc/h > 1.057 - 0.465 \cdot h/l$		Cumple
23	Tipo de flujo Saltante		NAP 01	NAPPE 01
24	Tirante Conjugado Menor	y_1	m	0.17
25	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V_1	m/seg	7.78
26	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F_1	Supercrítico	6.02
27	Tirante Conjugado Mayor	y_2	m	1.39
28	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V_2	m/seg	0.95
29	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F_2	Subcrítico	0.26
30	Tirante Normal	y_n	m	0.78
31	Longitud de Resalto	Lr	m	1.98
32	Distancia de Impacto del Chorro	Ld	m	3.61
33	Profundidad del Flujo Aguas Arriba del Chorro de Agua	dp	m	1.15
34	Ángulo de Inclinación del Chorro de Agua	β	°	71
35	Espesor del Chorro de Agua	yi	m	0.14

ESQUEMA GENERAL DEL DISEÑO DE UN ESCALÓN

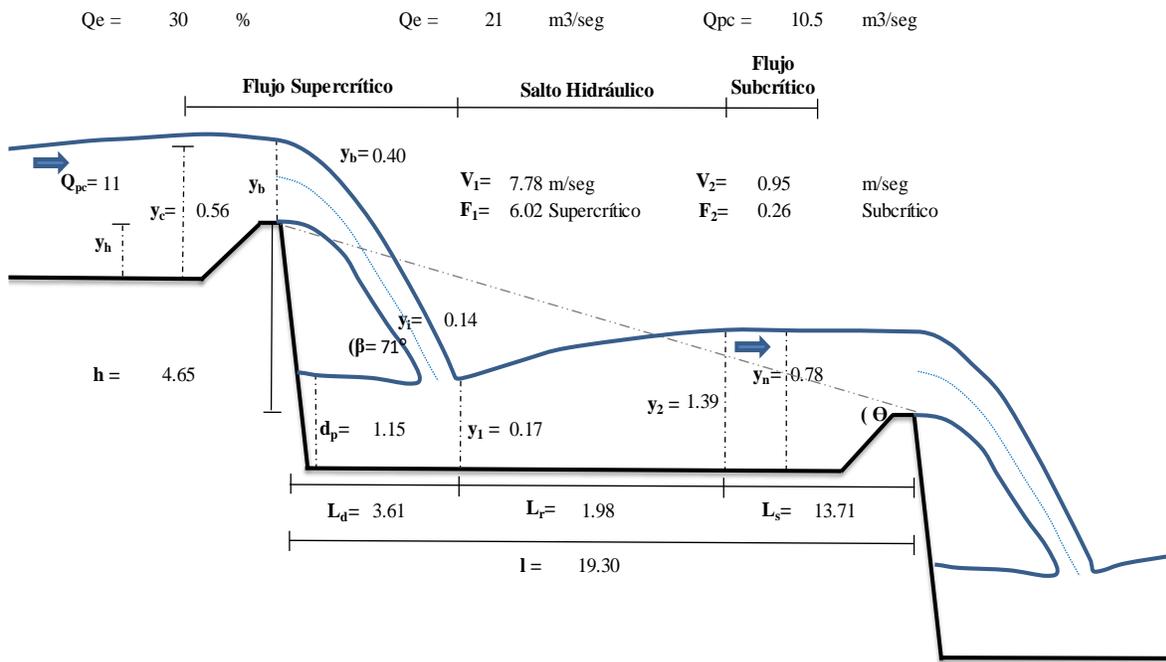


Figura N° 59. Esquema General de un Escalón con caudal al 30% (21 m³/seg) del Caudal de Diseño. (Ver Anexo N° 13).

3.1.3.1.1.3 Análisis con Fórmulas al 50% (35 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Tabla 17. Análisis con Fórmulas al 50% (35 m3/seg).

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO
CAUDAL AL 50 %

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)				
Nº	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
DATOS				
1	Caudal de diseño	Qd	m3/seg	70.00
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	50
3	Caudal a evaluar	Qe	m3/seg	35.00
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m3/seg	17.50
5	Altura de escalón	h	m	4.65
6	Longitud de escalón	l	m	19.30
7	Ancho de escalón	W	m	7.95
8	Longitud de la caída	L	m	225.95
9	Pendiente aguas arriba de la caída.	S		0.001
10	Ancho de Escalón	W	m	7.95
11	Factor de rugosidad de Maning.	n		0.014
12	Altura total de la caída	z	m	45.20
13	Gravedad	g	m/seg ²	9.81
14	Número de escalones	Nºe		12
CÁLCULOS				
15	Pendiente del escalón	Θ	°	14
16	Tirante Crítico.	y_c	m	0.79
17	Relación h/l	h/l		0.24
18	Relación yc/h	yc/h		5.88
19	Verificación de Flujo Rasante (Sánchez)	$yc/h < 0.983 - 0.171 \cdot h/l$		Cumple
20	Verificación de Flujo Rasante (Ohtsu y Yasuda)	$yc/h < 0.862 \cdot (h/l)^{-0.165}$		Cumple
21	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 2002)	$yc/h < 1.2 - 0.325 \cdot \text{tg}\Theta$		Cumple
22	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 1994)	$yc/h > 1.057 - 0.465 \cdot h/l$		Cumple
23	Tipo de flujo Saltante		NAP 01	NAPPE 01
24	Tirante Conjugado Menor	y_1	m	0.26
25	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V_1	m/seg	8.39
26	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F_1	Supercrítico	5.23
27	Tirante Conjugado Mayor	y_2	m	1.84
28	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V_2	m/seg	1.20
29	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F_2	Subcrítico	0.28
30	Tirante Normal	y_n	m	1.08
31	Longitud de Resalto	L_r	m	3.00
32	Distancia de Impacto del Chorro	L_d	m	4.76
33	Profundidad del Flujo Aguas Arriba del Chorro de Agua	dp	m	1.44
34	Ángulo de Inclinación del Chorro de Agua	β	°	67
35	Espesor del Chorro de Agua	y_i	m	0.23

ESQUEMA GENERAL DEL DISEÑO DE UN ESCALÓN

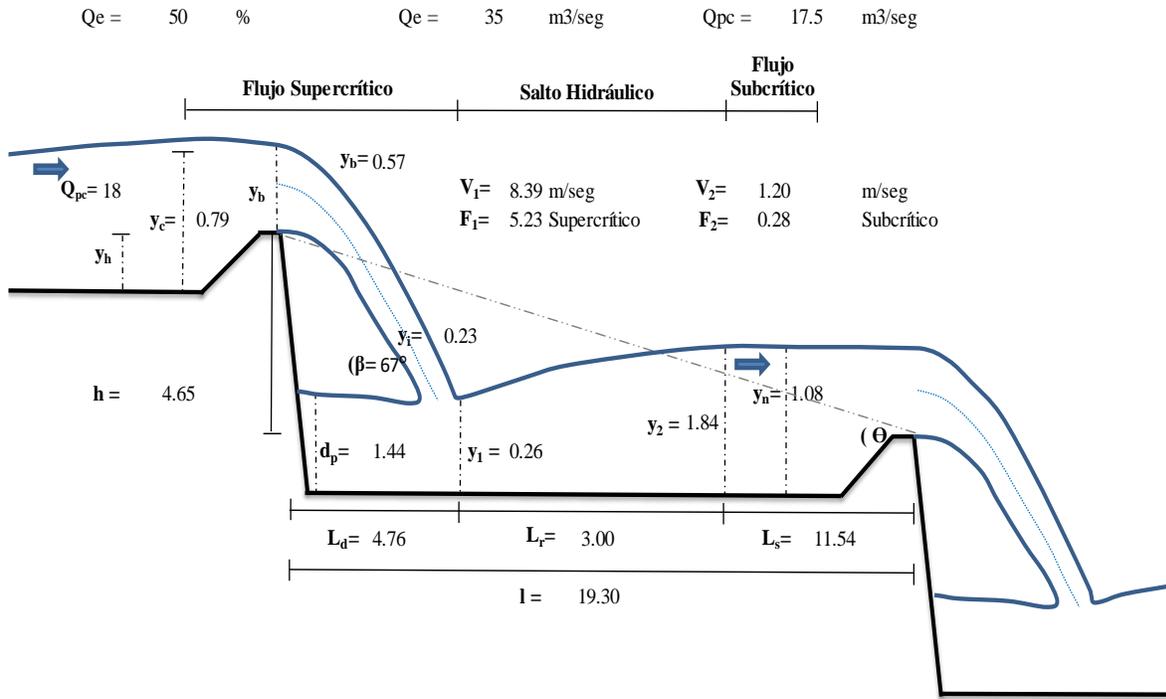


Figura N° 60. Esquema General de un Escalón con Caudal al 50% (35 m³/seg) del Caudal de Diseño. (Ver Anexo N° 14).

3.1.3.1.1.4 Análisis con Fórmulas al 75% (52.5 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Tabla 18. Análisis con Fórmulas al 75% (52.5 m3/seg).

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO
CAUDAL AL 75 %

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)				
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
DATOS				
1	Caudal de diseño	Qd	m3/seg	70.00
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	75
3	Caudal a evaluar	Qe	m3/seg	52.50
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m3/seg	26.25
5	Altura de escalón	h	m	4.65
6	Longitud de escalón	l	m	19.30
7	Ancho de escalón	W	m	7.95
8	Longitud de la caída	L	m	225.95
9	Pendiente aguas arriba de la caída.	S		0.001
10	Ancho de Escalón	W	m	7.95
11	Factor de rugosidad de Maning.	n		0.014
12	Altura total de la caída	z	m	45.20
13	Gravedad	g	m/seg ²	9.81
14	Número de escalones	N°e		12
CÁLCULOS				
15	Pendiente del escalón	Θ	°	14
16	Tirante Crítico.	y _c	m	1.04
17	Relación h/l	h/l		0.24
18	Relación yc/h	yc/h		4.49
19	Verificación de Flujo Rasante (Sánchez)	$yc/h < 0.983 - 0.171 \cdot h/l$		Cumple
20	Verificación de Flujo Rasante (Ohtsu y Yasuda)	$yc/h < 0.862 \cdot (h/l)^{-0.165}$		Cumple
21	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 2002)	$yc/h < 1.2 - 0.325 \cdot \tan \Theta$		Cumple
22	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 1994)	$yc/h > 1.057 - 0.465 \cdot h/l$		Cumple
23	Tipo de flujo Saltante		NAP 01	NAPPE 01
24	Tirante Conjugado Menor	y ₁	m	0.37
25	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V ₁	m/seg	8.92
26	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F ₁	Supercrítico	4.68
27	Tirante Conjugado Mayor	y ₂	m	2.29
28	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V ₂	m/seg	1.44
29	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F ₂	Subcrítico	0.30
30	Tirante Normal	y _n	m	1.42
31	Longitud de Resalto	Lr	m	4.13
32	Distancia de Impacto del Chorro	Ld	m	5.92
33	Profundidad del Flujo Aguas Arriba del Chorro de Agua	dp	m	1.73
34	Ángulo de Inclinación del Chorro de Agua	β	°	64
35	Espesor del Chorro de Agua	y _i	m	0.34

ESQUEMA GENERAL DEL DISEÑO DE UN ESCALÓN

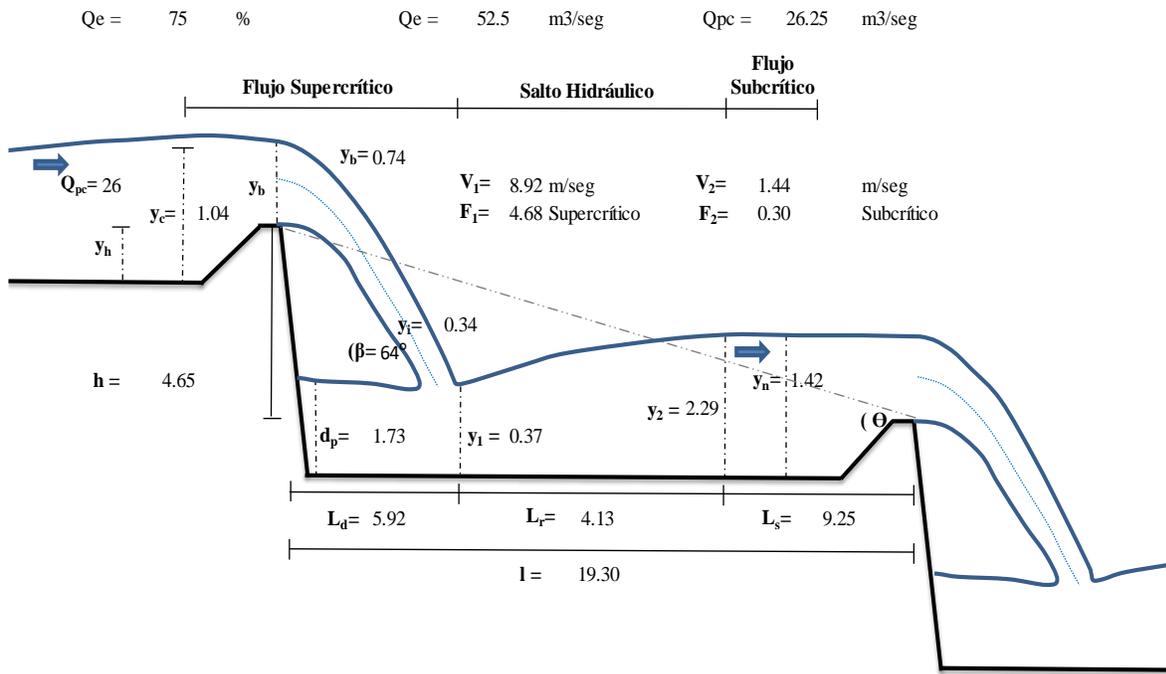


Figura N° 61. Esquema General de un Escalón con Caudal al 75% (52.5 m³/seg) del Caudal de Diseño. (Ver Anexo N° 15).

3.1.3.1.1.5 Análisis con Fórmulas al 90% (63 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Tabla 19. Análisis con Fórmulas al 90% (63 m3/seg).

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO
CAUDAL AL 90 %

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)				
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
DATOS				
1	Caudal de diseño	Qd	m3/seg	70.00
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	90
3	Caudal a evaluar	Qe	m3/seg	63.00
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m3/seg	31.50
5	Altura de escalón	h	m	4.65
6	Longitud de escalón	l	m	19.30
7	Ancho de escalón	W	m	7.95
8	Longitud de la caída	L	m	225.95
9	Pendiente aguas arriba de la caída.	S		0.001
10	Ancho de Escalón	W	m	7.95
11	Factor de rugosidad de Manning	n		0.014
12	Altura total de la caída	z	m	45.20
13	Gravedad	g	m/seg ²	9.81
14	Número de escalones	N°e		12
CÁLCULOS				
15	Pendiente del escalón	Θ	°	14
16	Tirante Crítico.	y_c	m	1.17
17	Relación h/l	h/l		0.24
18	Relación yc/h	yc/h		3.98
19	Verificación de Flujo Rasante (Sánchez)	$yc/h < 0.983 - 0.171 \cdot h/l$		Cumple
20	Verificación de Flujo Rasante (Ohtsu y Yasuda)	$yc/h < 0.862 \cdot (h/l)^{-0.165}$		Cumple
21	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 2002)	$yc/h < 1.2 - 0.325 \cdot \text{tg}\Theta$		Cumple
22	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 1994)	$yc/h > 1.057 - 0.465 \cdot h/l$		Cumple
23	Tipo de flujo Saltante		NAP 01	NAPPE 01
24	Tirante Conjugado Menor	y_1	m	0.43
25	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V_1	m/seg	9.17
26	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F_1	Supercrítico	4.45
27	Tirante Conjugado Mayor	y_2	m	2.52
28	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V_2	m/seg	1.57
29	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F_2	Subcrítico	0.32
30	Tirante Normal	y_n	m	1.60
31	Longitud de Resalto	Lr	m	4.75
32	Distancia de Impacto del Chorro	Ld	m	6.54
33	Profundidad del Flujo Aguas Arriba del Chorro de Agua	dp	m	1.87
34	Ángulo de Inclinación del Chorro de Agua	β	°	62
35	Espesor del Chorro de Agua	y_i	m	0.41

ESQUEMA GENERAL DEL DISEÑO DE UN ESCALÓN

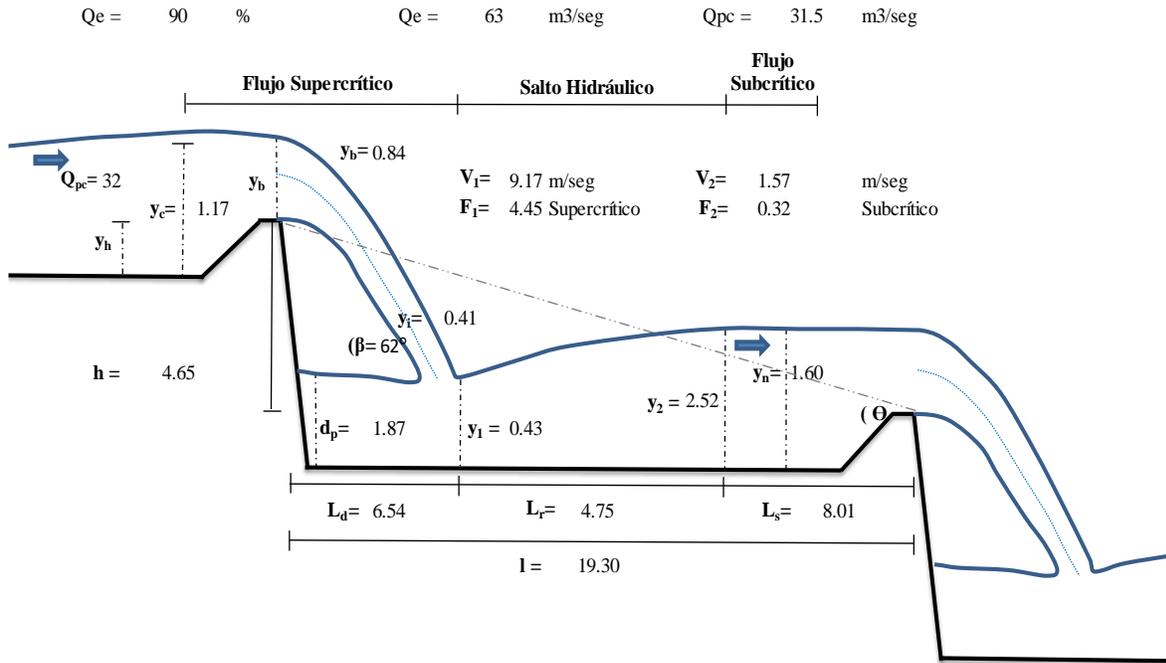


Figura N° 62. Esquema General de un Escalón con Caudal al 90% (63 m³/seg) del Caudal de Diseño. (Ver Anexo N° 16).

3.1.3.1.1.6 Análisis con Fórmulas al 100% (70 m³/seg) del Caudal de Diseño.

Tabla 20. Análisis con Fórmulas al 100% (70 m³/seg).

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO
CAUDAL AL 100 %

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)				
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
DATOS				
1	Caudal de diseño	Qd	m ³ /seg	70.00
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	100
3	Caudal a evaluar	Qe	m ³ /seg	70.00
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m ³ /seg	35.00
5	Altura de escalón	h	m	4.65
6	Longitud de escalón	l	m	19.30
7	Ancho de escalón	W	m	7.95
8	Longitud de la caída	L	m	225.95
9	Pendiente aguas arriba de la caída.	S		0.001
10	Ancho de Escalón	W	m	7.95
11	Factor de rugosidad de Maning.	n		0.014
12	Altura total de la caída	z	m	45.20
13	Gravedad	g	m/seg ²	9.81
14	Número de escalones	N°e		12
CÁLCULOS				
15	Pendiente del escalón	Θ	°	14
16	Tirante Crítico.	y _c	m	1.25
17	Relación h/l	h/l		0.24
18	Relación yc/h	yc/h		3.71
19	Verificación de Flujo Rasante (Sánchez)	$yc/h < 0.983 - 0.171 \cdot h/l$		Cumple
20	Verificación de Flujo Rasante (Ohtsu y Yasuda)	$yc/h < 0.862 \cdot (h/l)^{-0.165}$		Cumple
21	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 2002)	$yc/h < 1.2 - 0.325 \cdot \text{tg} \Theta$		Cumple
22	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 1994)	$yc/h > 1.057 - 0.465 \cdot h/l$		Cumple
23	Tipo de flujo Saltante		NAP 01	NAPPE 01
24	Tirante Conjugado Menor	y ₁	m	0.47
25	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V ₁	m/seg	9.31
26	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F ₁	Supercrítico	4.33
27	Tirante Conjugado Mayor	y ₂	m	2.67
28	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V ₂	m/seg	1.65
29	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F ₂	Subcrítico	0.32
30	Tirante Normal	y _n	m	1.72
31	Longitud de Resalto	Lr	m	5.14
32	Distancia de Impacto del Chorro	Ld	m	6.92
33	Profundidad del Flujo Aguas Arriba del Chorro de Agua	dp	m	1.96
34	Ángulo de Inclinación del Chorro de Agua	β	°	61
35	Espesor del Chorro de Agua	yi	m	0.46

ESQUEMA GENERAL DEL DISEÑO DE UN ESCALÓN

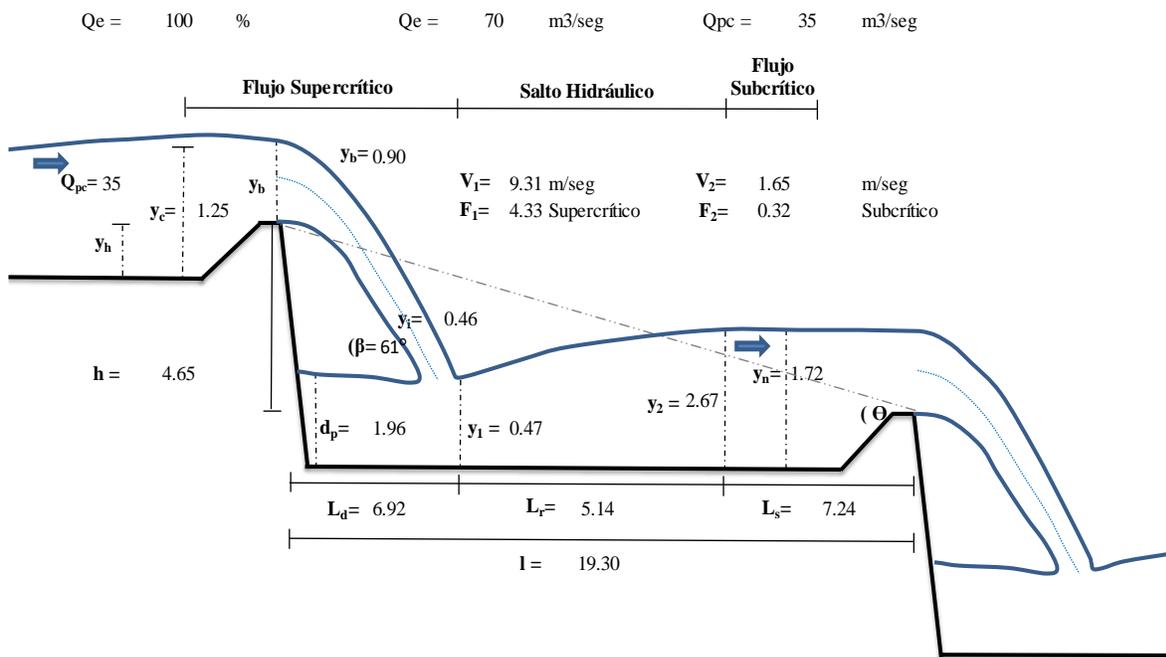


Figura N° 63. Esquema General de un Escalón con Caudal al 100% (70 m3/seg) del Caudal de Diseño. (Ver Anexo N° 17).

3.1.3.1.1.7 Análisis con Fórmulas al 120% (84 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Tabla 21. Análisis con Fórmulas al 120% (84 m3/seg).

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO
CAUDAL AL 120 %

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)				
Nº	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
DATOS				
1	Caudal de diseño	Qd	m3/seg	70.00
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	120
3	Caudal a evaluar	Qe	m3/seg	84.00
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m3/seg	42.00
5	Altura de escalón	h	m	4.65
6	Longitud de escalón	l	m	19.30
7	Ancho de escalón	W	m	7.95
8	Longitud de la caída	L	m	225.95
9	Pendiente aguas arriba de la caída.	S		0.001
10	Ancho de Escalón	W	m	7.95
11	Factor de rugosidad de Maning.	n		0.014
12	Altura total de la caída	z	m	45.20
13	Gravedad	g	m/seg ²	9.81
14	Número de escalones	Nºe		12
CÁLCULOS				
15	Pendiente del escalón	Θ	°	14
16	Tirante Crítico.	y_c	m	1.42
17	Relación h/l	h/l		0.24
18	Relación yc/h	yc/h		3.28
19	Verificación de Flujo Rasante (Sánchez)	$yc/h < 0.983 - 0.171 \cdot h/l$		Cumple
20	Verificación de Flujo Rasante (Ohtsu y Yasuda)	$yc/h < 0.862 \cdot (h/l)^{-0.165}$		Cumple
21	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 2002)	$yc/h < 1.2 - 0.325 \cdot \text{tg} \Theta$		Cumple
22	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 1994)	$yc/h > 1.057 - 0.465 \cdot h/l$		Cumple
23	Tipo de flujo Saltante		NAP 01	NAPPE 01
24	Tirante Conjugado Menor	y_1	m	0.55
25	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V_1	m/seg	9.57
26	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F_1	Supercrítico	4.11
27	Tirante Conjugado Mayor	y_2	m	2.95
28	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V_2	m/seg	1.79
29	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F_2	Subcrítico	0.33
30	Tirante Normal	y_n	m	1.95
31	Longitud de Resalto	Lr	m	5.88
32	Distancia de Impacto del Chorro	Ld	m	7.64
33	Profundidad del Flujo Aguas Arriba del Chorro de Agua	dp	m	2.12
34	Ángulo de Inclinación del Chorro de Agua	β	°	59
35	Espesor del Chorro de Agua	y_i	m	0.55

ESQUEMA GENERAL DEL DISEÑO DE UN ESCALÓN

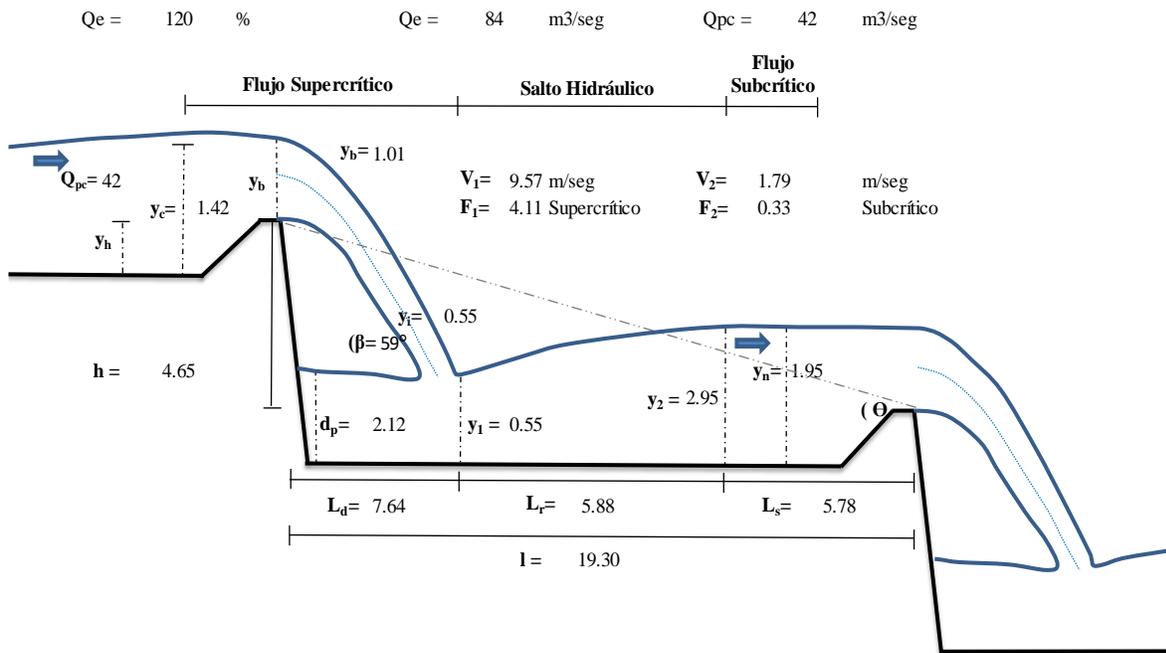


Figura N° 64. Esquema General de un Escalón con Caudal al 120% (84 m³/seg) del Caudal de Diseño. (Ver Anexo N° 18).

3.1.3.1.1.8 Análisis con Fórmulas al 140% (98 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Tabla 22. Análisis con Fórmulas al 140% (98 m3/seg).

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO
CAUDAL AL 140 %

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)				
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
DATOS				
1	Caudal de diseño	Qd	m3/seg	70.00
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	140
3	Caudal a evaluar	Qe	m3/seg	98.00
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m3/seg	49.00
5	Altura de escalón	h	m	4.65
6	Longitud de escalón	l	m	19.30
7	Ancho de escalón	W	m	7.95
8	Longitud de la caída	L	m	225.95
9	Pendiente aguas arriba de la caída.	S		0.001
10	Ancho de Escalón	W	m	7.95
11	Factor de rugosidad de Maning.	n		0.014
12	Altura total de la caída	z	m	45.20
13	Gravedad	g	m/seg ²	9.81
14	Número de escalones	N°e		12
CÁLCULOS				
15	Pendiente del escalón	Θ	°	14
16	Tirante Crítico.	y_c	m	1.57
17	Relación h/l	h/l		0.24
18	Relación yc/h	yc/h		2.96
19	Verificación de Flujo Rasante (Sánchez)	$yc/h < 0.983 - 0.171 \cdot h/l$		Cumple
20	Verificación de Flujo Rasante (Ohtsu y Yasuda)	$yc/h < 0.862 \cdot (h/l)^{-0.165}$		Cumple
21	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 2002)	$yc/h < 1.2 - 0.325 \cdot \text{tg}\Theta$		Cumple
22	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 1994)	$yc/h > 1.057 - 0.465 \cdot h/l$		Cumple
23	Tipo de flujo Saltante		NAP 01	NAPPE 01
24	Tirante Conjugado Menor	y_1	m	0.63
25	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V_1	m/seg	9.80
26	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F_1	Supercrítico	3.94
27	Tirante Conjugado Mayor	y_2	m	3.20
28	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V_2	m/seg	1.92
29	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F_2	Subcrítico	0.34
30	Tirante Normal	y_n	m	2.17
31	Longitud de Resalto	Lr	m	6.56
32	Distancia de Impacto del Chorro	Ld	m	8.30
33	Profundidad del Flujo Aguas Arriba del Chorro de Agua	dp	m	2.27
34	Ángulo de Inclinación del Chorro de Agua	β	°	58
35	Espesor del Chorro de Agua	y_i	m	0.64

ESQUEMA GENERAL DEL DISEÑO DE UN ESCALÓN

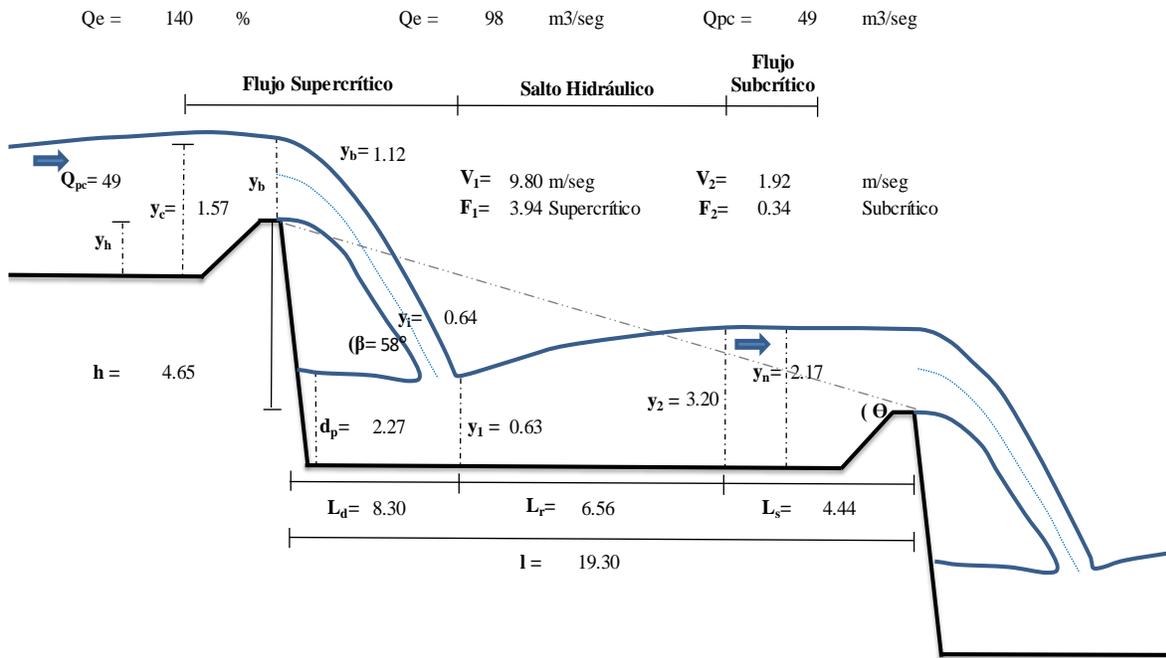


Figura N° 65. Esquema General de un Escalón con Caudal al 140% (98 m³/seg) del Caudal de Diseño. (Ver Anexo N° 19).

3.1.3.1.1.9 Análisis con Fórmulas al 150% (105 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Tabla 23. Análisis con Fórmulas al 150% (105 m3/seg).

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO
CAUDAL AL 150 %

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)				
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
DATOS				
1	Caudal de diseño	Qd	m3/seg	70.00
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	150
3	Caudal a evaluar	Qe	m3/seg	105.00
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m3/seg	52.50
5	Altura de escalón	h	m	4.65
6	Longitud de escalón	l	m	19.30
7	Ancho de escalón	W	m	7.95
8	Longitud de la caída	L	m	225.95
9	Pendiente aguas arriba de la caída.	S		0.001
10	Ancho de Escalón	W	m	7.95
11	Factor de rugosidad de Maning.	n		0.014
12	Altura total de la caída	z	m	45.20
13	Gravedad	g	m/seg ²	9.81
14	Número de escalones	N°e		12
CÁLCULOS				
15	Pendiente del escalón	Θ	°	14
16	Tirante Crítico.	y_c	m	1.64
17	Relación h/l	h/l		0.24
18	Relación yc/h	yc/h		2.83
19	Verificación de Flujo Rasante (Sánchez)	$yc/h < 0.983 - 0.171 \cdot h/l$		Cumple
20	Verificación de Flujo Rasante (Ohtsu y Yasuda)	$yc/h < 0.862 \cdot (h/l)^{-0.165}$		Cumple
21	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 2002)	$yc/h < 1.2 - 0.325 \cdot \text{tg}\Theta$		Cumple
22	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 1994)	$yc/h > 1.057 - 0.465 \cdot h/l$		Cumple
23	Tipo de flujo Saltante		NAP 01	NAPPE 01
24	Tirante Conjugado Menor	y_1	m	0.67
25	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V_1	m/seg	9.90
26	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F_1	Supercrítico	3.87
27	Tirante Conjugado Mayor	y_2	m	3.33
28	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V_2	m/seg	1.99
29	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F_2	Subcrítico	0.35
30	Tirante Normal	y_n	m	2.28
31	Longitud de Resalto	Lr	m	6.88
32	Distancia de Impacto del Chorro	Ld	m	8.61
33	Profundidad del Flujo Aguas Arriba del Chorro de Agua	dp	m	2.34
34	Ángulo de Inclinación del Chorro de Agua	β	°	57
35	Espesor del Chorro de Agua	y_i	m	0.68

ESQUEMA GENERAL DEL DISEÑO DE UN ESCALÓN

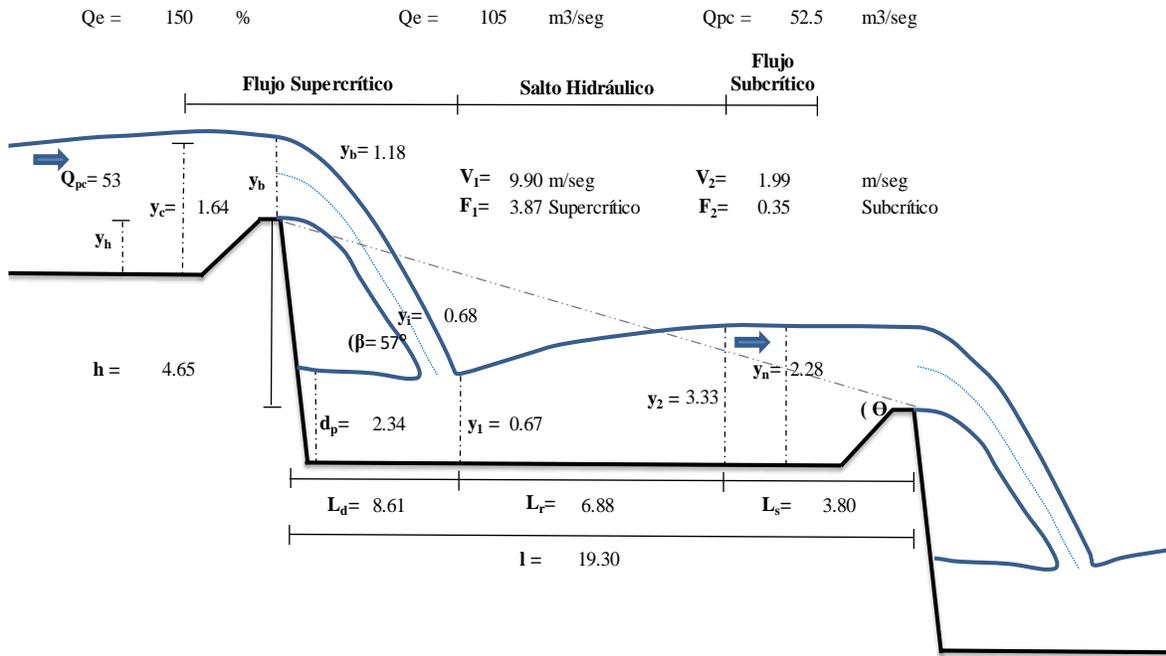


Figura N° 66. Esquema General de un Escalón con Caudal al 150% (105 m³/seg) del Caudal de Diseño. (Ver Anexo N° 20).

En la siguiente tabla se muestra el resumen de los resultados del análisis con fórmulas.

Tabla 24. Resumen de Resultados de Análisis con Fórmulas

RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS CAUDALES EVALUADOS DE LA CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA													
N°	DESCRIPCIÓN	SIMBOLO	UNIDAD	DATOS						Q=100%	Q=120%	Q=140%	Q=150%
				Q=15%	Q=30%	Q=50%	Q=75%	Q=90%	Q=100%				
1	Caudal de diseño	Qd	m ³ /seg	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00	
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	15	30	50	75	90	100	120	140	150	
3	Caudal a evaluar	Qe	m ³ /seg	10.50	21.00	35.00	52.50	63.00	70.00	84.00	98.00	105.00	
4	Caudal a evaluar por canal	Qpc	m ³ /seg	5.25	10.50	17.50	26.25	31.50	35.00	42.00	49.00	52.50	
5	Altura de escalón	h	m	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	
6	Longitud de escalón	l	m	19.30	19.30	19.30	19.30	19.30	19.30	19.30	19.30	19.30	
7	Ancho de escalón	W	m	7.95	7.95	7.95	7.95	7.95	7.95	7.95	7.95	7.95	
8	Longitud de la caída	L	m	225.95	225.95	225.95	225.95	225.95	225.95	225.95	225.95	225.95	
9	Pendiente aguas arriba de la caída	S		0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
10	Ancho de Escalón	W	m	7.95	7.95	7.95	7.95	7.95	7.95	7.95	7.95	7.95	
11	Factor de rugosidad de Manning	n		0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	
12	Altura total de la caída	z	m	45.20	45.20	45.20	45.20	45.20	45.20	45.20	45.20	45.20	
13	Gravedad	g	m/seg ²	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	
14	Numero de escalones	N°e		12	12	12	12	12	12	12	12	12	
CÁLCULOS													
15	Pendiente del escalón	θ	°	14	14	14	14	14	14	14	14	14	
16	Tirante Crítico	yc	m	0.35	0.56	0.79	1.04	1.17	1.25	1.42	1.57	1.64	
17	Relación hl	hl		0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	
18	Relación ych	ych		13.13	8.27	5.88	4.49	3.98	3.71	3.28	2.96	2.83	
19	Verificación de Flujo Rasante (Sánchez)	$yc/h < 0.983 - 0.171 \cdot hl$		Cumple									
20	Verificación de Flujo Rasante (Ollsu y Yasuda)	$yc/h < 0.862 \cdot (h/l)^{-0.165}$		Cumple									
21	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 2002)	$yc/h < 1.2 - 0.325 \cdot \lg \theta$		Cumple									
22	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 1994)	$yc/h > 1.057 - 0.465 \cdot hl$		Cumple									
23	Tipo de flujo	Sobante		NAPPE 01									
24	Tirante Conjugado Menor	y1	m	0.09	0.17	0.26	0.37	0.43	0.47	0.55	0.63	0.67	
25	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V1	m/seg	7.01	7.78	8.39	8.92	9.17	9.31	9.57	9.80	9.90	
26	Numero de Froude en Tirante Conjugado Menor	F1		7.29	6.02	5.23	4.68	4.45	4.33	4.11	3.94	3.87	
27	Tirante Conjugado Mayor	y2	m	0.96	1.39	1.84	2.29	2.52	2.67	2.95	3.20	3.33	
28	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V2	m/seg	0.69	0.95	1.20	1.44	1.57	1.65	1.79	1.92	1.99	
29	Numero de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F2		0.22	0.26	0.28	0.30	0.32	0.32	0.33	0.34	0.35	
30	Tirante Normal	yn	m	0.50	0.78	1.08	1.42	1.60	1.72	1.95	2.17	2.28	
31	Longitud de Resalto	Lr	m	1.11	1.98	3.00	4.13	4.75	5.14	5.88	6.36	6.88	
32	Distancia de Impacto del Chorro	Ld	m	2.48	3.61	4.76	5.92	6.54	6.92	7.64	8.30	8.61	
33	Profundidad del Flujo Aguas Arriba del Chorro de Agua	dp	m	0.85	1.15	1.44	1.73	1.87	1.96	2.12	2.27	2.34	
34	Ángulo de inclinación del Chorro de Agua	β	°	75	71	67	64	62	61	59	58	57	
35	Espesor del Chorro de Agua	si	m	0.07	0.14	0.23	0.34	0.41	0.46	0.55	0.64	0.68	

3.1.3.1.1.10 Diseño Hidráulico de la Caída Escalonada La Cascada.

Se realizó la verificación del diseño hidráulico con la información proporcionada en las oficinas del PEOT, con las cotas y progresivas del canal se realizó la siguiente gráfica **Figura N° 67**, para un mayor entendimiento del inicio del diseño hidráulico, no tomar en cuenta el relieve del terreno ya que para este caso solamente es representativo.

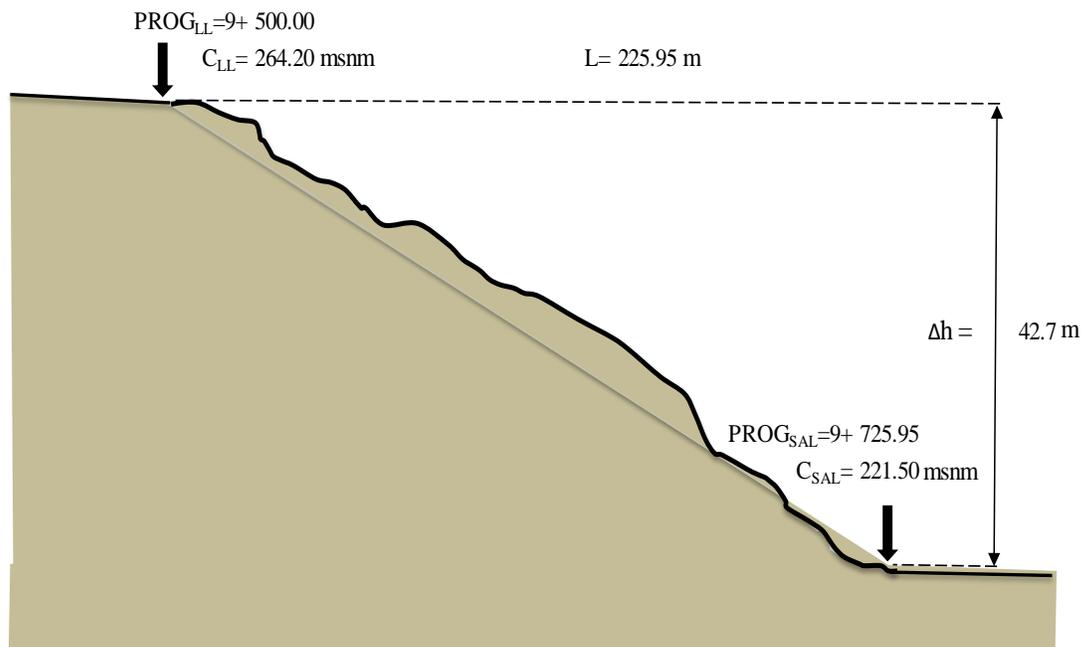
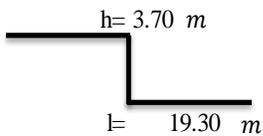


Figura N° 67. Datos Topográficos para el Diseño Hidráulico.

Se realizó el dimensionamiento de los escalones, obteniendo una configuración geométrica de los mismos como se puede observar en la **Figura N° 68**.

Escalón N° 1 - N° 11



Escalón N° 12

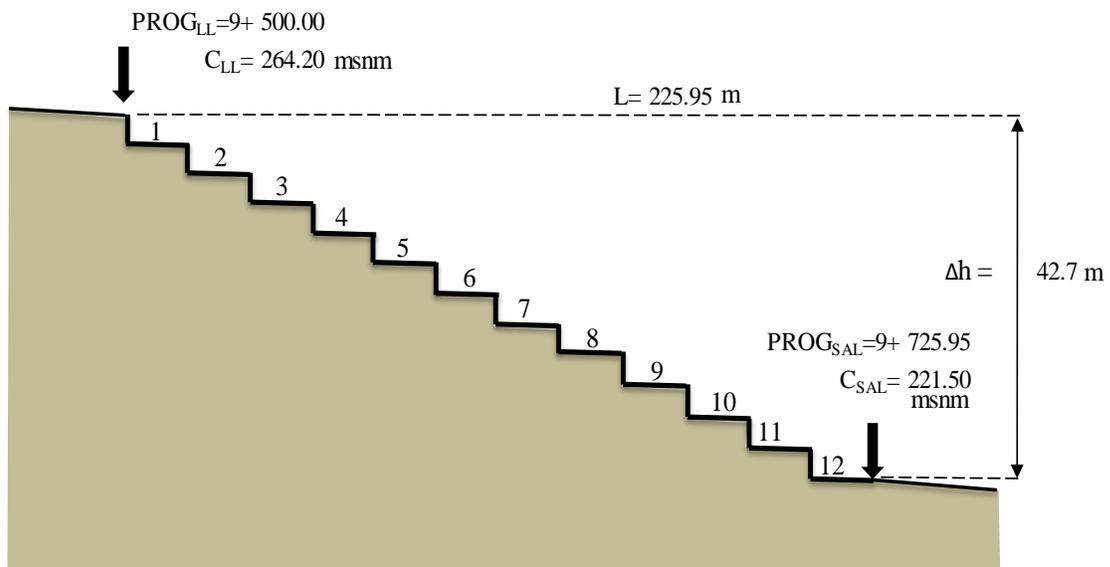
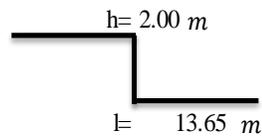


Figura N° 68. Dimensionamiento de Escalones.

Se realizó el diseño del tanque amortiguador o poza de disipación los resultados se pueden observar en la **Figura N° 69**.

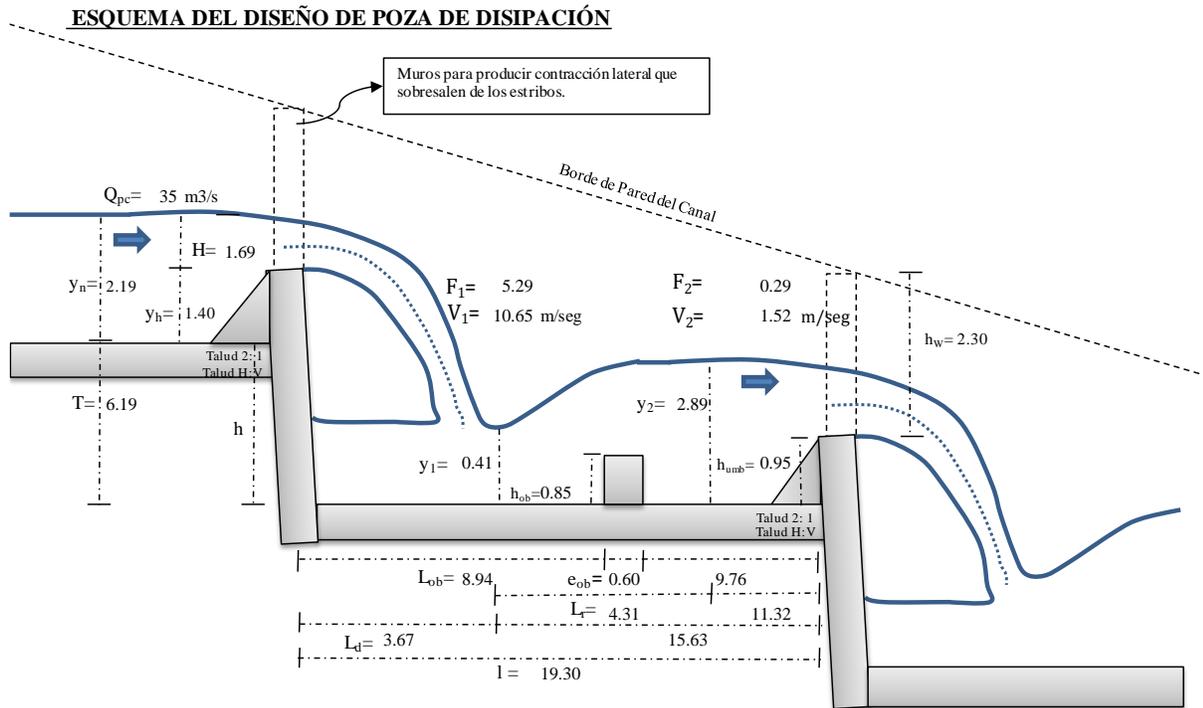


Figura N° 69. Diseño del Tanque Amortiguador.

En resumen, los resultados de la verificación del diseño hidráulico de La Cascada se pueden observar en la **Tabla N° 25** y la **Figura N° 70**, para mayores detalles de los cálculos ver **Anexo N° 35**.

Tabla 25. Cuadro Resumen de Verificación del Diseño Hidráulico de La Cascada.

**RESULTADOS DE VERIFICACIÓN DE DISEÑO HIDRÁULICO)
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO**

RESULTADOS DE VERIFICACIÓN DEL DISEÑO HIDRÁULICO LA CAS CADA				
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
DATOS				
1	Caudal de diseño	Qd	m3/seg	70.00
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	100
3	Caudal a evaluar	Qe	m3/seg	70.00
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m3/seg	35.00
5	Pendiente Natural del Terreno	S _t	m/m	0.19
6	Diferencia de Nivel de Canales	Δh	m	42.70
7	Ancho del canal	W	m	7.95
RESULTADOS				
8	Tirante Crítico y _c	y _c	m	1.25
9	Relación y _c /h (Asumido)	y _c /h (asumido)		0.22
10	Altura o Contrahuella de Escalón de Cálculo	h (cálculo)	m	5.70
11	Altura o Contrahuella de Escalón Óptima	h _{opt}	m	0.38
12	Altura o Contrahuella de Escalón Promedio	h _{promedio}	m	3.04
13	Altura o Contrahuella de Escalón Asumida	h _{asumida}	m	3.70
14	Altura o Contrahuella de Escalones Intermedios	h	m	3.70
15	Altura o Contrahuella de Escalón N° 1	h	m	3.10
16	Altura o Contrahuella de Escalón N° 12	h	m	3.70
17	Longitud o Huella del Escalón de Cálculo	l (cálculo)	m	19.47
18	Longitud o Huella del Escalón Asumida	l (asumida)	m	19.30
19	Longitud o Huella del Escalones Intermedios	l	m	19.30
20	Longitud o Huella del Escalón N° 12	l	m	13.65
21	Pendiente del Escalón	h/l		0.19
22	Número Total de Escalones	N°e		12.00
23	Longitud Total de la Caída	L	m	225.95
24	Tirante Normal	y _n	m	2.19
25	Carga Hidráulica sobre el Vertedero	H	m	1.69
26	Tirante Conjugado Menor	y ₁	m	0.41
27	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V ₁	m/seg	10.65
28	Froude en Tirante Conjugado Menor	F ₁		5.29 Supercrítico
29	Tirante Conjugado Mayor	y ₂	m	2.89
30	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V ₂	m/seg	1.52
31	Froude en Tirante Conjugado Mayor	F ₂		0.29 Subcrítico
32	Longitud de Resalto Hidráulico	Lr	m	4.31
33	Energía Disipada en la Caída Escalonada	ΔE ₁₋₂	m	43.74
34	Tanque Armortiguador USBR			Tipo II
35	Longitud Mínima de Poza de Disipación	Lm	m	13.54
36	Altura de Umbral de Entrada	y _h	m	1.40
37	Altura de Umbral de Salida	y _{umb}	m	0.95
38	Ubicación de los Obstáculos	L _{ob}	m	8.94
39	Altura Óptima de Obstáculos	h _{ob}	m	0.85
40	Espesor de Obstáculos	e _{ob}	m	0.60
41	Altura de Pared del Canal	h _w	m	2.30

3.1.3.1.2 Análisis Hidráulico con Hec Ras.

Con la información geométrica he hidráulica se realizó el análisis del flujo de La Cascada utilizando el software Hec Ras, el análisis del flujo se basó poniendo a prueba los diferentes caudales de acuerdo al caudal de diseño como son 15%, 30%, 50%, 75%, 90%, 100% y superando el caudal de diseño con 120%, 140% y 150%. Se puede apreciar desde Hec Ras las vistas en planta y elevación en la **Figura N° 71** y **Figura N° 72**.

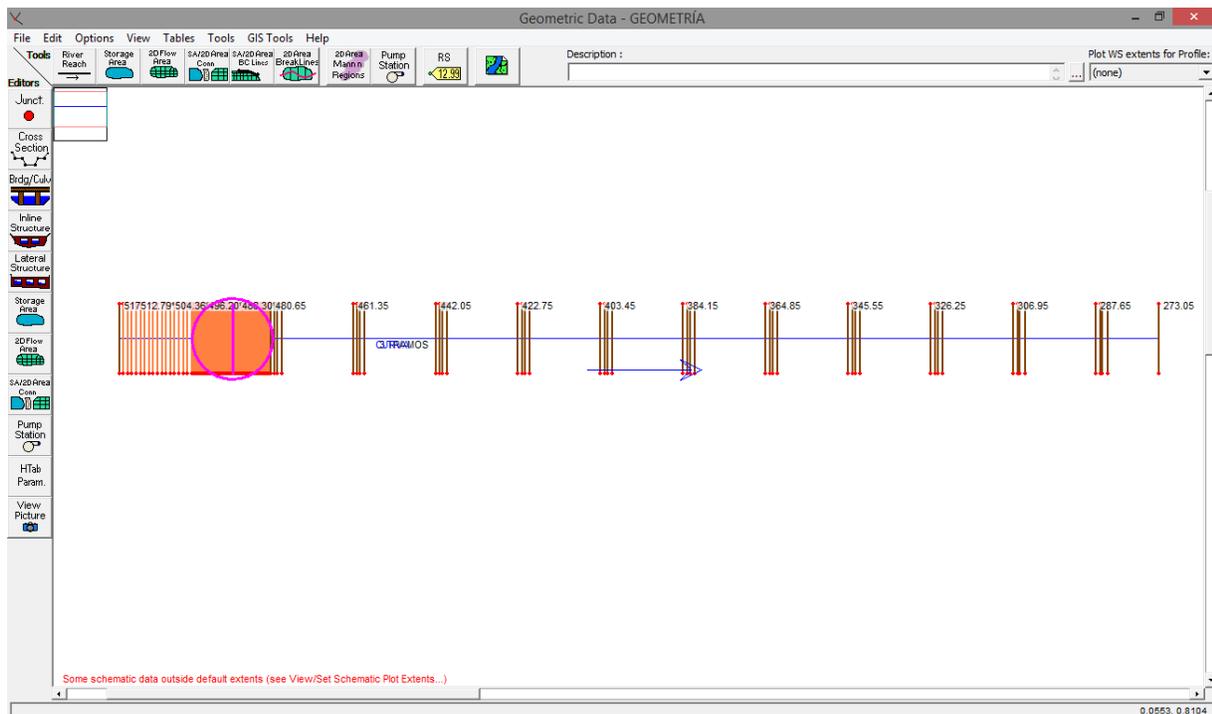


Figura N° 71. Vista en Planta Hec Ras.

La caída escalonada por tener escalones de dimensiones iguales se seleccionó los escalones N° 4, N°6 y escalón N°10 para ser analizados en cada caudal evaluado.

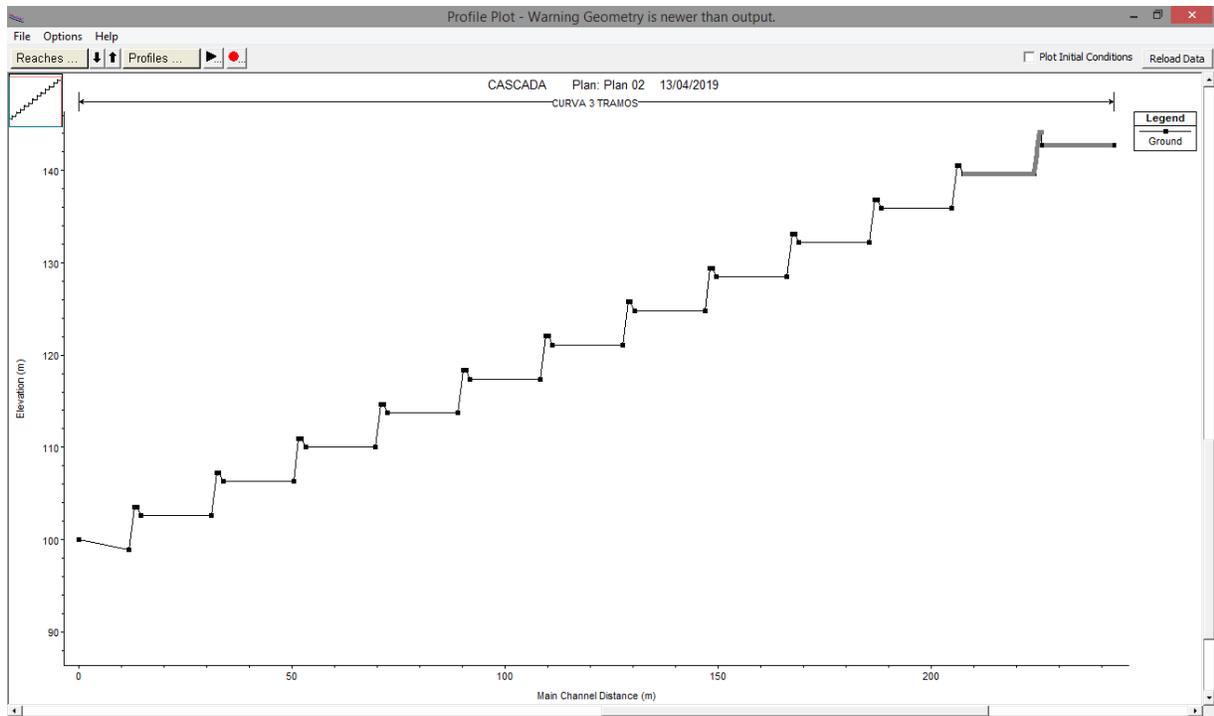


Figura N° 72. Vista en Elevación Hec Ras.

3.1.3.1.2.1 Análisis en Hec Ras al 15 % (10.50 m3/seg) del Caudal de Diseño

Se realizó el análisis del flujo de La Cascada al 15 % del caudal de diseño, para el cual se muestra el perfil de flujo desde el software en la **Figura N° 73** y los detalles del flujo en el **Escalón N° 4** en la **Figura N° 74**, que para esta prueba es igual a los otros dos escalones analizados.

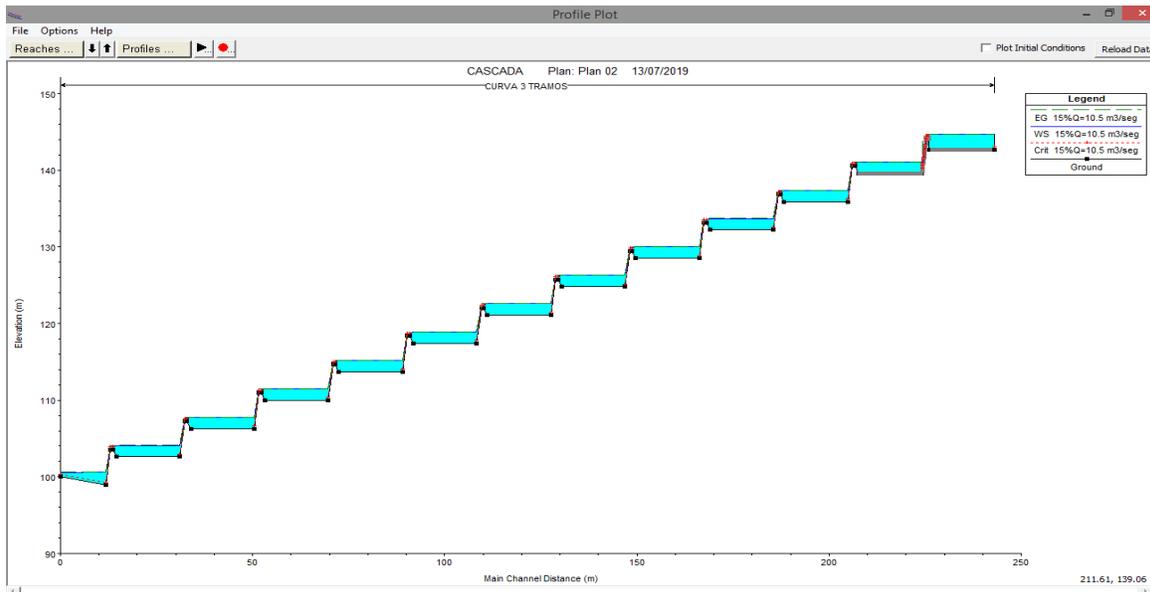


Figura N° 73. Perfil del Flujo del Caudal al 15%

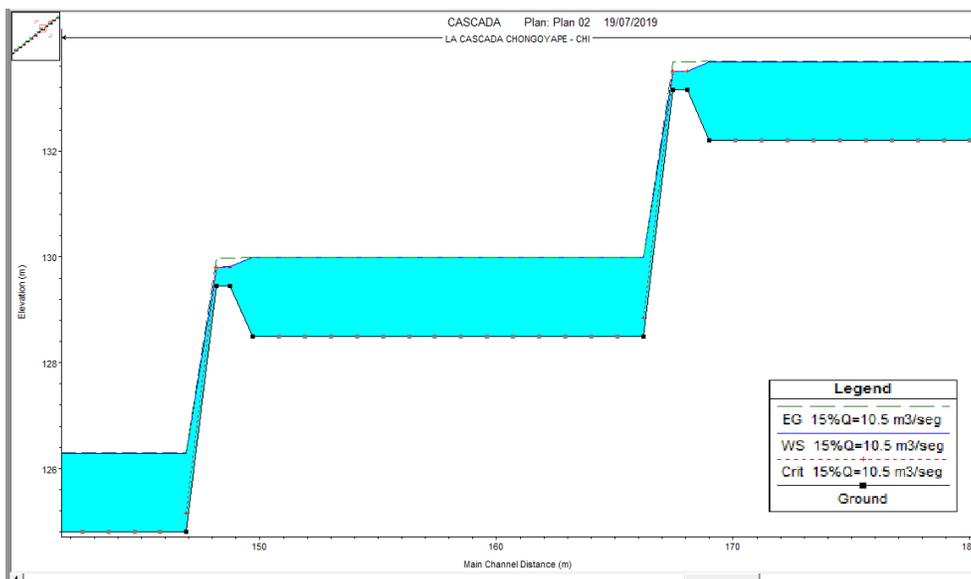


Figura N° 74. Escalón N°4 con caudal al 15 %.

En esta prueba se extrajeron los siguientes resultados para los escalones analizados como valores de tirante hidráulico, velocidad del flujo y Número de Froude estos se muestran en la **Tabla 26**. Para más detalles ver **Anexo N° 37°**.

Tabla 26. Resultados de Hec Ras con Caudal de Diseño al 15%.

Hec Ras – Caudal de Diseño al 15 % (10.50 m3/seg)						
Descripción			Resultados			
			Tirante (m)	Velocidad (m/seg)	Froude	Régimen
Escalón N° 4	Tirante Normal	yn	1.49	0.44	0.12	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	----	----	----	----
	Tirante Mayor	y2	----	----	----	----
	Tirante Borde	yb	0.35	1.87	1.01	Supercrítico
Escalón N° 6	Tirante Normal	yn	1.49	0.44	0.12	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	----	----	----	----
	Tirante Mayor	y2	----	----	----	----
	Tirante Borde	yb	0.35	1.87	1.01	Supercrítico
Escalón N° 10	Tirante Normal	yn	1.49	0.44	0.12	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	----	----	----	----
	Tirante Mayor	y2	----	----	----	----
	Tirante Borde	yb	0.35	1.87	1.01	Supercrítico

3.1.3.1.2.2 Análisis en Hec Ras al 30 % (21 m³/seg) del Caudal de Diseño

Se realizó el análisis del flujo de La Cascada al 30 % del caudal de diseño, para el cual se muestra el perfil de flujo desde el software en la **Figura N° 75** y los detalles del flujo en el **Escalón N° 4** en la **Figura N° 76**, que para esta prueba es igual a los otros dos escalones analizados.

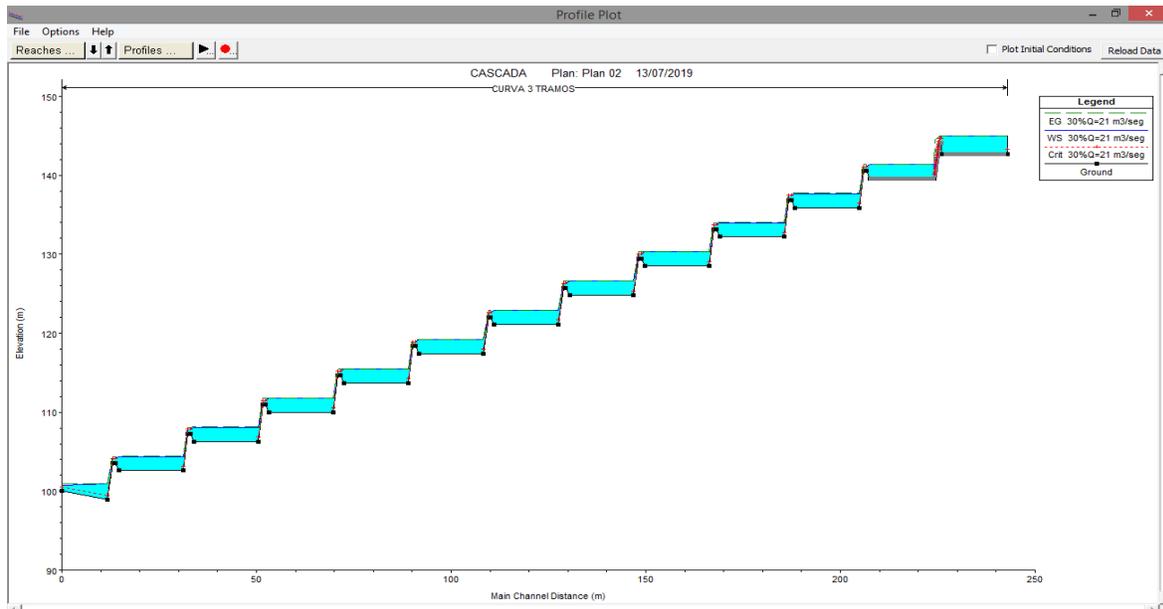


Figura N° 75. Perfil del Flujo del Caudal al 30%.

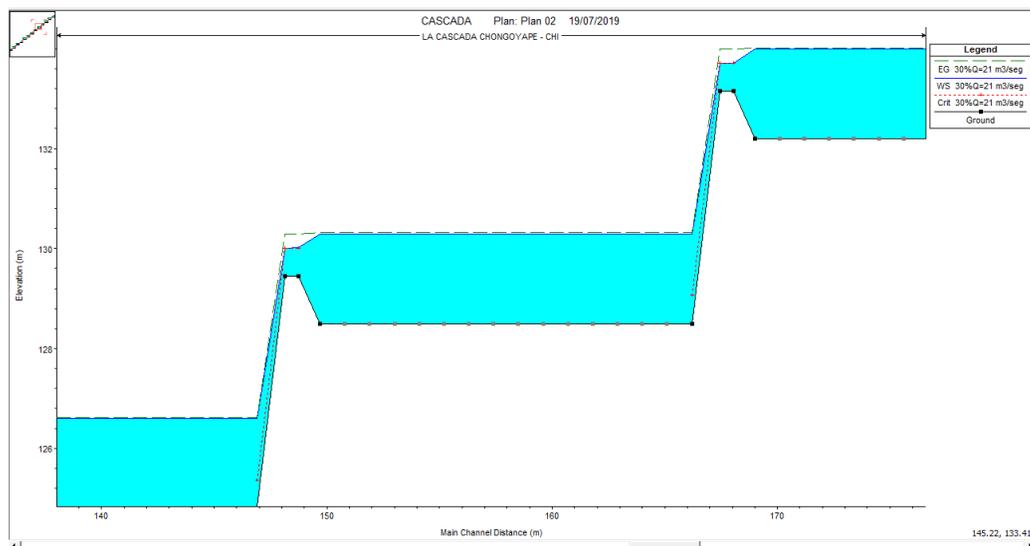


Figura N° 76. Escalón N°4 con caudal al 30 %.

En esta prueba se extrajeron los siguientes resultados para los escalones analizados como valores de tirante hidráulico, velocidad del flujo y Número de Froude estos se muestran en la **Tabla 27**. Para más detalles ver **Anexo N° 37°**.

Tabla 27. Resultados de Hec Ras con Caudal de Diseño al 30%.

Hec Ras – Caudal de Diseño al 30 % (21 m3/seg)						
Descripción			Resultado			
			Tirante (m)	Velocidad (m/seg)	Froude	Régimen
Escalón N° 4	Tirante Normal	yn	1.79	0.74	0.18	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	----	----	----	----
	Tirante Mayor	y2	----	----	----	----
	Tirante Borde	yb	0.56	2.36	1.01	Supercrítico
Escalón N° 6	Tirante Normal	yn	1.79	0.74	0.18	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	----	----	----	----
	Tirante Mayor	y2	----	----	----	----
	Tirante Borde	yb	0.56	2.36	1.01	Supercrítico
Escalón N° 10	Tirante Normal	yn	1.79	0.74	0.18	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	----	----	----	----
	Tirante Mayor	y2	----	----	----	----
	Tirante Borde	yb	0.56	2.36	1.01	Supercrítico

3.1.3.1.2.3 Análisis en Hec Ras al 50 % (35 m³/seg) del Caudal de Diseño

Se realizó el análisis del flujo de La Cascada al 50 % del caudal de diseño, para el cual se muestra el perfil de flujo desde el software en la **Figura N° 77** y los detalles del flujo en el **Escalón N° 4** en la **Figura N° 78**, que para esta prueba es igual a los otros dos escalones analizados.

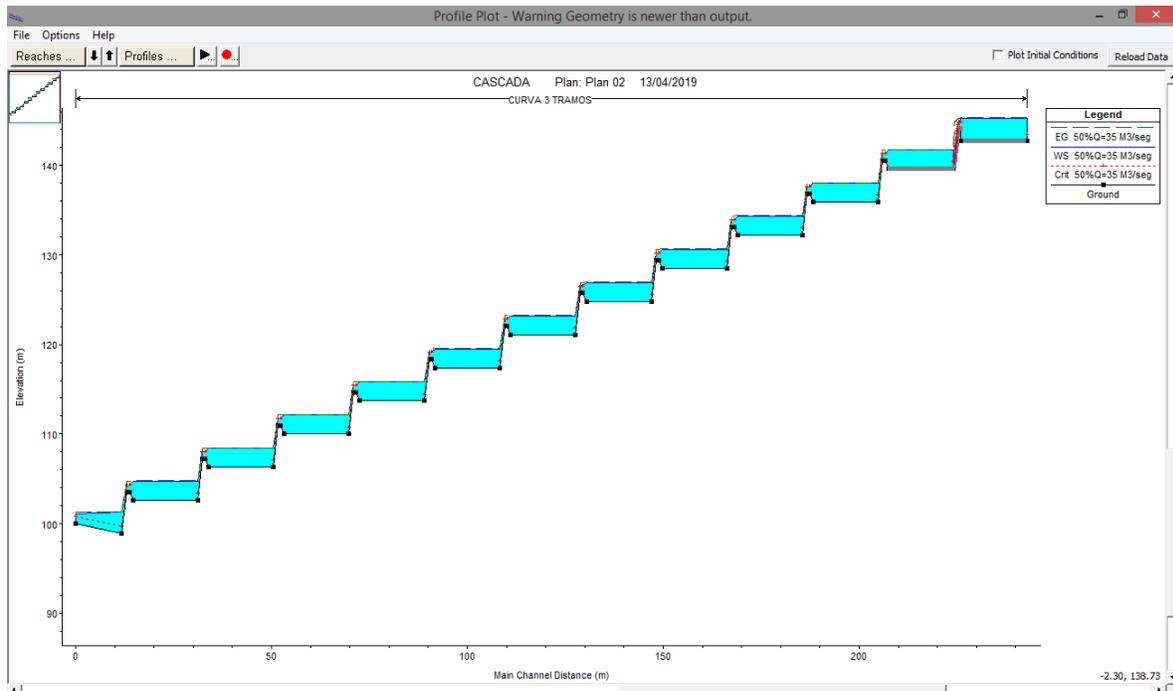


Figura N° 77. Perfil del Flujo del Caudal al 50%.

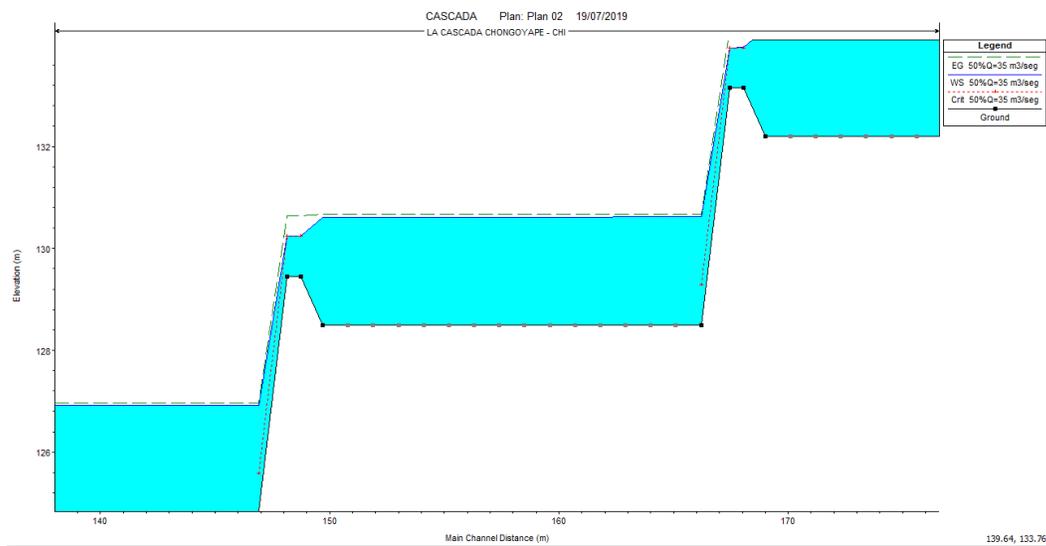


Figura N° 78. Escalón N°4 con caudal al 50 %.

En esta prueba se extrajeron los siguientes resultados para los escalones analizados como valores de tirante hidráulico, velocidad del flujo y Número de Froude estos se muestran en la **Tabla 28**. Para más detalles ver **Anexo N° 37°**.

Tabla 28. Resultados de Hec Ras con Caudal de Diseño al 50%.

Hec Ras – Caudal de Diseño al 50 % (35 m3/seg)						
Descripción			Resultado			
			Tirante (m)	Velocidad (m/seg)	Froude	Régimen
Escalón N° 4	Tirante Normal	yn	2.12	1.04	0.23	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	----	----	----	----
	Tirante Mayor	y2	----	----	----	----
	Tirante Borde	yb	0.79	2.79	1.01	Supercrítico
Escalón N° 6	Tirante Normal	yn	2.12	1.04	0.23	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	----	----	----	----
	Tirante Mayor	y2	----	----	----	----
	Tirante Borde	yb	0.79	2.79	1.01	Supercrítico
Escalón N° 10	Tirante Normal	yn	2.12	1.04	0.23	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	----	----	----	----
	Tirante Mayor	y2	----	----	----	----
	Tirante Borde	yb	0.79	2.79	1.01	Supercrítico

3.1.3.1.2.4 Análisis en Hec Ras al 75 % (52.50 m³/seg) del Caudal de Diseño

Se realizó el análisis del flujo de La Cascada al 75 % del caudal de diseño, para el cual se muestra el perfil de flujo desde el software en la **Figura N° 79** y los detalles del flujo en el **Escalón N° 4** en la **Figura N° 80**, que para esta prueba es igual a los otros dos escalones analizados.

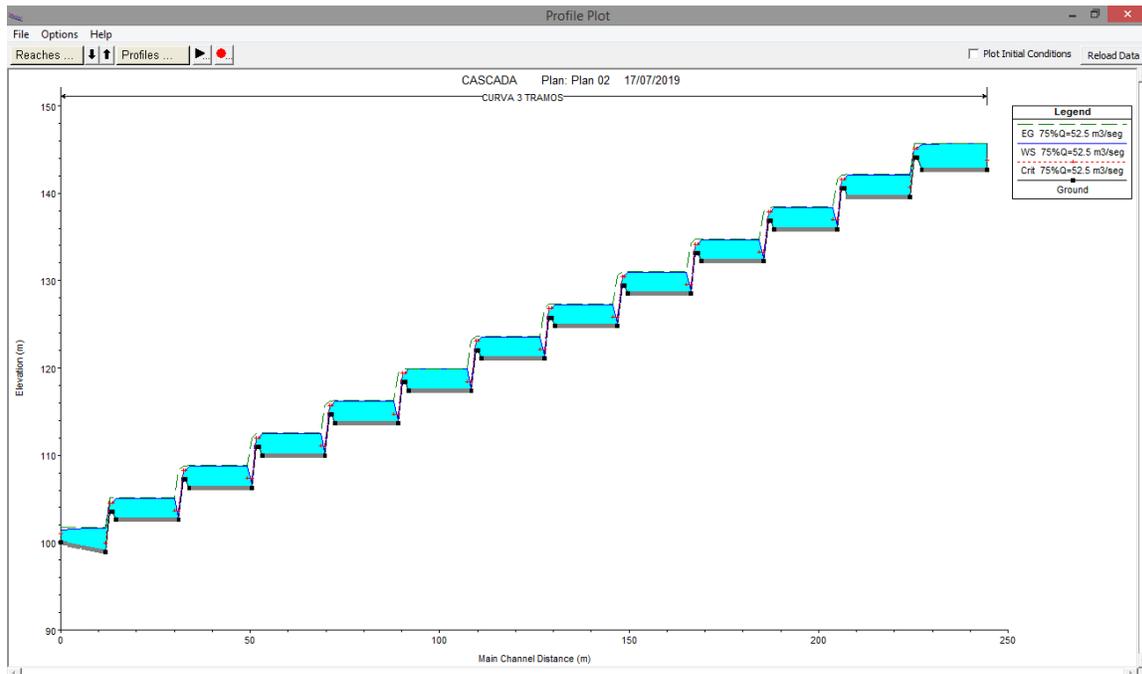


Figura N° 79. Perfil del Flujo del Caudal al 75%.

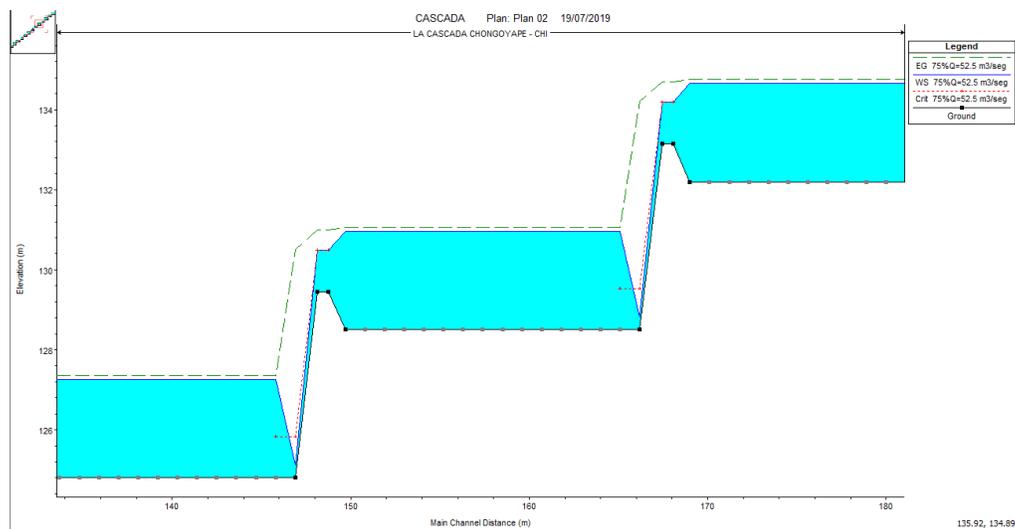


Figura N° 80. Escalón N°4 con caudal al 75 %.

En esta prueba se extrajeron los siguientes resultados para los escalones analizados como valores de tirante hidráulico, velocidad del flujo y Número de Froude estos se muestran en la **Tabla 29**. Para más detalles ver **Anexo N° 37°**.

Tabla 29. Resultados de Hec Ras con Caudal de Diseño al 75%.

Hec Ras – Caudal de Diseño al 75 % (52.5 m3/seg)						
Descripción			Resultado			
			Tirante (m)	Velocidad (m/seg)	Froude	Régimen
Escalón N° 4	Tirante Normal	yn	2.46	1.34	0.27	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	0.32	10.28	5.79	Supercrítico
	Tirante Mayor	y2	2.46	1.34	0.27	Subcrítico
	Tirante Borde	yb	1.03	3.20	1.00	Supercrítico
Escalón N° 6	Tirante Normal	yn	2.46	1.34	0.27	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	0.32	10.28	5.79	Supercrítico
	Tirante Mayor	y2	2.46	1.34	0.27	Subcrítico
	Tirante Borde	yb	1.03	3.20	1.00	Supercrítico
Escalón N° 10	Tirante Normal	yn	2.46	1.34	0.27	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	0.32	10.28	5.79	Supercrítico
	Tirante Mayor	y2	2.46	1.34	0.27	Subcrítico
	Tirante Borde	yb	1.03	3.20	1.00	Supercrítico
Longitud de Resalto			Lr			
Escalón N° 4			1.10 m			
Escalón N° 6			1.10 m			
Escalón N° 10			1.10 m			

3.1.3.1.2.5 Análisis en Hec Ras al 90 % (63 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Se realizó el análisis del flujo de La Cascada al 90 % del caudal de diseño, para el cual se muestra el perfil de flujo desde el software en la **Figura N° 81** y los detalles del flujo en el **Escalón N° 4** en la **Figura N° 82**, que para esta prueba es igual a los otros dos escalones analizados.

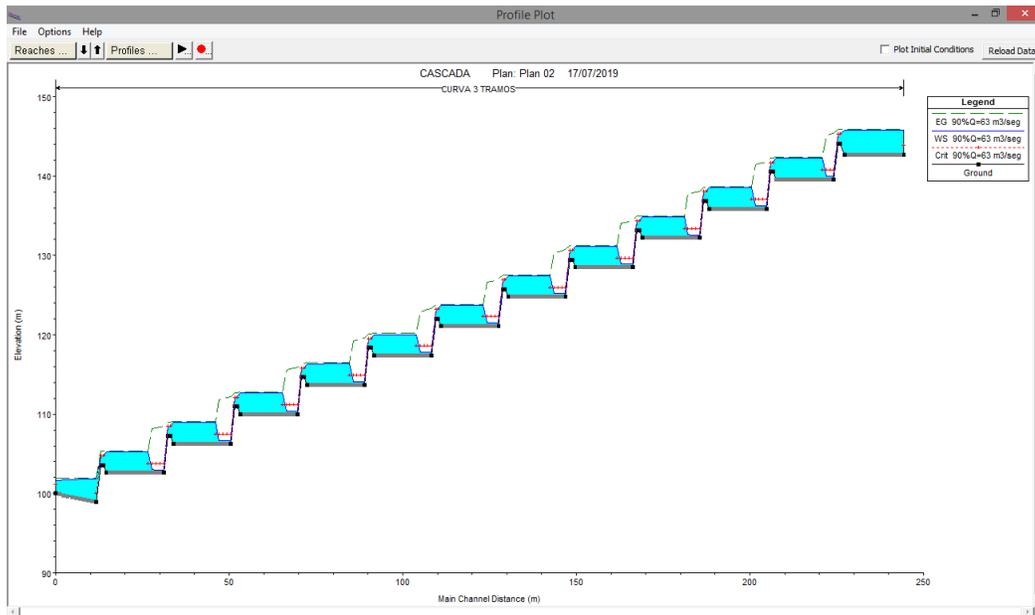


Figura N° 81. Perfil del Flujo del Caudal al 90%.

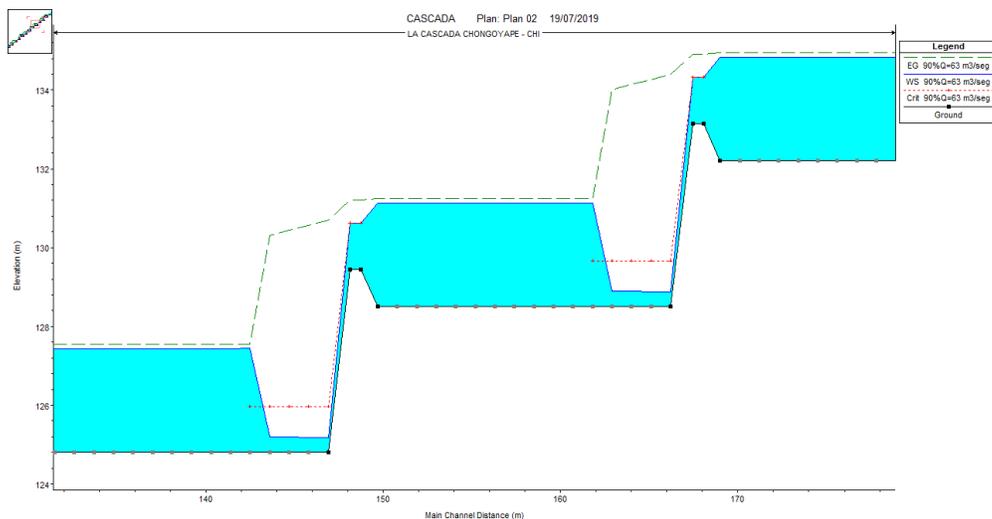


Figura N° 82. Escalón N° 4 con caudal al 90 %.

En esta prueba se extrajeron los siguientes resultados para los escalones analizados como valores de tirante hidráulico, velocidad del flujo y Número de Froude estos se muestran en la **Tabla 30**. Para más detalles ver **Anexo N° 37°**.

Tabla 30. Resultados de Hec Ras con Caudal de Diseño al 90%.

Hec Ras – Caudal de Diseño al 90 % (63 m³/seg)						
Descripción			Resultado			
			Tirante (m)	Velocidad (m/seg)	Froude	Régimen
Escalón N° 4	Tirante Normal	yn	2.64	1.50	0.30	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	0.38	10.41	5.39	Supercrítico
	Tirante Mayor	y2	2.64	1.50	0.30	Subcrítico
	Tirante Borde	yb	1.17	3.40	1.00	Supercrítico
Escalón N° 6	Tirante Normal	yn	2.64	1.50	0.30	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	0.38	10.41	5.39	Supercrítico
	Tirante Mayor	y2	2.64	1.50	0.30	Subcrítico
	Tirante Borde	yb	1.17	3.40	1.00	Supercrítico
Escalón N° 10	Tirante Normal	yn	2.64	1.50	0.30	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	0.38	10.41	5.39	Supercrítico
	Tirante Mayor	y2	2.64	1.50	0.30	Subcrítico
	Tirante Borde	yb	1.17	3.40	1.00	Supercrítico
Longitud de Resalto			Lr			
Escalón N° 4			4.40 m			
Escalón N° 6			4.40 m			
Escalón N° 10			4.40 m			

3.1.3.1.2.6 Análisis en Hec Ras al 100 % (70 m3/seg) del Caudal de Diseño

Se realizó el análisis del flujo de La Cascada al 100 % del caudal de diseño, para el cual se muestra el perfil de flujo desde el software en la **Figura N° 83** y los detalles del flujo en el **Escalón N° 4** en la **Figura N° 84**, que para esta prueba es igual a los otros dos escalones analizados.

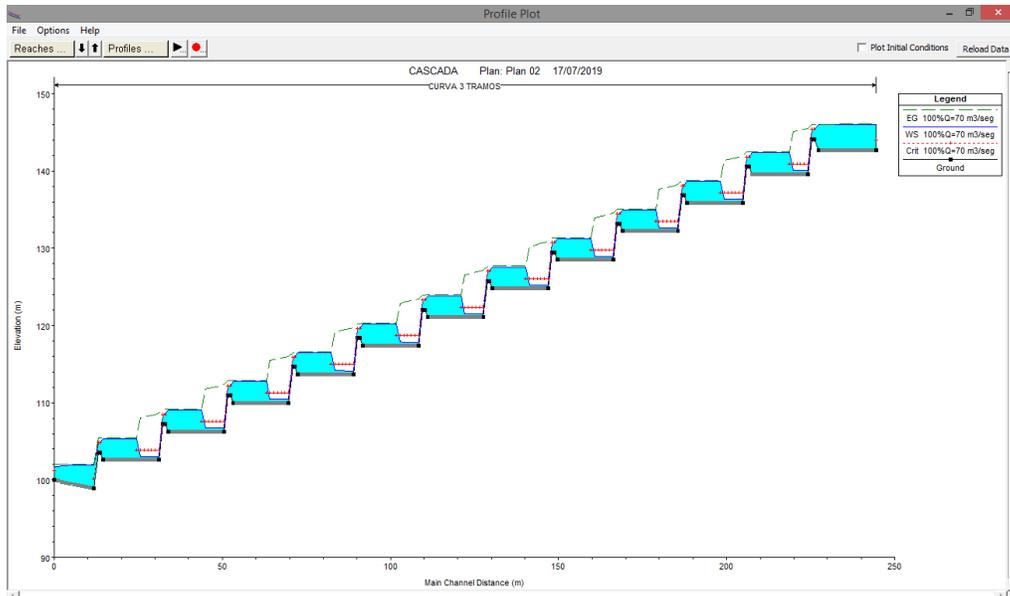


Figura N° 83. Perfil del Flujo del Caudal al 100%.

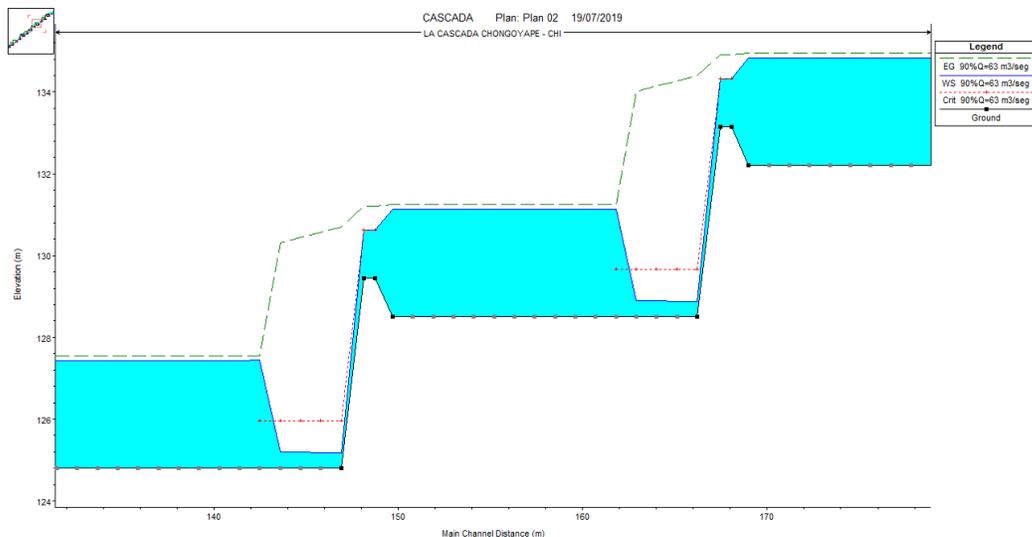


Figura N° 84. Escalón N°4 con caudal al 100 %.

En esta prueba se extrajeron los siguientes resultados para los escalones analizados como valores de tirante hidráulico, velocidad del flujo y Número de Froude estos se muestran en la **Tabla 31**. Para más detalles ver **Anexo N° 37°**.

Tabla 31. Resultados de Hec Ras con Caudal de Diseño al 100%.

Hec Ras – Caudal de Diseño al 100 % (70 m³/seg)						
Descripción			Resultado			
			Tirante (m)	Velocidad (m/seg)	Froude	Régimen
Escalón N° 4	Tirante Normal	yn	2.75	1.60	0.31	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	0.42	10.49	5.17	Supercrítico
	Tirante Mayor	y2	2.75	1.60	0.31	Subcrítico
	Tirante Borde	yb	1.25	3.52	1.00	Supercrítico
Escalón N° 6	Tirante Normal	yn	2.75	1.60	0.31	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	0.42	10.49	5.17	Supercrítico
	Tirante Mayor	y2	2.75	1.60	0.31	Subcrítico
	Tirante Borde	yb	1.25	3.52	1.00	Supercrítico
Escalón N° 10	Tirante Normal	yn	2.75	1.60	0.31	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	0.42	10.49	5.17	Supercrítico
	Tirante Mayor	y2	2.75	1.60	0.31	Subcrítico
	Tirante Borde	yb	1.25	3.52	1.00	Supercrítico
Longitud de Resalto			Lr			
Escalón N° 4			5.50 m			
Escalón N° 6			5.50 m			
Escalón N° 10			5.50 m			

3.1.3.1.2.7 Análisis en Hec Ras al 120 % (84 m3/seg) del Caudal de Diseño

Se realizó el análisis del flujo de La Cascada al 120 % del caudal de diseño, para el cual se muestra el perfil de flujo desde el software en la **Figura N° 85** y los detalles del flujo en el **Escalón N° 4** en la **Figura N° 86**, que para esta prueba es igual a los otros dos escalones analizados.

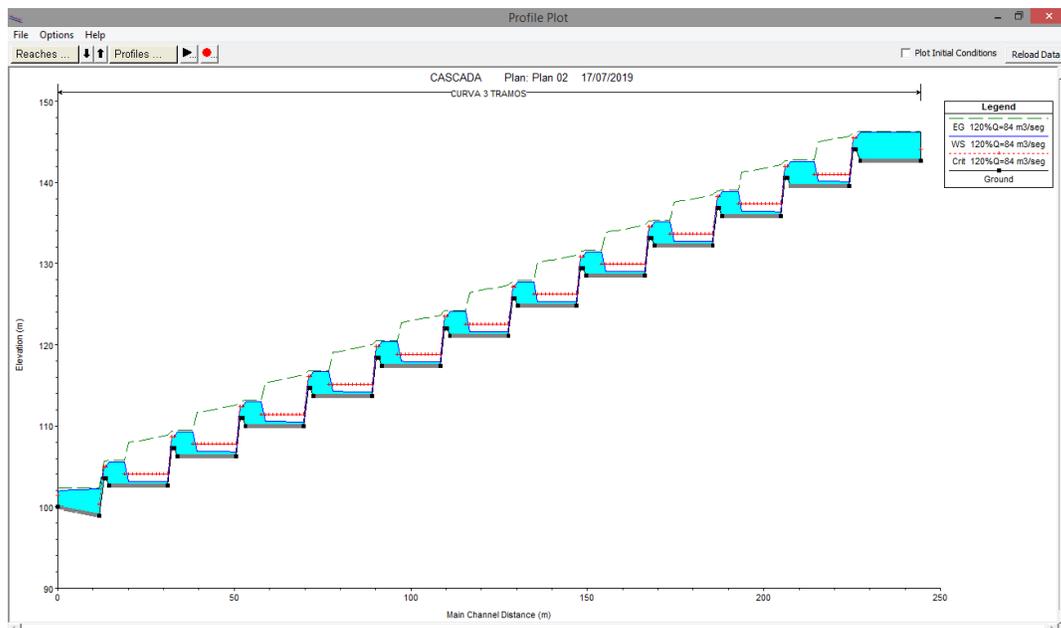


Figura N° 85. Perfil del Flujo del Caudal al 120%.

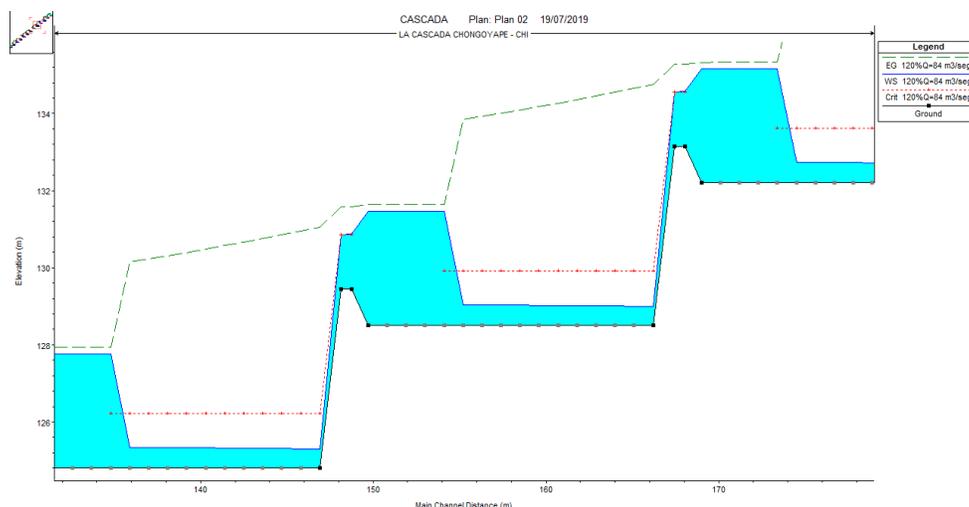


Figura N° 86. Escalón N°4 con caudal al 120 %.

En esta prueba se extrajeron los siguientes resultados para los escalones analizados como valores de tirante hidráulico, velocidad del flujo y Número de Froude estos se muestran en la **Tabla 32**. Para más detalles ver **Anexo N° 37°**.

Tabla 32. Resultados de Hec Ras con Caudal de Diseño al 120%.

Hec Ras – Caudal de Diseño al 120 % (84 m³/seg)						
Descripción			Resultado			
			Tirante (m)	Velocidad (m/seg)	Froude	Régimen
Escalón N° 4	Tirante Normal	yn	2.97	1.78	0.33	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	0.5	10.63	4.82	Supercrítico
	Tirante Mayor	y2	2.97	1.78	0.33	Subcrítico
	Tirante Borde	yb	1.41	3.74	1.00	Supercrítico
Escalón N° 6	Tirante Normal	yn	2.97	1.78	0.33	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	0.5	10.63	4.82	Supercrítico
	Tirante Mayor	y2	2.97	1.78	0.33	Subcrítico
	Tirante Borde	yb	1.41	3.74	1.00	Supercrítico
Escalón N° 10	Tirante Normal	yn	2.97	1.78	0.33	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	0.5	10.63	4.82	Supercrítico
	Tirante Mayor	y2	2.97	1.78	0.33	Subcrítico
	Tirante Borde	yb	1.41	3.74	1.00	Supercrítico
Longitud de Resalto			Lr			
Escalón N° 4			12.10 m			
Escalón N° 6			12.10 m			
Escalón N° 10			12.10 m			

3.1.3.1.2.8 Análisis en Hec Ras al 140 % (98 m3/seg) del Caudal de Diseño

Se realizó el análisis del flujo de La Cascada al 140 % del caudal de diseño, para el cual se muestra el perfil de flujo desde el software en la **Figura N° 87** y los detalles del flujo en el **Escalón N° 4** en la **Figura N° 88**, que para esta prueba es igual a los otros dos escalones analizados.

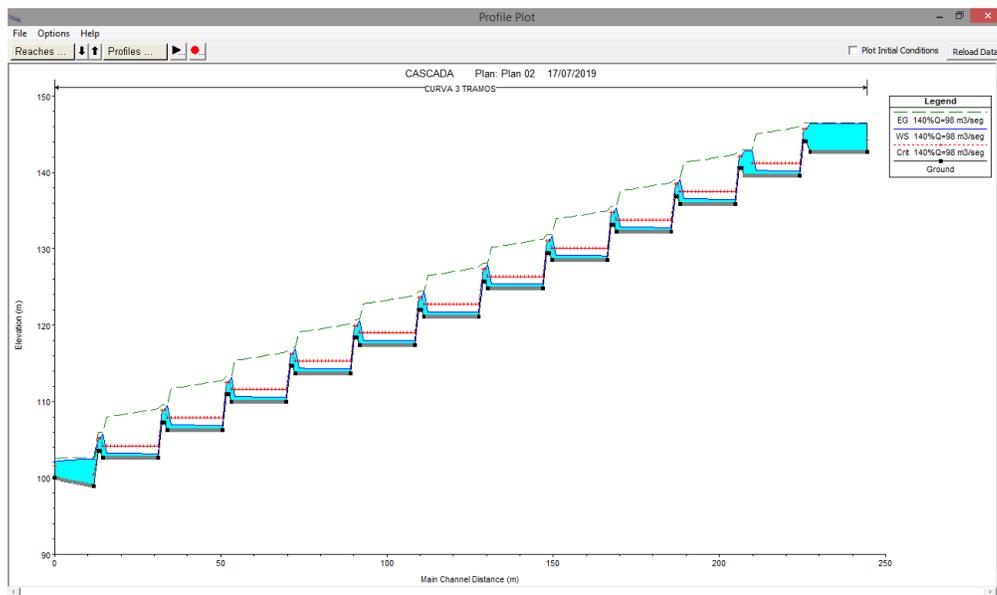


Figura N° 87. Perfil del Flujo del Caudal al 140%.

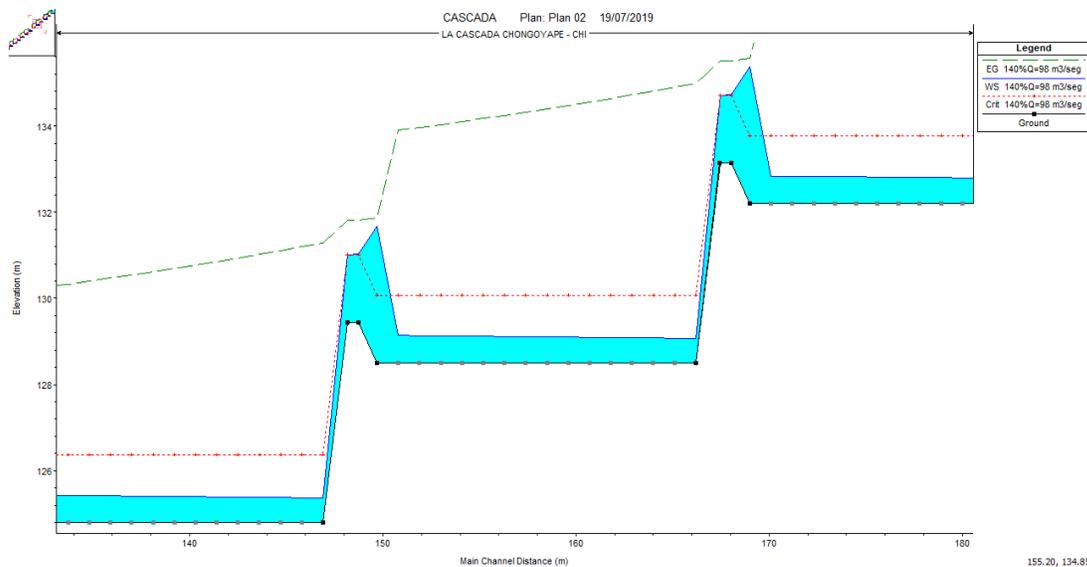


Figura N° 88. Escalón N°4 con caudal al 140 %.

En esta prueba se extrajeron los siguientes resultados para los escalones analizados como valores de tirante hidráulico, velocidad del flujo y Número de Froude estos se muestran en la **Tabla 33**. Para más detalles ver **Anexo N° 37°**.

Tabla 33. Resultados de Hec Ras con Caudal de Diseño al 140%.

Hec Ras – Caudal de Diseño al 140 % (98 m3/seg)						
Descripción			Resultado			
			Tirante (m)	Velocidad (m/seg)	Froude	Régimen
Escalón N° 4	Tirante Normal	yn	3.17	1.94	0.35	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	0.57	10.77	4.55	Supercrítico
	Tirante Mayor	y2	3.17	1.94	0.35	Subcrítico
	Tirante Borde	yb	1.57	3.94	1.00	Supercrítico
Escalón N° 6	Tirante Normal	yn	3.17	1.94	0.35	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	0.57	10.77	4.55	Supercrítico
	Tirante Mayor	y2	3.17	1.94	0.35	Subcrítico
	Tirante Borde	yb	1.57	3.94	1.00	Supercrítico
Escalón N° 10	Tirante Normal	yn	3.17	1.94	0.35	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	0.57	10.77	4.55	Supercrítico
	Tirante Mayor	y2	3.17	1.94	0.35	Subcrítico
	Tirante Borde	yb	1.57	3.94	1.00	Supercrítico
Longitud de Resalto			Lr			
Escalón N° 4			16.50 m			
Escalón N° 6			16.50 m			
Escalón N° 10			16.50 m			

3.1.3.1.2.9 Análisis en Hec Ras al 150 % (105 m³/seg) del Caudal de Diseño.

Se realizó el análisis del flujo de La Cascada al 150 % del caudal de diseño, para el cual se muestra el perfil de flujo desde el software en la **Figura N° 89**, para esta prueba los detalles del flujo de los escalones analizados se muestran independientemente por tener diferente comportamiento del flujo, los detalles del **Escalón N° 4**, **Escalón N° 6** y **Escalón N° 10** se muestran en la **Figura N° 90**, **Figura N° 91** y **Figura N° 92** respectivamente.

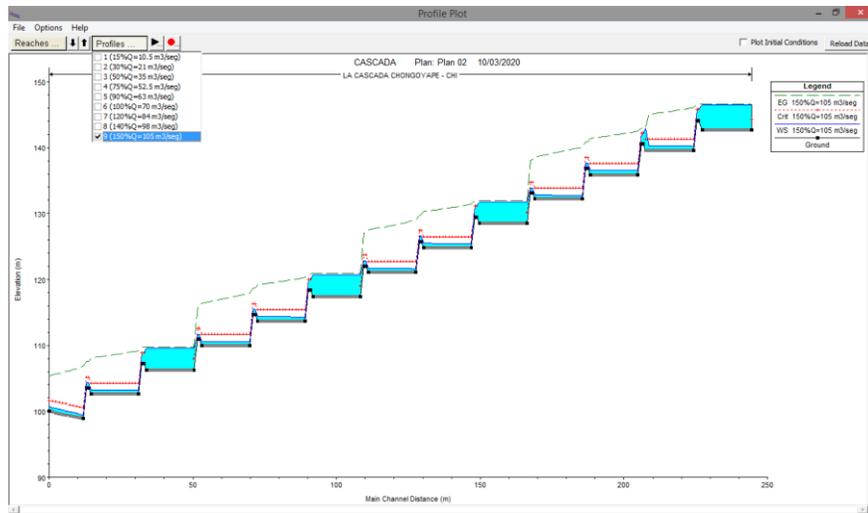


Figura N° 89. Perfil del Flujo del Caudal al 150%

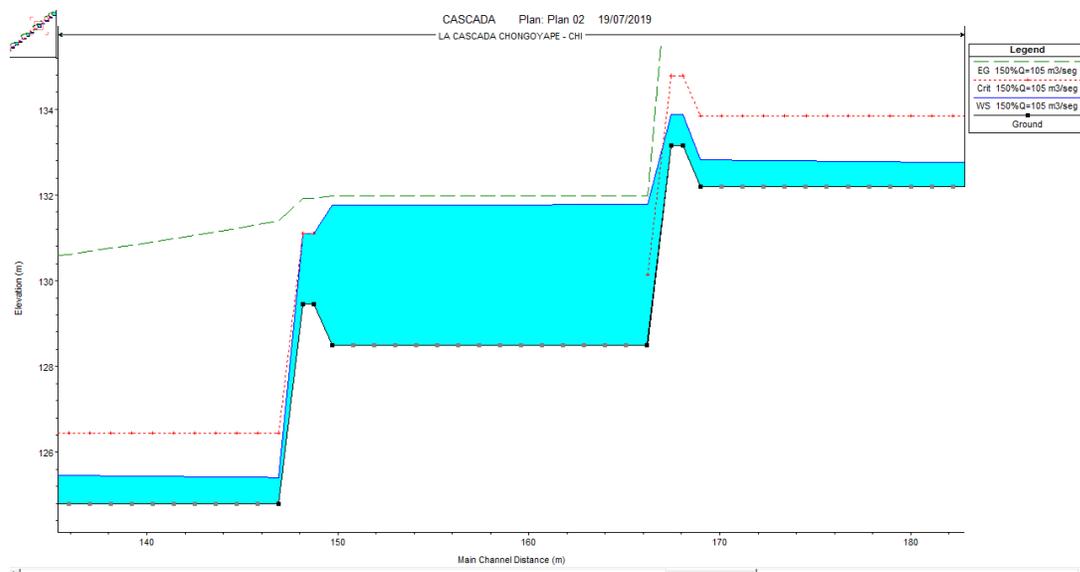


Figura N° 90. Escalón N°4 con caudal al 150 %.

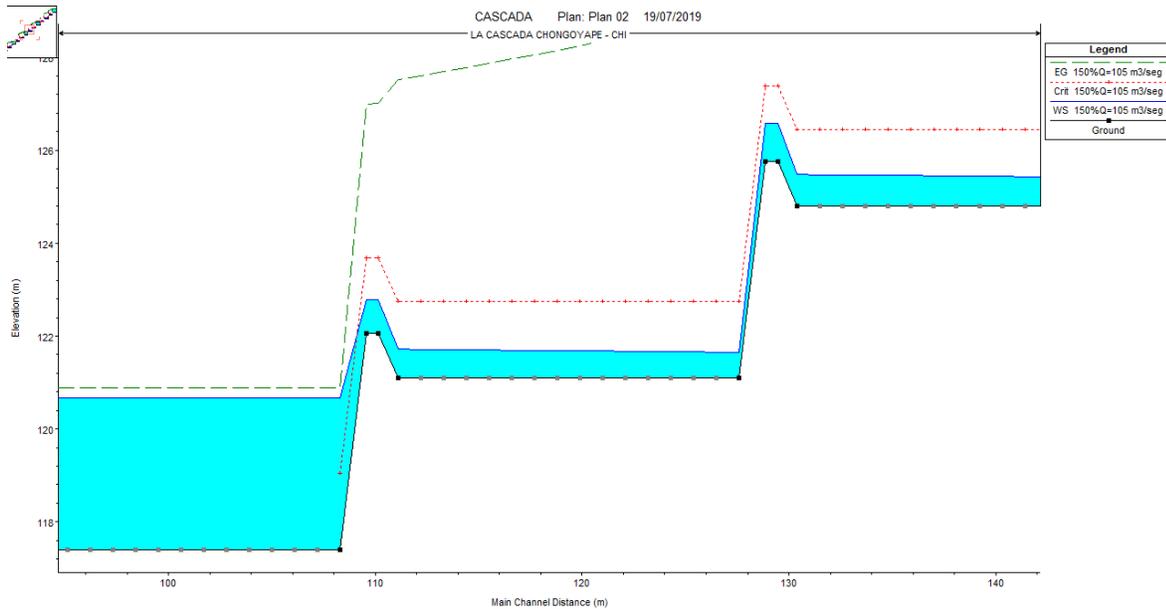


Figura N° 91. Escalón N°6 con caudal al 150 %.

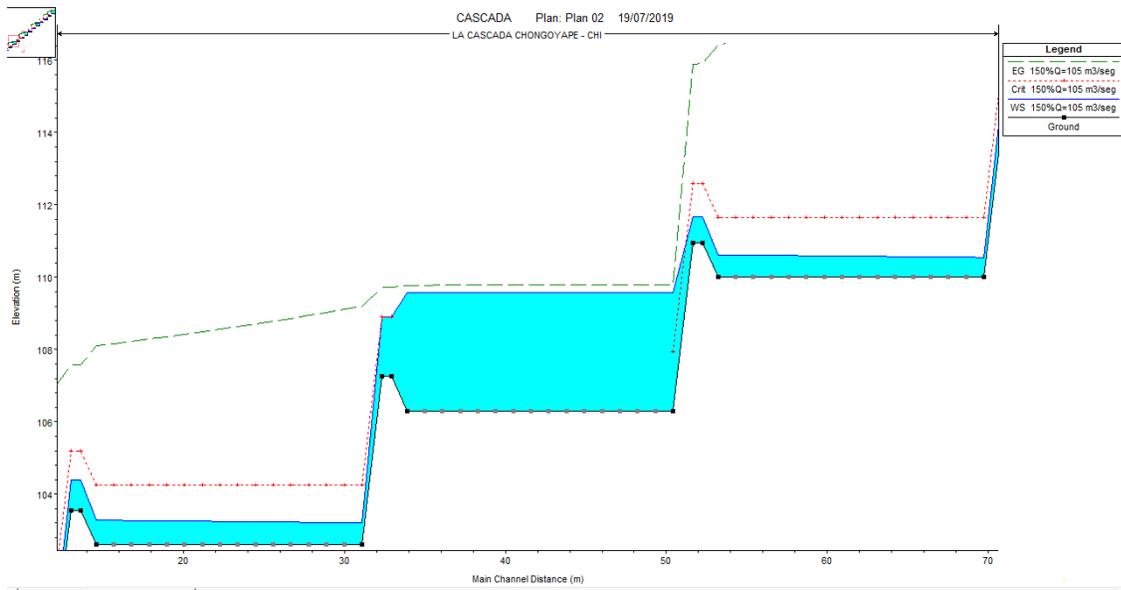


Figura N° 92. Escalón N°10 con caudal al 150 %.

En esta prueba se extrajeron los siguientes resultados para los escalones analizados como valores de tirante hidráulico, velocidad del flujo y Número de Froude estos se muestran en la **Tabla 34**. Para más detalles ver **Anexo N° 37°**.

Tabla 34. Resultados de Hec Ras con Caudal de Diseño al 150%.

Hec Ras – Caudal de Diseño al 150 % (105 m³/seg)						
Descripción			Resultado			
			Tirante (m)	Velocidad (m/seg)	Froude	Régimen
Escalón N° 4	Tirante Normal	yn	3.27	2.02	0.36	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	----	----	----	----
	Tirante Mayor	y2	----	----	----	----
	Tirante Borde	yb	1.65	4.01	1.00	Supercrítico
Escalón N° 6	Tirante Crítico	yc	0.59	11.17	4.64	Supercrítico
	Tirante Menor	y1	----	----	----	----
	Tirante Mayor	y2	----	----	----	----
	Tirante Borde	yb	0.73	9.09	3.41	Supercrítico
Escalón N° 10	Tirante Normal	yn	3.27	2.02	0.36	Subcrítico
	Tirante Menor	y1	----	----	----	----
	Tirante Mayor	y2	----	----	----	----
	Tirante Borde	yb	1.65	4.01	1.00	Supercrítico
Longitud de Resalto			Lr			
Escalón N° 4			16.50 m			
Escalón N° 6			16.50 m			
Escalón N° 10			16.50 m			

3.1.3.2 Construcción del Modelo Físico.

La construcción del modelo físico se realizó con la conformación de la estructura metálica, en la cual se utilizó tubos rectangulares de metal de medidas de 1 pulgada x 1 pulgada de lado para los escalones y parantes, y para la mesa de soporte tubo rectangular de 1 pulgada x 2 pulgadas de lado, se unió las piezas metálicas utilizando soldadura, parte del proceso de la conformación de la estructura metálica se puede observar en la **Figura N° 93**.



Figura N° 93. Conformación de Estructura Metálica para el Modelo Físico.

Luego de que termino el proceso de soldado de las piezas metálicas, se pintó la estructura para una mejor presentación como se puede observar en la **Figura N° 94**.



Figura N° 94. Pintado de Estructura Metálica para el Modelo Físico.

Después del pintado la estructura entro en un proceso de secado a campo abierto por un periodo aproximado de 3 horas como se puede observar en la **Figura N° 95.**



Figura N° 95. Secado de pintura de Estructura Metálica.

Terminado el proceso de secado se transportó la estructura metálica hasta la urbanización Las Brisas en donde se realizó el montaje de las piezas de acrílico transparente y accesorios de la tubería de suministro de agua, como se puede observar en la **Figura N° 96**.



Figura N° 96. Transporte de la de Estructura Metálica.

Se realizó la obtención de planchas de acrílico transparente de dimensiones 2.30 m x 1.80 m, posteriormente se realizó el procedimiento de corte de las planchas de acrílico según las medidas del plano del diseño del modelo físico, como se puede observar en la **Figura N° 97** y **Figura N° 98**.



Figura N° 97. Corte de planchas de acrílico.



Figura N° 98. Piezas de acrílico cortadas según planos.

Culminado el proceso de corte de las planchas de acrílico se realizó el montaje de las piezas iniciando por la pared lateral izquierda, base de los escalones, umbrales de salida junto con las vigas de choque del canal izquierdo, pared intermedia del canal, de igual manera umbrales de salida y vigas de choque para el canal derecho y pared lateral derecha, como se puede ver en la **Figura N° 99**.



Figura N° 99. Montaje de pared izquierda del canal.

La unión de las piezas de acrílico se realizó con silicona aplicada con una pistola para dicho uso, como se puede observar en la **Figura N° 100** y **Figura N° 101**.



Figura N° 100. Fijado de piezas de acrílico.



Figura N° 101. Montaje y alineación de la pared intermedia del canal.

El sellado de las juntas de acrílico también se realizó con silicona, los umbrales y vigas al tener un nivel bajo la pared lateral complicó las labores de sellado, como se puede ver en la **Figura N° 102**.



Figura N° 102. Sellado de juntas con silicona del Modelo físico de La Cascada.

La última etapa de montaje de las piezas de acrílico fue el montaje de la pared lateral derecha y la colocación de arcos de acrílico los cuales brindarían soporte a las paredes laterales e intermedia a lo largo de todo el canal, como se puede ver en la **Figura N° 103**.



Figura N° 103. Modelo físico de La Cascada a un 90 % de avance.

3.1.3.2 Ensayos del Modelo Físico La Cascada

Según lo estipulado en los objetivos los ensayos se realizaron de manera que se simule el caudal en distintos porcentajes, 15%, 30%, 50%, 75%, 90%, 100%, 120%, 140% y 150% tomando el caudal máximo de diseño de la Caída escalonada La Cascada como 100% el cual es de 70 m³/s.



Figura N° 104. Ensayos del Modelo físico de La Cascada.

Tabla 35. Caudales Escalados - caída escalonada La Cascada.

CAUDALES EN ESCALA 1:75

Q(diseño) = 70.00	SIMILITUD DE FROUDE		SIMILITUD DE WEBER		SIMILITUD DE REYNOLDS		
	m3/seg	$Q=Qd/(E)^{5/2}$	$x 10^3$	$Q=Qd/(E)^{3/2}$	$x 10^3$	$Q=Qd/E$	$x 10^3$
		m3/seg	l/seg	m3/seg	l/seg	m3/seg	l/seg
15%	10.50	0.0002	0.216	0.0162	16.17	0.1400	140.00
30%	21.00	0.0004	0.431	0.0323	32.33	0.2800	280.00
50%	35.00	0.0007	0.718	0.0539	53.89	0.4667	466.67
75%	52.50	0.0011	1.078	0.0808	80.83	0.7000	700.00
90%	63.00	0.0013	1.293	0.0970	96.99	0.8400	840.00
100%	70.00	0.0014	1.437	0.1078	107.77	0.9333	933.33
120%	84.00	0.0017	1.724	0.1293	129.33	1.1200	1120.00
140%	98.00	0.0020	2.012	0.1509	150.88	1.3067	1306.67
150%	105.00	0.0022	2.155	0.1617	161.66	1.4000	1400.00

Los caudales escalados mostraban el caudal apropiado que a criterio de cada uno de los hombres de ciencia citados es lo necesario para representar de manera correcta el comportamiento real de la estructura para la escala escogida. A criterio propio se eligió la similitud de Froude, debido a que los otros criterios generaban valores muy elevados los cuales sobrepasarían de manera significativa el comportamiento real de la caída escalonada La Cascada.

Por cuestiones de variación debido al tramo largo para el ingreso del agua y su acumulación en el tanque previo a la descarga en la sección netamente representativa de la caída escalonada, se realizó la prueba de estabilización de Caudal empleando las medidas escaladas para el Caudal previamente calculadas con el criterio de Froude, de esta manera se reguló el caudalímetro para que se suministre dicho caudal.



Figura N° 105. Regulación del Caudal por válvula del caudalímetro.

Las pruebas de estabilización consistían en emplear de manera manual un balde de 8 l. de capacidad y un cronómetro de manera que se obtenía un caudal medido en litro por segundo, la variación entre lo medido por el caudalímetro y lo calculado de manera manual justificó la prueba de estabilización de caudal debido a que se corroboró que lo suministrado y medido por el caudalímetro difería del Caudal real. Se realizaron aproximadamente 5 mediciones hasta llegar a tener el caudal correcto y poder comenzar con los ensayos correspondientes.

La estabilización se volvió la primera y más esencial parte de los ensayos debido a la importancia de contar con el caudal correcto para la realización de las medidas necesaria durante los ensayos, de esta manera se podía observar el comportamiento real de la estructura y determinar los distintos parámetros de los flujos estudiados.



Figura N° 106. Muestra representativa de agua tomaba en un balde de 8 l.

Se empleó una jarra pequeña para determinar los mililitros y ser lo más preciso posible en la medición.

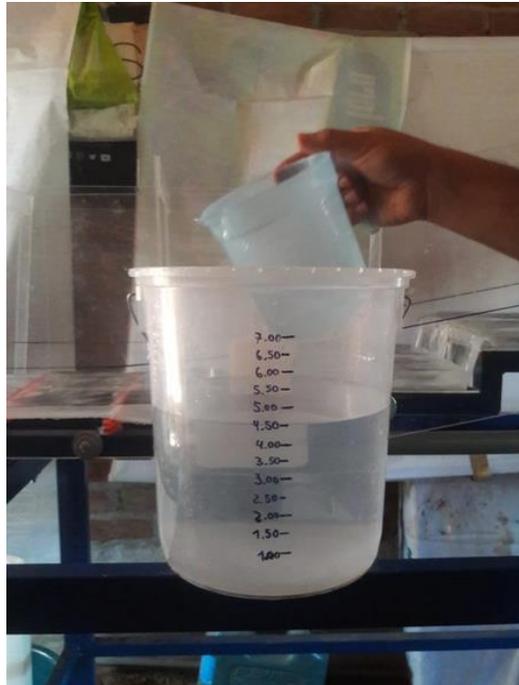


Figura N° 107. Medición de los litros tomados en cada prueba.

3.1.3.2.1 Ensayo N°1 en Modelo Físico con Caudal de Diseño al 15%.



Figura N° 108. Ensayo N° 1 en Modelo Físico La Cascada con Caudal al 15%.

El primer ensayo se realizó con una representación pequeña del caudal en la caída escalonada La Cascada la cual se puede observar con regularidad en épocas de invierno donde las precipitaciones son menos frecuentes y de baja intensidad.

Caudal de diseño: 70 m³/seg Escala General 1/75

Caudal del ensayo: 15 %

Caudal del ensayo: 10.5 m³/seg

Caudal escalado: 0.216 l/seg (Criterio de Froude)

A. Estabilización de caudal en el alimentador hidráulico.

Tabla 36. Estabilización del Caudal al 15%.

N°	VOLUMEN (l)	TIEMPO (seg)	CAUDAL (l/seg)
1	3.250	17.440	0.186
2	3.265	13.140	0.248
3	3.050	13.850	0.220
4	3.140	14.350	0.219

B. Comprobación de caudal.

Tabla 37. Comprobación del Caudal al 15%

N°	VOLUMEN (l)	TIEMPO (seg)	CAUDAL (l/seg)	Q PROMEDIO (l/seg)
1	3.710	17.420	0.213	0.215
2	3.000	14.120	0.212	
3	3.650	16.720	0.218	
4	3.180	14.760	0.215	
5	3.400	15.980	0.213	
6	3.250	15.150	0.215	
7	3.275	15.200	0.215	
8	4.190	19.170	0.219	
9	4.360	19.970	0.218	

La comprobación se realiza para obtener un valor correcto del caudal estimado, esto se realiza debido a la posible existencia de algún error en la medición inicial, unas veces comprobadas el caudal se puede proceder con las mediciones.

C. Mediciones del Comportamiento del Flujo.

Tabla 38. Mediciones del Flujo con Caudal al 15%.

N° ESCALÓN	y_n (cm)	Lr (cm)	Ld (cm)	y_b (cm)	y_i (cm)	y_1 (cm)	y_2 (cm)
4	2.40	7.00	-	0.90	-	1.90	2.30
6	2.20	8.00	-	0.60	-	2.00	2.30
10	2.30	7.00	-	0.80	-	2.30	2.50
PROMEDIO	2.2	7.0		0.6		1.9	2.4

Tabla 39. Promedio de Mediciones del Flujo con Caudal al 15% Escalado 1/75.

Escalado 1/75	y_n (m)	Lr (m)	Ld (m)	y_b (m)	y_i (m)	y_1 (m)	y_2 (m)
PROMEDIO	1.65	5.25	0.00	0.45	0.00	1.43	1.80

y_n = Tirante normal

Lr = Longitud de resalto hidráulico

Ld = Longitud anterior al chorro en la huella

y_b = Tirante en el Borde del Escalón

y_i = Ancho del chorro

y_1 = Tirante conjugado menor

y_2 = Tirante conjugado mayor



Figura N° 109. Medida de Tirantes con Caudal al 15%.

3.1.3.2.2 Ensayo N° 2 en Modelo Físico con Caudal de Diseño al 30%.



Figura N° 110. Ensayo N° 2 en Modelo Físico La Cascada con Caudal al 30%.

Caudal de diseño: 70 m³/seg Escala General 1/75

Caudal del ensayo: 30 %

Caudal del ensayo: 21 m³/seg

Caudal escalado: 0.431 l/seg (Criterio de Froude)

A. Estabilización de Caudal en el Alimentador Hidráulico

Tabla 40. Estabilización del Caudal al 30%.

N°	VOLUMEN (l)	TIEMPO (seg)	CAUDAL (l/seg)
1	5.110	11.500	0.444
2	5.400	12.150	0.444
3	5.500	13.060	0.421
4	5.340	12.350	0.432

B. Comprobación de Caudal

Tabla 41. Comprobación del Caudal al 30%

N°	VOLUMEN (l)	TIEMPO (seg)	CAUDAL (l/seg)	Q
				PROMEDIO (l/seg)
1	5.520	12.880	0.429	0.431
2	5.600	12.890	0.434	
3	5.900	13.720	0.430	
4	4.640	10.700	0.434	
5	4.510	10.380	0.434	
6	4.550	10.500	0.433	
7	4.545	10.600	0.429	
8	4.850	11.300	0.429	
9	4.950	11.500	0.430	

C. Mediciones del Comportamiento del Flujo

Tabla 42. Mediciones del Flujo con Caudal al 30%.

N° ESCALÓN	y _n (cm)	L _r (cm)	L _d (cm)	y _b (cm)	y _i (cm)	y ₁ (cm)	y ₂ (cm)
4	2.70	7.50	-	1.00	-	2.00	2.80
6	2.50	7.50	-	1.00	-	2.00	2.80
10	2.60	7.50	-	1.00	-	2.30	2.70
PROMEDIO	2.5	7.50		1		2	2.8

Tabla 43. Promedio de Mediciones del Flujo con Caudal al 30% Escalado 1/75.

Escalado 1/75	y _n (m)	L _r (m)	L _d (m)	y _b (m)	y _i (m)	y ₁ (m)	y ₂ (m)
PROMEDIO	1.88	5.63	0.00	0.75	0.00	1.50	2.10



Figura N° 111. Medida de Longitud de Resalto con Caudal al 30%.

3.1.3.2.3 Ensayo N°3 en Modelo Físico con Caudal de Diseño al 50%.



Figura N° 112. Ensayo N° 3 en Modelo Físico La Cascada con Caudal al 50%.

Caudal de diseño :	70	m ³ /s	Escala General 1/75
Caudal del ensayo:	50	%	
Caudal del ensayo:	35	m ³ /seg	
Caudal escalado:	0.718	l/seg	(Criterio de Froude)

A. Estabilización de Caudal en el Alimentador Hidráulico

Tabla 44. Estabilización del Caudal al 50%.

N°	VOLUMEN (l)	TIEMPO (seg)	CAUDAL (l/seg)
1	4.700	6.610	0.711
2	5.000	6.930	0.722
3	4.245	5.620	0.755
4	4.502	6.270	0.718

B. Comprobación de Caudal

Tabla 45. Comprobación del Caudal al 50%

N°	VOLUMEN (l)	TIEMPO (seg)	CAUDAL (l/seg)	Q
				PROMEDIO (l/seg)
1	4.840	6.700	0.722	0.719
2	4.500	6.270	0.718	
3	4.510	6.280	0.718	
4	4.830	6.720	0.719	
5	4.700	6.500	0.723	
6	4.880	6.800	0.718	
7	4.500	6.250	0.720	
8	4.600	6.380	0.721	
9	4.550	6.350	0.717	

C. Mediciones del Comportamiento del Flujo

Tabla 46. Mediciones del Flujo con Caudal al 50%.

N° ESCALÓN	y _n (cm)	L _r (cm)	L _d (cm)	y _b (cm)	y _i (cm)	y ₁ (cm)	y ₂ (cm)
4	3.10	8.00	-	1.50	-	2.40	3.20
6	2.90	8.00	-	1.30	-	2.30	3.20
10	3.20	8.00	-	1.20	-	2.30	3.30
PROMEDIO	2.9	8		1.3		2.4	3.3

Tabla 47. Promedio de Mediciones del Flujo con Caudal al 50% Escalado 1/75.

Escalado 1/75	y _n (m)	L _r (m)	L _d (m)	y _b (m)	y _i (m)	y ₁ (m)	y ₂ (m)
PROMEDIO	2.18	6.00	0.00	0.98	0.00	1.80	2.48

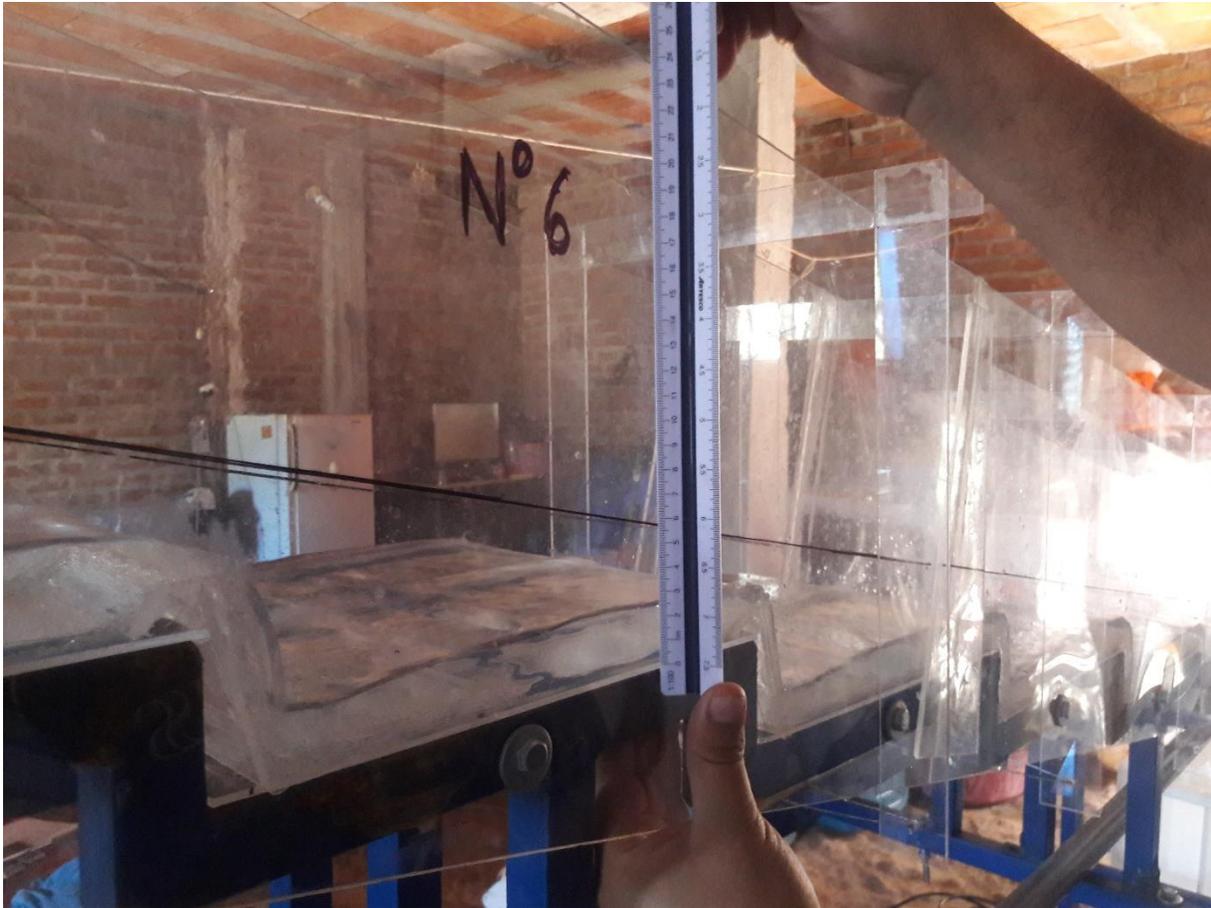


Figura N° 113. Medida de Tirantes con Caudal al 50%.

3.1.3.2.4 Ensayo N°4 en Modelo Físico con Caudal de Diseño al 75%.



Figura N° 114. Ensayo N° 4 en Modelo Físico La Cascada con Caudal al 75%.

Caudal de diseño :	70	m ³ /seg	Escala General 1/75
Caudal del ensayo:	75	%	
Caudal del ensayo:	52.5	m ³ /seg	
Caudal escalado:	1.078	l/seg	(Criterio de Froude)

A. Estabilización de Caudal en el Alimentador Hidráulico

Tabla 48. Estabilización del Caudal al 75%.

N°	VOLUMEN (l)	TIEMPO (seg)	CAUDAL (l/seg)
1	5.400	4.700	1.149
2	5.210	4.520	1.153
3	5.499	4.850	1.134
4	5.840	5.440	1.074

B. Comprobación de Caudal

Tabla 49. Comprobación del Caudal al 75%.

N°	VOLUMEN (l)	TIEMPO (seg)	CAUDAL (l/seg)	Q
				PROMEDIO (l/seg)
1	5.520	5.110	1.080	1.077
2	4.700	4.380	1.073	
3	5.000	4.590	1.089	
4	5.860	5.500	1.065	
5	5.130	4.750	1.080	
6	5.200	4.770	1.090	
7	5.600	5.170	1.083	
8	4.900	4.520	1.084	
9	5.500	5.270	1.044	

C. Mediciones del Comportamiento del Flujo

Tabla 50. Mediciones del Flujo con Caudal al 75%.

N° ESCALÓN	y _n (cm)	L _r (cm)	L _d (cm)	y _b (cm)	y _i (cm)	y ₁ (cm)	y ₂ (cm)
4	3.50	8.50	6.50	2.00	0.50	2.60	3.70
6	3.00	8.50	6.50	1.80	0.40	2.80	3.90
10	3.00	8.50	6.40	2.00	0.40	3.10	3.90
PROMEDIO	3	8.5	6.5	1.5	0.4	2.6	3.8

Tabla 51. Promedio de Mediciones del Flujo con Caudal al 75% Escalado 1/75.

Escalado 1/75	y _n (m)	L _r (m)	L _d (m)	y _b (m)	y _i (m)	y ₁ (m)	y ₂ (m)
PROMEDIO	2.25	6.38	4.88	1.13	0.30	1.95	2.85



Figura N° 115. Medida de Longitud de Resalto con Caudal al 75%.

3.1.3.2.5 Ensayo N°5 en Modelo Físico con Caudal de Diseño al 90%.



Figura N° 116. Ensayo N° 5 en Modelo Físico La Cascada con Caudal al 90%.

Caudal de diseño :	70	m ³ /seg	Escala General 1/75
Caudal del ensayo:	90	%	
Caudal del ensayo:	63	m ³ /seg	
Caudal escalado:	1.293	l/seg	(Criterio de Froude)

A. Estabilización de Caudal en el Alimentador Hidráulico

Tabla 52. Estabilización del Caudal al 90%.

N°	VOLUMEN (l)	TIEMPO (seg)	CAUDAL (l/seg)
1	4.870	3.725	1.307
2	5.000	4.015	1.245
3	5.200	3.795	1.370
4	5.390	4.145	1.300

B. Comprobación de Caudal

Tabla 53. Comprobación del Caudal al 90%.

N°	VOLUMEN (l)	TIEMPO (seg)	CAUDAL (l/seg)	Q
				PROMEDIO (l/seg)
1	5.300	4.115	1.288	1.293
2	4.750	3.650	1.301	
3	4.700	3.640	1.291	
4	4.600	3.600	1.278	
5	4.800	3.680	1.304	
6	5.200	4.000	1.300	
7	5.150	3.990	1.291	
8	5.230	4.050	1.291	
9	5.050	3.920	1.288	

C. Mediciones del Comportamiento del Flujo

Tabla 54. Mediciones del Flujo con Caudal al 90%.

N° ESCALÓN	y _n (cm)	L _r (cm)	L _d (cm)	y _b (cm)	y _i (cm)	y ₁ (cm)	y ₂ (cm)
4	3.15	6	7.5	1.5	0.5	2.1	3.4
6	3.2	5	8	1.4	0.6	2	3.5
10	3.7	5.5	7.4	1.7	0.5	2.7	4
PROMEDIO	3.3	5.5	7.4	1.6	0.5	2.7	3.9

Tabla 55. Promedio de Mediciones del Flujo con Caudal al 90% Escalado 1/75.

Escalado 1/75	y _n (m)	L _r (m)	L _d (m)	y _b (m)	y _i (m)	y ₁ (m)	y ₂ (m)
PROMEDIO	2.48	4.13	5.55	1.20	0.38	2.03	2.93



Figura N° 117. Medida de Tirantes con Caudal al 90%.

3.1.3.2.6 Ensayo N°6 en Modelo Físico con Caudal de Diseño al 100%.



Figura N° 118. Ensayo N° 6 en Modelo Físico La Cascada con Caudal al 100%.

Caudal de diseño :	70	m ³ /seg	Escala General 1/75
Caudal del ensayo:	100	%	
Caudal del ensayo:	70	m ³ /seg	
Caudal escalado:	1.437	l/seg	(Criterio de Froude)

A. Estabilización de Caudal en el Alimentador Hidráulico

Tabla 56. Estabilización del Caudal al 100%.

N°	VOLUMEN (l)	TIEMPO (seg)	CAUDAL (l/seg)
1	5.100	3.395	1.502
2	5.225	3.460	1.510
3	5.250	3.565	1.473
4	5.325	3.730	1.428

B. Comprobación de Caudal

Tabla 57. Comprobación del Caudal al 100%.

N°	VOLUMEN (l)	TIEMPO (seg)	CAUDAL (l/seg)	Q
				PROMEDIO (l/seg)
1	4.890	3.390	1.442	1.437
2	5.250	3.650	1.438	
3	5.240	3.640	1.440	
4	4.930	3.430	1.437	
5	4.800	3.350	1.433	
6	5.100	3.570	1.429	
7	5.150	3.580	1.439	
8	4.990	3.500	1.426	
9	5.050	3.490	1.447	

C. Mediciones del Comportamiento del Flujo

Tabla 58. Mediciones del Flujo con Caudal al 100%.

N° ESCALÓN	y _n (cm)	L _r (cm)	L _d (cm)	y _b (cm)	y _i (cm)	y ₁ (cm)	y ₂ (cm)
4	3.8	6	7.5	1.7	0.6	2.9	4.3
6	3.5	6	6.4	1.7	0.7	2.3	3.7
10	3.7	6	7.3	1.7	0.6	2.3	3.7
PROMEDIO	3.4	6	7.5	1.7	0.6	2.9	4

Tabla 59. Promedio de Mediciones del Flujo con Caudal al 100% Escalado 1/75.

Escalado 1/75	y _n (m)	L _r (m)	L _d (m)	y _b (m)	y _i (m)	y ₁ (m)	y ₂ (m)
PROMEDIO	2.55	4.50	5.63	1.28	0.45	2.18	3.00



Figura N° 119. Medida de Tirantes con Caudal al 100%.

3.1.3.2.7 Ensayo N°7 en Modelo Físico con Caudal de Diseño al 120%.



Figura N° 120. Ensayo N° 7 en Modelo Físico La Cascada con Caudal al 120%.

Caudal de diseño :	70	m ³ /seg	ESCALA GENERAL 1/75
Caudal del ensayo:	120	%	
Caudal del ensayo:	84	m ³ /seg	(CRITERIO DE FROUD)
Caudal escalado:	1.724	l/seg	

A. Estabilización de Caudal en el Alimentador Hidráulico

Tabla 60. Estabilización del Caudal al 120%.

N°	VOLUMEN (l)	TIEMPO (seg)	CAUDAL (l/seg)
1	4.920	2.880	1.708
2	4.860	2.950	1.647
3	6.075	3.500	1.736
4	6.050	3.500	1.729

B. Comprobación de Caudal

Tabla 61. Comprobación del Caudal al 120%.

N°	VOLUMEN (l)	TIEMPO (seg)	CAUDAL (l/seg)	Q
				PROMEDIO (l/seg)
1	5.650	3.280	1.723	1.725
2	4.420	2.550	1.733	
3	4.760	2.770	1.718	
4	5.450	3.180	1.714	
5	5.200	3.050	1.705	
6	5.300	3.100	1.710	
7	4.900	2.850	1.719	
8	4.800	2.800	1.714	
9	4.750	2.650	1.792	

C. Mediciones del Comportamiento del Flujo

Tabla 62. Mediciones del Flujo con Caudal al 120%.

N° ESCALÓN	y _n (cm)	L _r (cm)	L _d (cm)	y _b (cm)	y _i (cm)	y ₁ (cm)	y ₂ (cm)
4	3.5	6	8.5	2	0.8	2.8	4.5
6	3.8	6	6.5	1.9	0.8	2.2	4.1
10	3.4	7	7	1.7	0.7	2.2	3.7
PROMEDIO	3.5	7	8.5	1.9	0.8	2.8	4.2

Tabla 63. Promedio de Mediciones del Flujo con Caudal al 120% Escalado 1/75.

Escalado 1/75	y _n (m)	L _r (m)	L _d (m)	y _b (m)	y _i (m)	y ₁ (m)	y ₂ (m)
PROMEDIO	2.63	5.25	6.38	1.43	0.60	2.10	3.15



Figura N° 121. Medida de Tirantes con Caudal al 120%.

3.1.3.2.8 Ensayo N°8 en Modelo Físico con Caudal de Diseño al 140%.



Figura N° 122. Ensayo N° 8 en Modelo Físico La Cascada con Caudal al 140%.

Caudal de diseño :	70	m3/seg	Escala General 1/75
Caudal del ensayo:	140	%	
Caudal del ensayo:	98	m3/seg	(Criterio de Froude)
Caudal escalado:	2.012	l/seg	

A. Estabilización de Caudal en el Alimentador Hidráulico

Tabla 64. Estabilización del Caudal al 140%.

N°	VOLUMEN (l)	TIEMPO (seg)	CAUDAL (l/seg)
1	5.650	2.940	1.922
2	5.550	2.680	2.071
3	5.700	2.810	2.028
4	5.525	2.740	2.016

B. Comprobación de Caudal

Tabla 65. Comprobación del Caudal al 140%.

N°	VOLUMEN (l)	TIEMPO (seg)	CAUDAL (l/seg)	Q
				PROMEDIO (l/seg)
1	5.070	2.520	2.012	2.013
2	4.738	2.350	2.016	
3	5.250	2.610	2.011	
4	5.250	2.620	2.004	
5	5.600	2.770	2.022	
6	4.810	2.390	2.013	
7	5.250	2.600	2.019	
8	5.100	2.520	2.024	
9	4.900	2.450	2.000	

C. Mediciones del Comportamiento del Flujo

Tabla 66. Mediciones del Flujo con Caudal al 140%.

N° ESCALÓN	y _n (cm)	L _r (cm)	L _d (cm)	y _b (cm)	y _i (cm)	y ₁ (cm)	y ₂ (cm)
4	4.1	8	9.5	1.9	1.2	2.3	4.5
6	3.5	7	8	2.2	1	2.5	4.1
10	3.7	7	9	2.1	1.2	2	4
PROMEDIO	3.6	8	9.5	2.2	1	2.5	4.4

Tabla 67. Promedio de Mediciones del Flujo con Caudal al 140% Escalado 1/75.

Escalado 1/75	y _n (m)	L _r (m)	L _d (m)	y _b (m)	y _i (m)	y ₁ (m)	y ₂ (m)
PROMEDIO	2.70	6.00	7.13	1.65	0.75	1.88	3.30



Figura N° 123. Flujo con Caudal al 140%.

3.1.3.2.9 Ensayo N°9 en Modelo Físico con Caudal de Diseño al 150%.



Figura N° 124. Ensayo N° 9 en Modelo Físico La Cascada con Caudal al 150%.

Caudal de diseño :	70	m ³ /seg	ESCALA GENERAL 1/75 (CRITERIO DE FROUD)
Caudal del ensayo:	150	%	
Caudal del ensayo:	105	m ³ /seg	
Caudal escalado:	2.155	l/seg	

A. Estabilización de Caudal en el Alimentador Hidráulico

Tabla 68. Estabilización del Caudal al 150%.

N°	VOLUMEN (l)	TIEMPO (seg)	CAUDAL (l/seg)
1	4.720	2.100	2.248
2	5.580	2.620	2.130
3	5.000	2.850	1.754
4	5.800	2.690	2.156

B. Comprobación de Caudal

Tabla 69. Comprobación del Caudal al 150%.

N°	VOLUMEN (l)	TIEMPO (seg)	CAUDAL (l/s)	Q
				PROMEDIO (l/seg)
1	5.710	2.650	2.155	2.153
2	5.340	2.480	2.153	
3	5.320	2.480	2.145	
4	5.950	2.750	2.164	
5	5.600	2.660	2.105	
6	5.800	2.680	2.164	
7	5.750	2.670	2.154	
8	5.650	2.668	2.118	
9	5.550	2.500	2.220	

C. Mediciones del Comportamiento del Flujo

Tabla 70. Mediciones del Flujo con Caudal al 150%.

N° ESCALÓN	y _n (cm)	L _r (cm)	L _d (cm)	y _b (cm)	y _i (cm)	y ₁ (cm)	y ₂ (cm)
4	4.6	8.5	10.5	2.3	1.1	2.0	4.5
6	3.9	8.0	10	1.7	1.1	1.8	4.2
10	3.7	8.3	10	1.7	1.1	2.0	4.2
PROMEDIO	3.7	8.5	10	2.3	1.1	2.0	4.5

Tabla 71. Promedio de Mediciones del Flujo con Caudal al 150% Escalado 1/75.

Escalado 1/75	y _n (m)	L _r (m)	L _d (m)	y _b (m)	y _i (m)	y ₁ (m)	y ₂ (m)
PROMEDIO	2.78	6.38	7.50	1.73	0.83	1.50	3.38



Figura N° 125. Flujo con Caudal al 150%.

3.1.3.2.10 Resumen de Ensayos del Modelo Físico

Se realizó un resumen de los resultados de los ensayos del modelo físico para tener una mejor interpretación de estos, el resumen de los resultados se puede observar en las siguientes tablas.

Tabla 72. Resumen de Ensayos del Modelo Físico.

RESUMEN DE ENSAYOS DEL MODELO FÍSICO									
N°	Q %	Q l/seg	y _n (cm)	L _r (cm)	L _d (cm)	y _b (cm)	y _i (cm)	y ₁ (cm)	y ₂ (cm)
1	15	0.22	2.2	7.0	---	0.6	---	1.9	2.4
2	30	0.43	2.5	7.5	---	1.0	---	2.0	2.8
3	50	0.72	2.9	8.0	---	1.3	---	2.4	3.3
4	75	1.08	3.0	8.5	6.5	1.5	0.4	2.6	3.8
5	90	1.29	3.3	5.5	7.4	1.6	0.5	2.7	3.9
6	100	1.44	3.4	6.0	7.5	1.7	0.6	2.9	4.0
7	120	1.72	3.5	7.0	8.5	1.9	0.8	2.8	4.2
8	140	2.01	3.6	8.0	9.5	2.2	1.0	2.5	4.4
9	150	2.16	3.7	8.5	10.0	2.3	1.1	2.0	4.5

Tabla 73. Resumen de Ensayos del Modelo Físico Ampliados a Escala 1/75.

RESUMEN DE RESULTADOS ESCALADOS DE ENSAYOS ESCALADOS DEL MODELO FÍSICO - ESCALA 1/75									
N°	Q %	Q m3/seg	y _n (m)	L _r (m)	L _d (m)	y _b (m)	y _i (m)	y ₁ (m)	y ₂ (m)
1	15	10.50	1.65	5.25	---	0.45	---	1.43	1.80
2	30	21.00	1.88	5.63	---	0.75	---	1.50	2.10
3	50	35.00	2.18	6.00	---	0.98	---	1.80	2.48
4	75	52.50	2.25	6.38	4.88	1.13	0.30	1.95	2.85
5	90	63.00	2.48	4.13	5.55	1.20	0.38	2.03	2.93
6	100	70.00	2.55	4.50	5.63	1.28	0.45	2.18	3.00
7	120	84.00	2.63	5.25	6.38	1.43	0.60	2.10	3.15
8	140	98.00	2.70	6.00	7.13	1.65	0.75	1.88	3.30
9	150	105.00	2.78	6.38	7.50	1.73	0.83	1.50	3.38

Para detalles en Excel ver **Anexo N°39**.

3.1.3.2.11 Construcción de Gráfica de Clasificación de Flujo Escalonado en Excel.

Se construyó la gráfica de clasificación del flujo escalonado en Excel, utilizando las ecuaciones de límite del flujo de Chanson y Toombes (2004). Como se muestra en la siguiente figura.

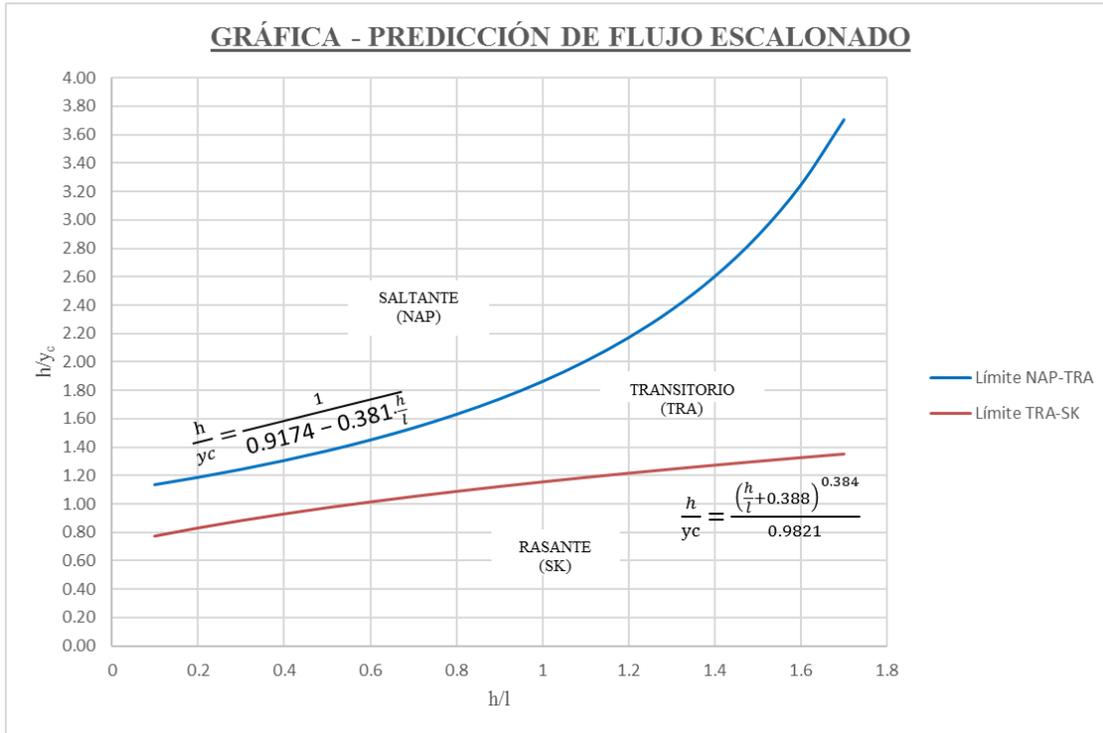


Figura N° 126. Grafica de Predicción del Flujo Escalonado en Excel.

En la anterior grafica para el eje X se tiene la relación h/l y para el eje Y se tiene la relación h/y_c , la línea superior de color azul representa el límite de flujo Saltante (NAP) y Transitorio (TRA), y la línea inferior de color rojo representa el límite entre el flujo Transitorio (TRA) y Rasante (SK).

Así mismo se realizó la ubicación de valores de la relación h/y_c para los todos los ensayos en el modelo físico, ubicándose todos dentro de la región de flujo saltante quedando un alto rango en el eje vertical para alcanzar los límites del flujo Saltante y Transitorio (NAP – TRA), esto se puede observar en la siguiente tabla y figura. Para más detalles ver **Anexo N°40**.

Tabla 74. Relación (h/l) y (h/y_c) para Pruebas en Modelo Físico.

Relación (h/l) y (h/y_c) para Pruebas en Modelo Físico						
	Caudal Evaluado	Caudal Evaluado	Altura Escalón	Tirante Crítico	Relación	Relación
Flujo	Q _e %	Q _e l/seg	h cm	y _c = y _b cm	h/l	h/y _c
Saltante (NAP)	15%	0.22	6.20	0.60	0.24	10.33
	30%	0.43	6.20	1.00	0.24	6.20
	50%	0.72	6.20	1.30	0.24	4.77
	75%	1.08	6.20	1.50	0.24	4.13
	90%	1.29	6.20	1.60	0.24	3.88
	100%	1.44	6.20	1.70	0.24	3.65
	120%	1.72	6.20	1.90	0.24	3.26
	140%	2.01	6.20	2.20	0.24	2.82
	150%	2.16	6.20	2.30	0.24	2.70

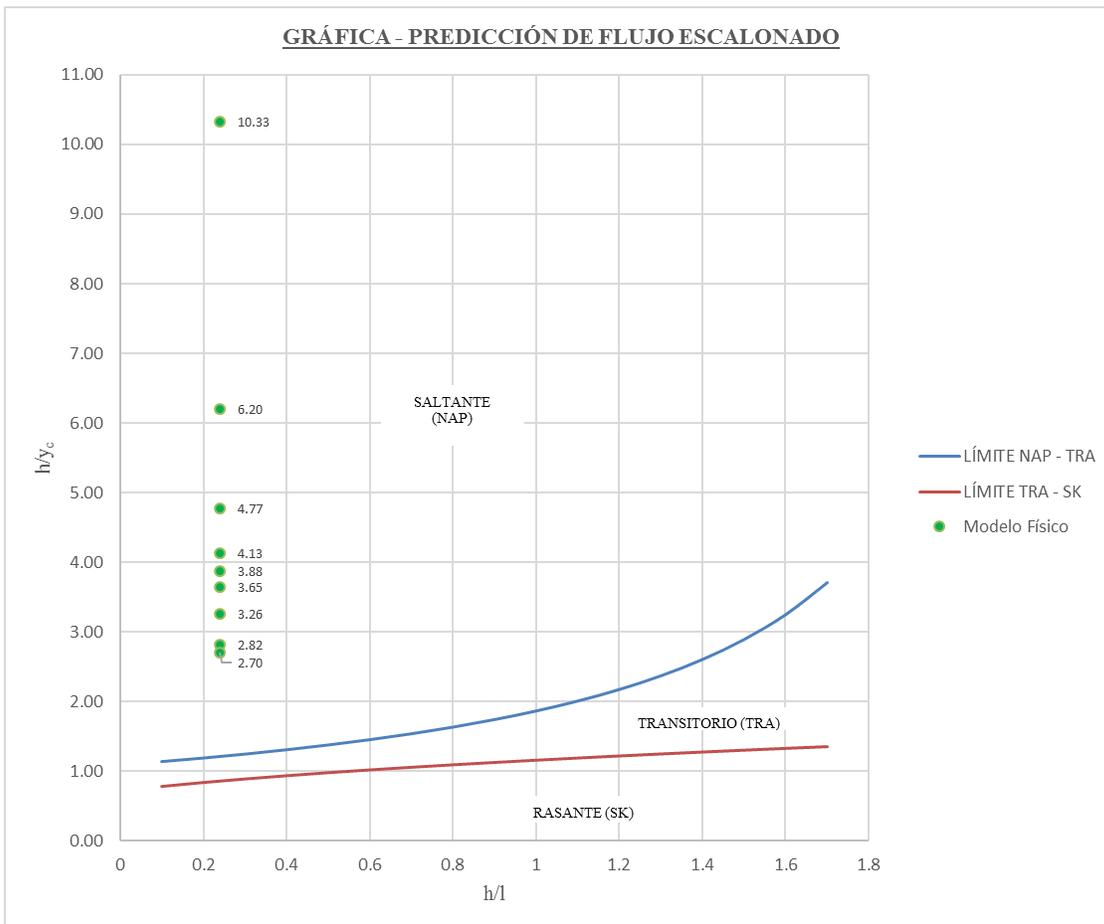


Figura N° 127. Clasificación del flujo de los ensayos del modelo físico.

3.1.4 Comparación de Resultados Obtenidos por medio de Fórmulas, Software y constatando en el Modelo Físico a Escala.

Se realizó la comparación de resultados mediante Fórmula, software Hec – Ras y Modelo Físico, la comparación se realizó para cada uno de los caudales evaluados, en el cual se determinó la generación del régimen de Flujo saltante en todos los análisis y ensayos. Los resultados se pueden observar en la siguiente Tabla y gráficas.

Tabla 75. Comportamiento de Flujo para los Caudales Evaluados.

ANÁLISIS DEL FLUJO

CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO

COMPORTAMIENTO DEL FLUJO

CAUDAL DE DISEÑO Qd = 70 m3/seg

COMPORTAMIENTO DEL FLUJO				
CAUDAL EVALUADO	CAUDAL EVALUADO	TIPO DE FLUJO		
		ANÁLISIS CON FÓRMULAS	ANÁLISIS MODELO FÍSICO	ANÁLISIS SOFTWARE HEC-RAS
Qe %	Qe m3/seg			
15	10.5	NAP 01	NAP 01	NAP 01
30	21.0	NAP 01	NAP 01	NAP 01
50	35.0	NAP 01	NAP 01	NAP 01
75	52.5	NAP 01	NAP 01	NAP 01
90	63.0	NAP 01	NAP 01	NAP 01
100	70.0	NAP 01	NAP 01	NAP 01
120	84.0	NAP 01	NAP 01	NAP 01
140	98.0	NAP 01	NAP 01	NAP 01
150	105.0	NAP 01	NAP 01	NAP 01

El flujo se mantiene en condiciones de Flujo Saltante NAP hasta el Caudal Evaluado de $Q_e = 150.0\%$ con respecto al caudal de diseño, como se puede ver en la **Figura N° 128**.

Gráfica de Resultados Finales en %

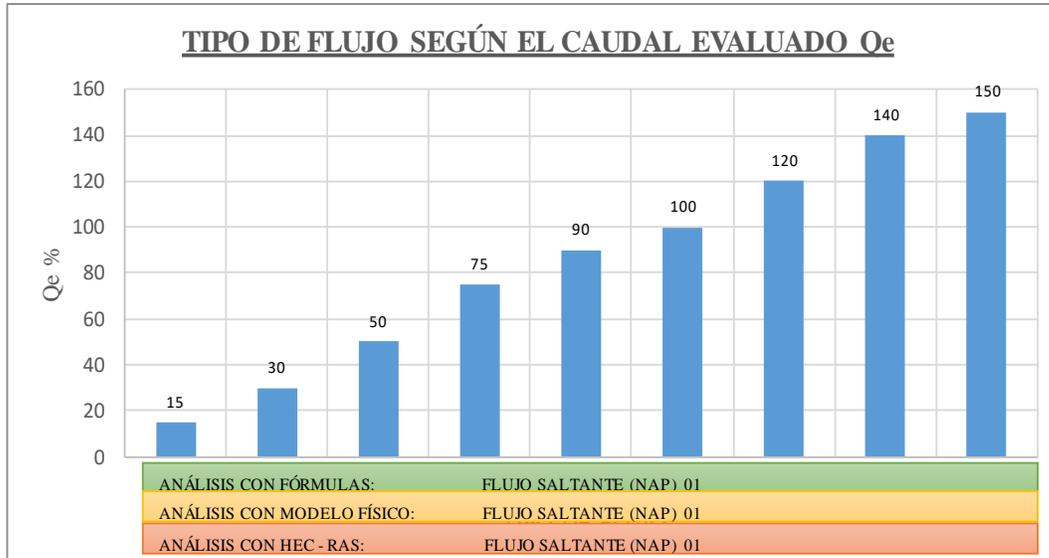


Figura N° 128. Gráfica de Resultados Finales en %

El flujo se mantiene en condiciones de Flujo Saltante NAP hasta el Caudal Evaluado de $Q_e = 105.0 \text{ m}^3/\text{seg}$, como se puede ver en la **Figura N° 129**.

Gráfica de Resultados Finales en m^3/seg

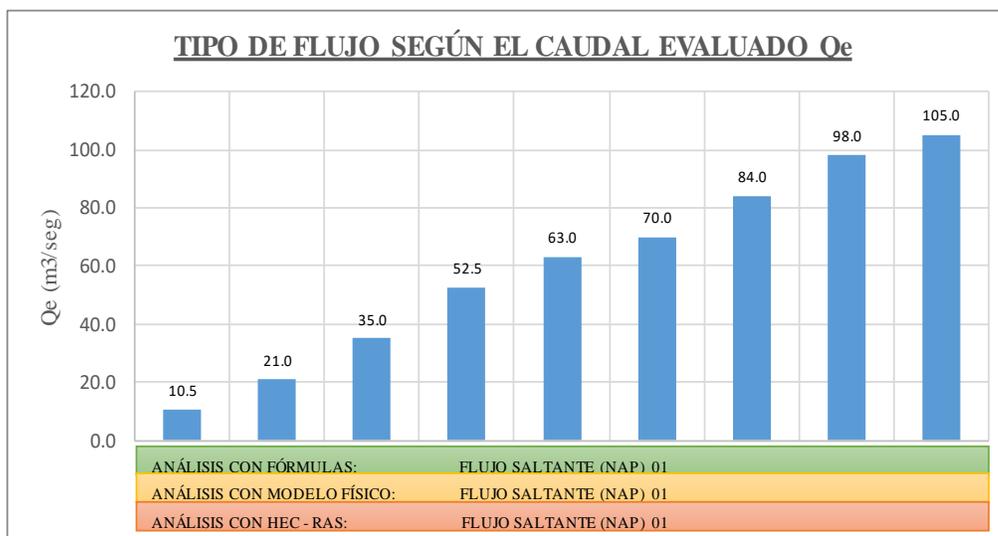


Figura N° 129. Gráfica de Resultados Finales en m^3/seg .

3.1.4.1 Comparación de Resultados para un Caudal del 15% (10.5 m³/seg) del Caudal de Diseño.

Se realizó la comparación de los resultados para el 15 % del caudal de diseño Q_d, los resultados se pueden observar en la siguiente Tabla y gráficas.

Tabla 76. Comparación al 15% (10.5 m³/seg) del Caudal de Diseño.

ANÁLISIS DEL FLUJO SALTANTE (NAP) CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

$$Q = 15 \%$$

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)					
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR	
				REAL	E: 1/75
DATOS					
1	Caudal de diseño	Q _d	m ³ /seg	70.00	0.0014
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Q _e	%	15	
3	Caudal a evaluar	Q _e	m ³ /seg	10.5	0.0002
4	Caudal a evaluar por canal.	Q _{pc}	m ³ /seg	5.25	0.0001
5	Altura de escalón	h	m	4.65	0.06
6	Longitud de escalón	l	m	19.3	0.26
7	Ancho de escalón	W	m	7.95	0.11

COMPARACIÓN						
DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	ANÁLISIS	MODELO	SOFTWARE	
			FÓRMULAS	M. FÍSICO	HEC-RAS	
8	Tirante Conjugado Menor	y ₁	m	0.09	1.43	---
9	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V ₁	m/seg	7.01	0.46	---
10	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F ₁	0	7.29	0.12	---
11	Tirante Conjugado Mayor	y ₂	m	0.96	1.80	---
12	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V ₂	m/seg	0.69	0.37	---
13	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F ₂	0	0.22	0.09	---
14	Tirante Normal	y _n	m	0.50	1.65	1.49
15	Tirante en el Borde del Escalón	y _b	m	0.25	0.45	0.35
16	Longitud de Resalto	L _r	m	1.11	5.25	---
17	Distancia de Impacto del Chorro	L _d	m	2.48	---	---
18	Espesor del Chorro de Agua	y _i	m	0.07	---	---

En las siguientes gráficas se pueden observar la diferencia que hay entre los tirantes y longitudes de los parámetros hidráulicos de los escalones para un caudal de 15 % (10.5 m³/seg) del caudal de diseño.

GRÁFICAS COMPARATIVAS $Q = 15 \%$

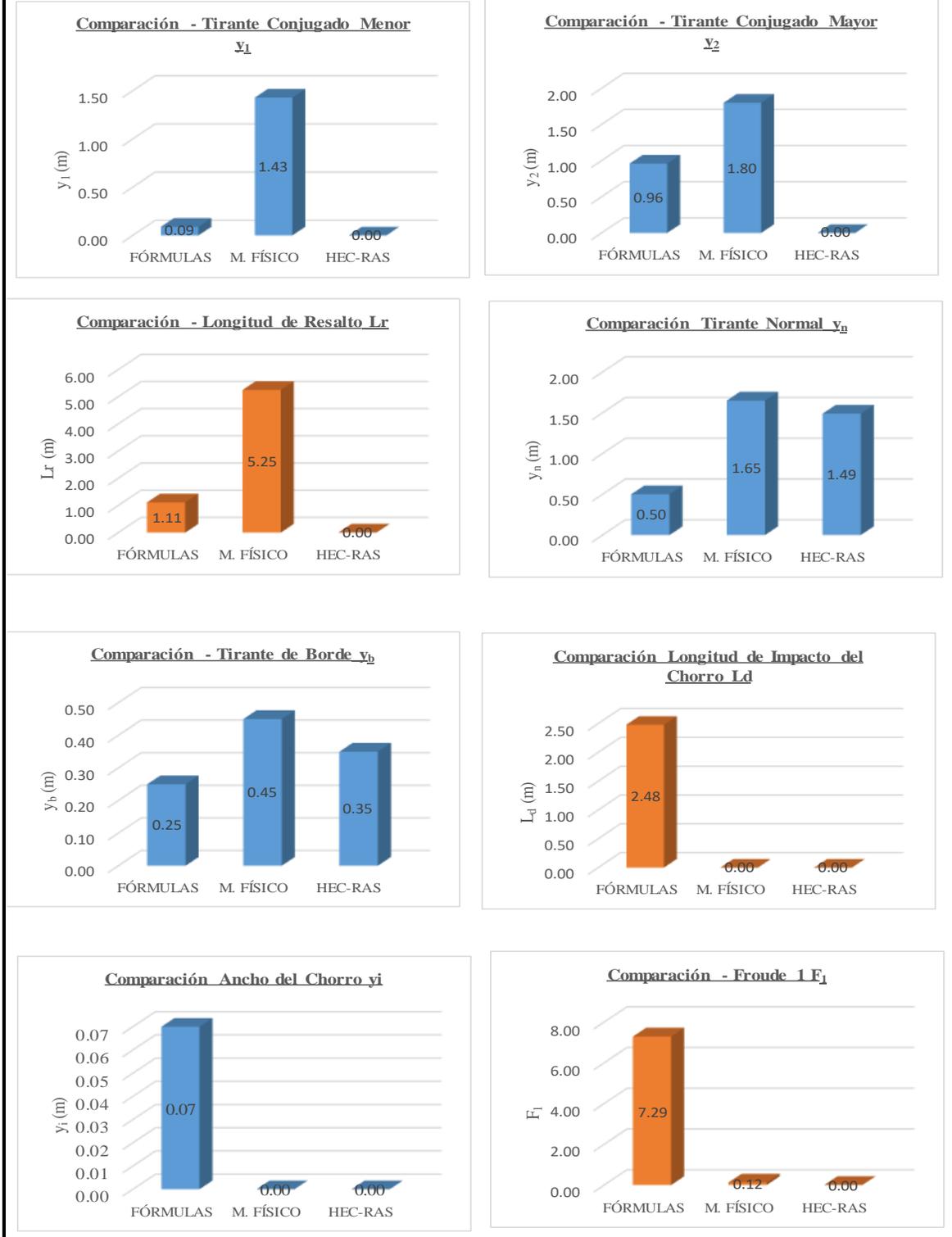


Figura N° 130. Parámetros Hidráulicos al 15% (10.5 m³/seg) del Caudal de Diseño.

3.1.4.2 Comparación de Resultados para un Caudal del 30% (21 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Se realizó la comparación de los resultados para el 30 % del caudal de diseño Qd, los resultados se pueden observar en la siguiente Tabla y gráficas.

Tabla 77. Comparación al 30% (21 m3/seg) del Caudal de Diseño.

ANÁLISIS DEL FLUJO SALTANTE (NAP) CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

$$Q = 30 \%$$

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)					
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR REAL	VALOR E: 1/75
DATOS					
1	Caudal de diseño	Qd	m3/seg	70.00	0.0014
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	30	
3	Caudal a evaluar	Qe	m3/seg	21	0.0004
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m3/seg	10.5	0.0002
5	Altura de escalón	h	m	4.65	0.06
6	Longitud de escalón	l	m	19.3	0.26
7	Ancho de escalón	W	m	7.95	0.11

COMPARACIÓN						
DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	ANÁLISIS	MODELO	SOFTWARE	
			FÓRMULAS	M. FÍSICO	HEC-RAS	
8	Tirante Conjugado Menor	y ₁	m	0.17	1.50	---
9	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V ₁	m/seg	7.78	0.88	---
10	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F ₁	0	6.02	0.23	---
11	Tirante Conjugado Mayor	y ₂	m	1.39	2.10	---
12	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V ₂	m/seg	0.95	0.63	---
13	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F ₂	0	0.26	0.14	---
14	Tirante Normal	y _n	m	0.78	1.88	1.79
15	Tirante en el Borde del Escalón	y _b	m	0.40	0.75	0.56
16	Longitud de Resalto	Lr	m	1.98	5.63	---
17	Distancia de Impacto del Chorro	Ld	m	3.61	---	---
18	Espesor del Chorro de Agua	y _i	m	0.14	---	---

En las siguientes gráficas se pueden observar la diferencia que hay entre los tirantes y longitudes de los parámetros hidráulicos de los escalones para un caudal de 30 % (21 m³/seg) del caudal de diseño.

GRÁFICAS COMPARATIVAS $Q = 30 \%$

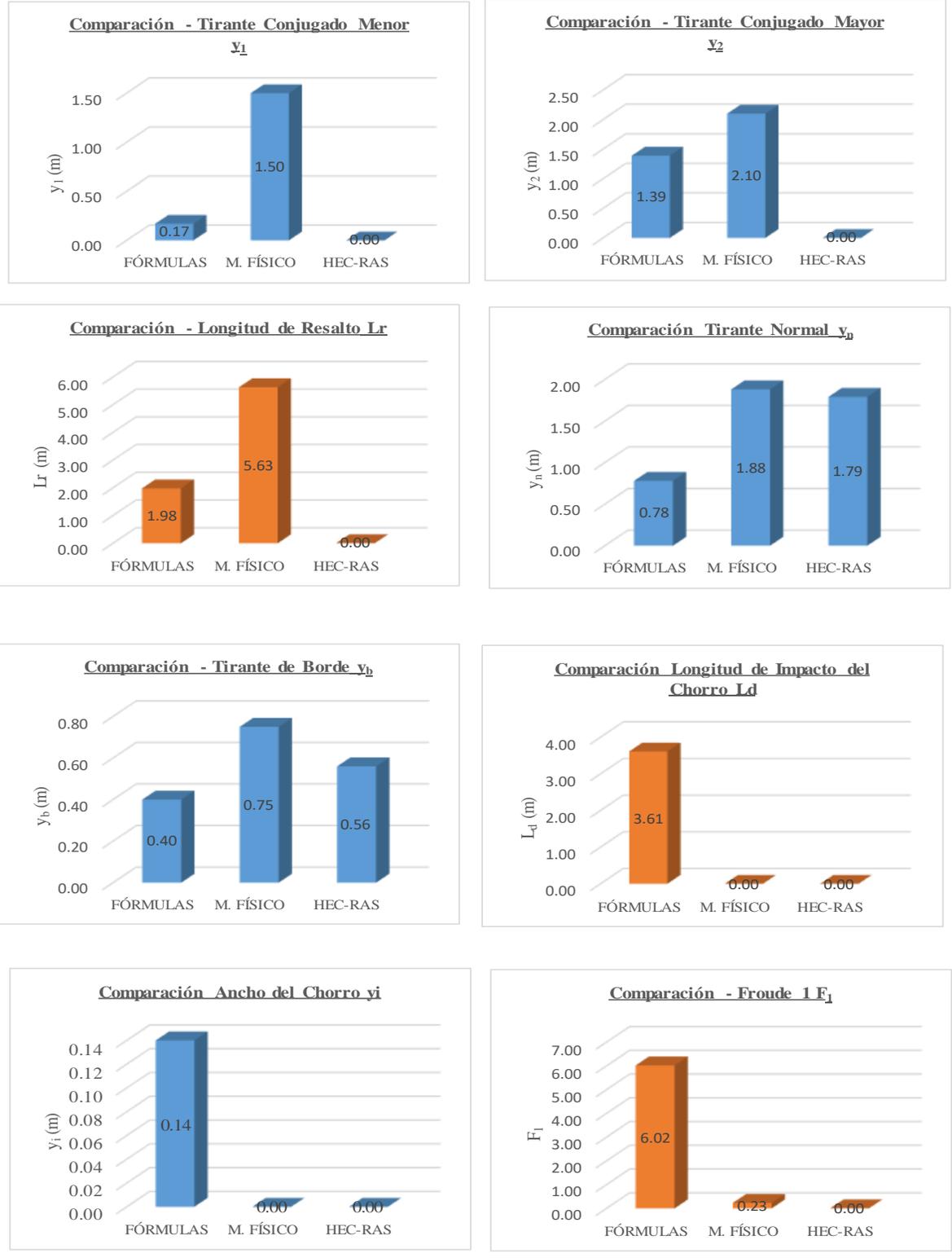


Figura N° 131. Parámetros Hidráulicos al 30% (21 m³/seg) del Caudal de Diseño.

3.1.4.3 Comparación de Resultados para un Caudal del 50% (35 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Se realizó la comparación de los resultados para el 50 % del caudal de diseño Qd, los resultados se pueden observar en la siguiente Tabla y gráficas.

Tabla 78. Comparación al 50% (35 m3/seg) del Caudal de Diseño.

ANÁLISIS DEL FLUJO SALTANTE (NAP) CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Q = 50 %

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)						
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR		
				REAL	E: 1/75	
DATOS						
1	Caudal de diseño	Qd	m3/seg	70.00	0.0014	
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	50		
3	Caudal a evaluar	Qe	m3/seg	35	0.0007	
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m3/seg	17.5	0.0004	
5	Altura de escalón	h	m	4.65	0.06	
6	Longitud de escalón	l	m	19.3	0.26	
7	Ancho de escalón	W	m	7.95	0.11	
COMPARACIÓN						
DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	ANÁLISIS			
			FÓRMULAS	M. FÍSICO	HEC-RAS	
SOFTWARE						
8	Tirante Conjugado Menor	y_1	m	0.26	1.80	---
9	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V_1	m/seg	8.39	1.22	---
10	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F_1	0	5.23	0.29	---
11	Tirante Conjugado Mayor	y_2	m	1.84	2.48	---
12	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V_2	m/seg	1.20	0.89	---
13	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F_2	0	0.28	0.18	---
14	Tirante Normal	y_n	m	1.08	2.18	2.12
15	Tirante en el Borde del Escalón	y_b	m	0.57	1.13	0.79
16	Longitud de Resalto	L_r	m	3.00	6.00	---
17	Distancia de Impacto del Chorro	L_d	m	4.76	---	---
18	Espesor del Chorro de Agua	y_i	m	0.23	---	---

En las siguientes gráficas se pueden observar la diferencia que hay entre los tirantes y longitudes de los parámetros hidráulicos de los escalones para un caudal de 50 % (35 m³/seg) del caudal de diseño.

GRÁFICAS COMPARATIVAS $Q = 50 \%$

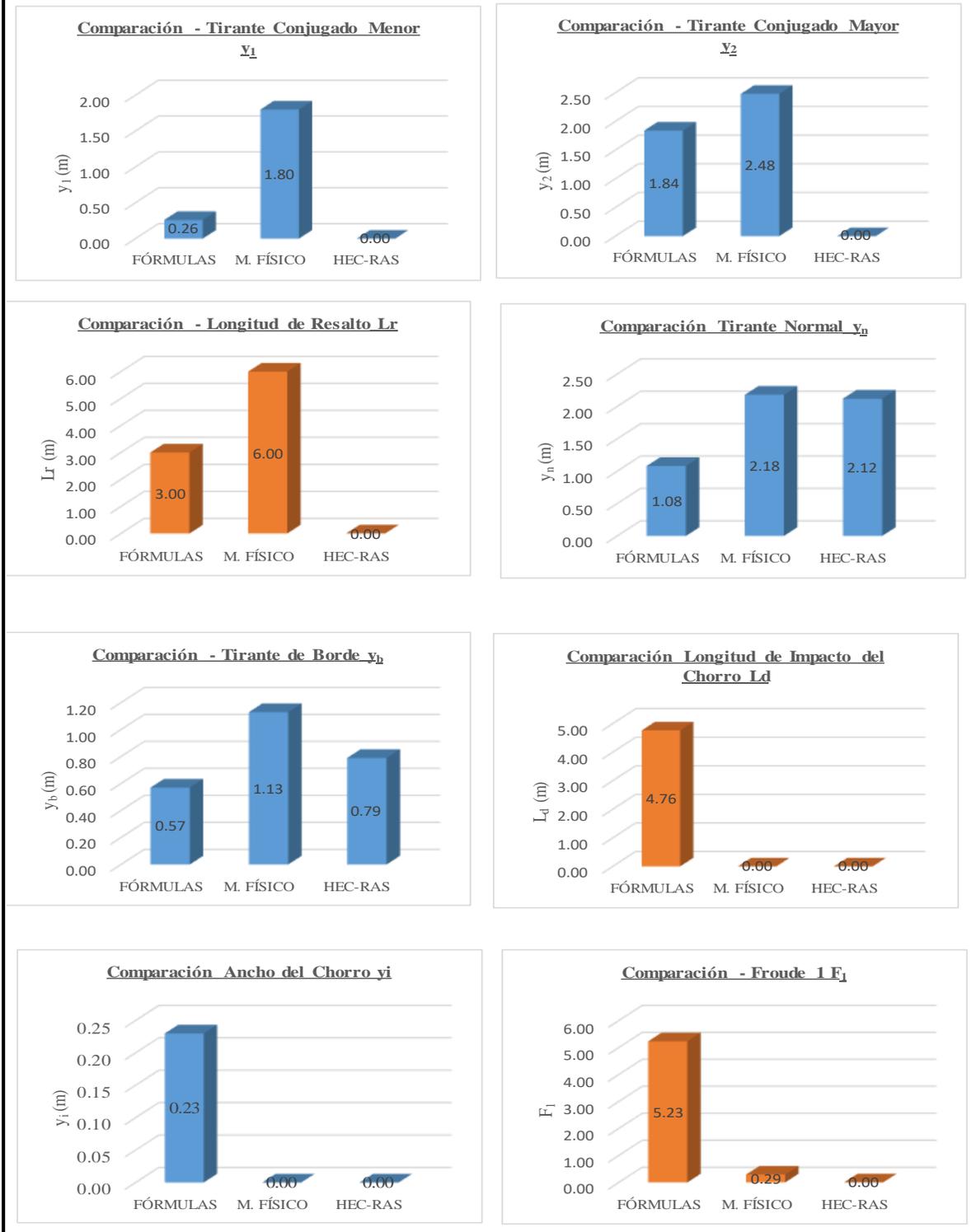


Figura N° 132. Parámetros Hidráulicos al 50% (35 m³/seg) del Caudal de Diseño.

3.1.4.4 Comparación de Resultados para un Caudal del 75% (52.5 m³/seg) del Caudal de Diseño.

Se realizó la comparación de los resultados para el 75 % del caudal de diseño Q_d, los resultados se pueden observar en la siguiente Tabla y gráficas.

Tabla 79. Comparación al 75% (52.5 m³/seg) del Caudal de Diseño.

ANÁLISIS DEL FLUJO SALTANTE (NAP) CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Q = 75 %

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)					
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR	
				REAL	E: 1/75
DATOS					
1	Caudal de diseño	Q _d	m ³ /seg	70.00	0.0014
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Q _e	%	75	
3	Caudal a evaluar	Q _e	m ³ /seg	52.5	0.0011
4	Caudal a evaluar por canal.	Q _{pc}	m ³ /seg	26.25	0.0005
5	Altura de escalón	h	m	4.65	0.06
6	Longitud de escalón	l	m	19.3	0.26
7	Ancho de escalón	W	m	7.95	0.11

COMPARACIÓN						
DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	ANÁLISIS	MODELO	SOFTWARE	
			FÓRMULAS	M. FÍSICO	HEC-RAS	
8	Tirante Conjugado Menor	y ₁	m	0.37	1.95	0.32
9	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V ₁	m/seg	8.92	1.69	10.28
10	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F ₁	0	4.68	0.39	5.79
11	Tirante Conjugado Mayor	y ₂	m	2.29	2.85	2.46
12	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V ₂	m/seg	1.44	1.16	1.34
13	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F ₂	0	0.30	0.22	0.27
14	Tirante Normal	y _n	m	1.42	2.25	2.46
15	Tirante en el Borde del Escalón	y _b	m	0.74	1.13	1.03
16	Longitud de Resalto	L _r	m	4.13	6.38	1.10
17	Distancia de Impacto del Chorro	L _d	m	5.92	4.88	---
18	Espesor del Chorro de Agua	y _i	m	0.34	0.30	---

En las siguientes gráficas se pueden observar la diferencia que hay entre los tirantes y longitudes de los parámetros hidráulicos de los escalones para un caudal de 75 % (52.5 m³/seg) del caudal de diseño.

GRÁFICAS COMPARATIVAS $Q = 75 \%$

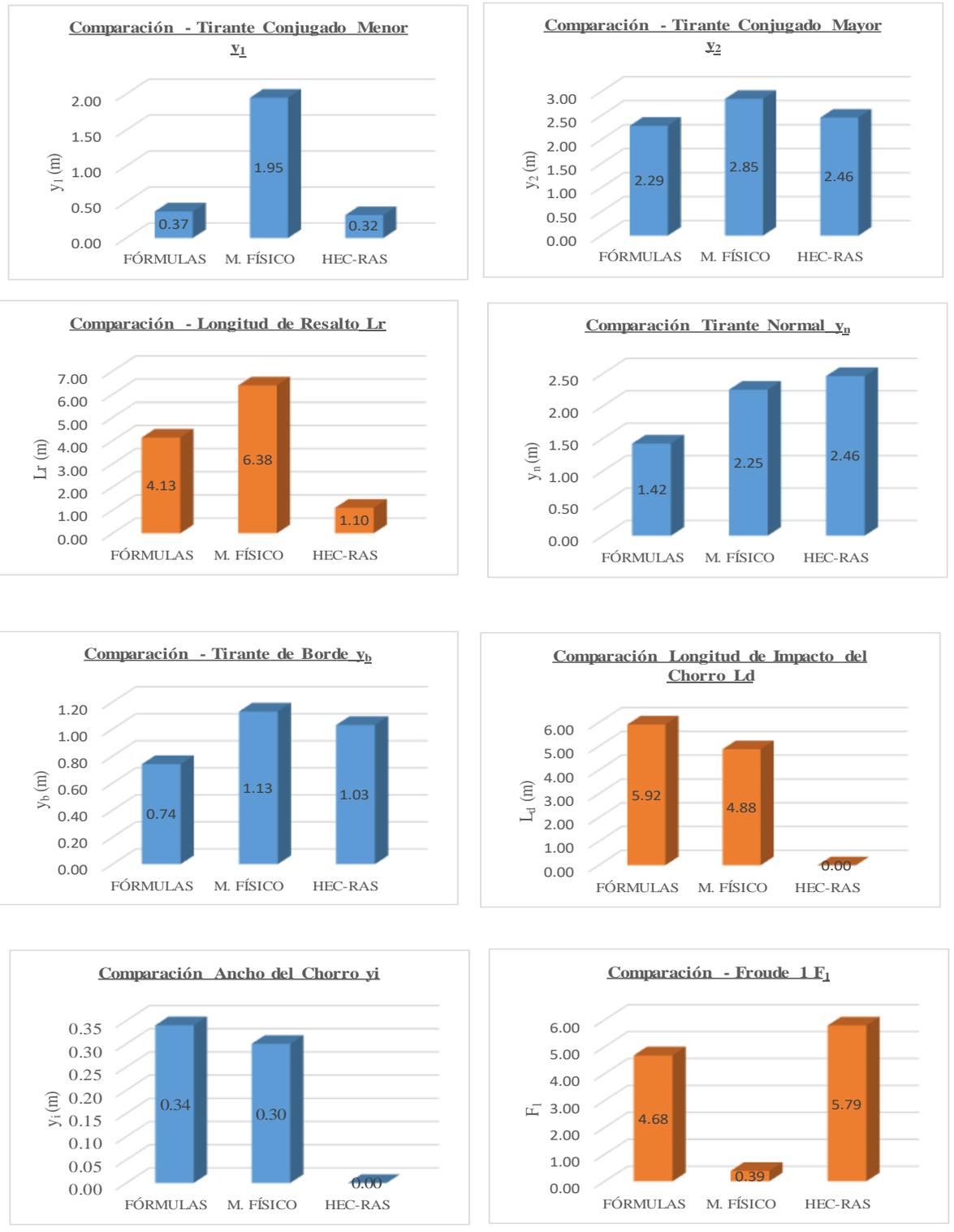


Figura N° 133. Parámetros Hidráulicos al 75% (52.5 m³/seg) del Caudal de Diseño.

3.1.4.5 Comparación de Resultados para un Caudal del 90% (63 m³/seg) del Caudal de Diseño.

Se realizó la comparación de los resultados para el 90% del caudal de diseño Q_d, los resultados se pueden observar en la siguiente Tabla y gráficas.

Tabla 80. Comparación al 90% (63 m³/seg) del Caudal de Diseño.

ANÁLISIS DEL FLUJO SALTANTE (NAP) CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

$$Q = 90 \%$$

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)						
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR		
				REAL	E: 1/75	
DATOS						
1	Caudal de diseño	Q _d	m ³ /seg	70.00	0.0014	
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Q _e	%	90		
3	Caudal a evaluar	Q _e	m ³ /seg	63	0.0013	
4	Caudal a evaluar por canal.	Q _{pc}	m ³ /seg	31.5	0.0006	
5	Altura de escalón	h	m	4.65	0.06	
6	Longitud de escalón	l	m	19.3	0.26	
7	Ancho de escalón	W	m	7.95	0.11	
COMPARACIÓN						
	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	ANÁLISIS	MODELO	SOFTWARE
				FÓRMULAS	M. FÍSICO	HEC-RAS
8	Tirante Conjugado Menor	y ₁	m	0.43	2.03	0.38
9	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V ₁	m/seg	9.17	1.95	10.41
10	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F ₁	0	4.45	0.44	5.39
11	Tirante Conjugado Mayor	y ₂	m	2.52	2.93	2.64
12	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V ₂	m/seg	1.57	1.35	1.50
13	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F ₂	0	0.32	0.25	0.30
14	Tirante Normal	y _n	m	1.60	2.48	2.64
15	Tirante en el Borde del Escalón	y _b	m	0.84	1.20	1.17
16	Longitud de Resalto	L _r	m	4.75	4.13	4.40
17	Distancia de Impacto del Chorro	L _d	m	6.54	5.55	---
18	Espesor del Chorro de Agua	y _i	m	0.41	0.38	---

En las siguientes gráficas se pueden observar la diferencia que hay entre los tirantes y longitudes de los parámetros hidráulicos de los escalones para un caudal de 90 % (63 m³/seg) del caudal de diseño.

GRÁFICAS COMPARATIVAS $Q = 90 \%$



Figura N° 134. Parámetros Hidráulicos al 90% (63 m³/seg) del Caudal de Diseño.

3.1.4.6 Comparación de Resultados para un Caudal del 100% (70 m³/seg) del Caudal de Diseño.

Se realizó la comparación de los resultados para el 100 % del caudal de diseño Q_d, los resultados se pueden observar en la siguiente Tabla y gráficas.

Tabla 81. Comparación al 100% (70 m³/seg) del Caudal de Diseño.

ANÁLISIS DEL FLUJO SALTANTE (NAP) CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Q = 100 %

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)					
Nº	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR	
				REAL	E: 1/75
DATOS					
1	Caudal de diseño	Q _d	m ³ /seg	70.00	0.0014
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Q _e	%	100	
3	Caudal a evaluar	Q _e	m ³ /seg	70	0.0014
4	Caudal a evaluar por canal.	Q _{pc}	m ³ /seg	35	0.0007
5	Altura de escalón	h	m	4.65	0.06
6	Longitud de escalón	l	m	19.3	0.26
7	Ancho de escalón	W	m	7.95	0.11

COMPARACIÓN						
DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	ANÁLISIS	MODELO	SOFTWARE	
			FÓRMULAS	M. FÍSICO	HEC-RAS	
8	Tirante Conjugado Menor	y ₁	m	0.47	2.18	0.42
9	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V ₁	m/seg	9.31	2.02	10.49
10	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F ₁	0	4.33	0.44	5.17
11	Tirante Conjugado Mayor	y ₂	m	2.67	3.00	2.75
12	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V ₂	m/seg	1.65	1.47	1.60
13	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F ₂	0	0.32	0.27	0.31
14	Tirante Normal	y _n	m	1.72	2.55	2.75
15	Tirante en el Borde del Escalón	y _b	m	0.90	1.28	1.25
16	Longitud de Resalto	L _r	m	5.14	4.50	5.50
17	Distancia de Impacto del Chorro	L _d	m	6.92	5.63	---
18	Espesor del Chorro de Agua	y _i	m	0.46	0.45	---

En las siguientes gráficas se pueden observar la diferencia que hay entre los tirantes y longitudes de los parámetros hidráulicos de los escalones para un caudal de 100 % (70 m³/seg) del caudal de diseño.

GRÁFICAS COMPARATIVAS $Q = 100 \%$



Figura N° 135. Parámetros Hidráulicos al 100% (70 m³/seg) del Caudal de Diseño.

3.1.4.7 Comparación de Resultados para un Caudal del 120% (84 m³/seg) del Caudal de Diseño.

Se realizó la comparación de los resultados para el 120 % del caudal de diseño Q_d, los resultados se pueden observar en la siguiente Tabla y gráficas.

Tabla 82. Comparación al 120% (84 m³/seg) del Caudal de Diseño.

ANÁLISIS DEL FLUJO SALTANTE (NAP) CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Q = 120 %

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)					
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR	
				REAL	E: 1/75
DATOS					
1	Caudal de diseño	Q _d	m ³ /seg	70.00	0.0014
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Q _e	%	120	
3	Caudal a evaluar	Q _e	m ³ /seg	84	0.0017
4	Caudal a evaluar por canal.	Q _{pc}	m ³ /seg	42	0.0009
5	Altura de escalón	h	m	4.65	0.06
6	Longitud de escalón	l	m	19.3	0.26
7	Ancho de escalón	W	m	7.95	0.11

COMPARACIÓN						
	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	SOFTWARE		
				ANÁLISIS FÓRMULAS	MODELO M. FÍSICO	HEC-RAS
8	Tirante Conjugado Menor	y ₁	m	0.55	1.88	0.50
9	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V ₁	m/seg	9.57	2.81	10.63
10	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F ₁	0	4.11	0.65	4.82
11	Tirante Conjugado Mayor	y ₂	m	2.95	3.15	2.97
12	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V ₂	m/seg	1.79	1.68	1.78
13	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F ₂	0	0.33	0.30	0.33
14	Tirante Normal	y _n	m	1.95	2.63	2.97
15	Tirante en el Borde del Escalón	y _b	m	1.01	1.43	1.41
16	Longitud de Resalto	L _r	m	5.88	5.25	12.10
17	Distancia de Impacto del Chorro	L _d	m	7.64	6.38	---
18	Espesor del Chorro de Agua	y _i	m	0.55	0.60	---

En las siguientes gráficas se pueden observar la diferencia que hay entre los tirantes y longitudes de los parámetros hidráulicos de los escalones para un caudal de 120 % (84 m³/seg) del caudal de diseño.

GRÁFICAS COMPARATIVAS $Q = 120 \%$

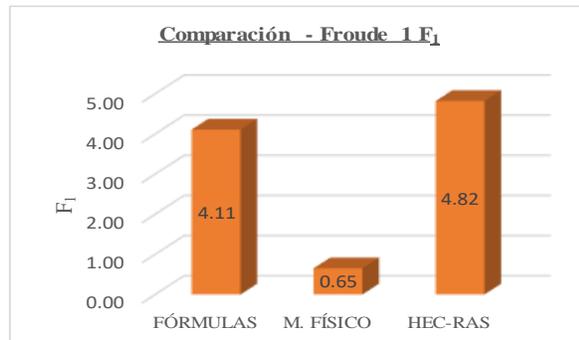
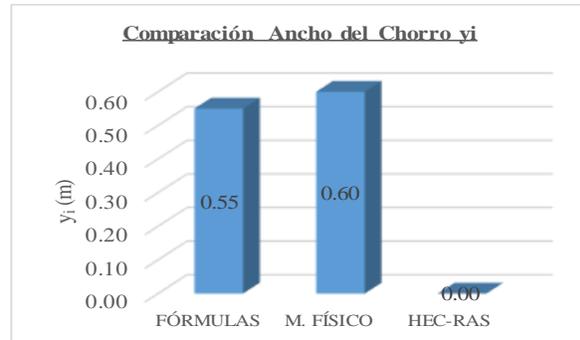
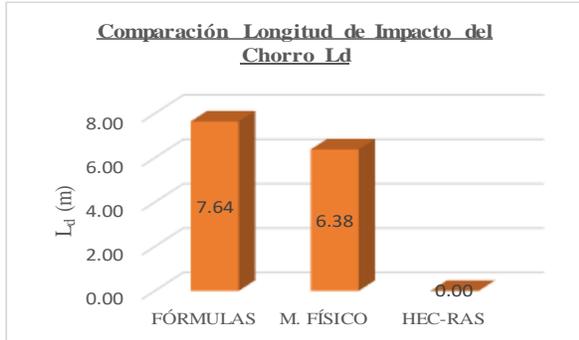
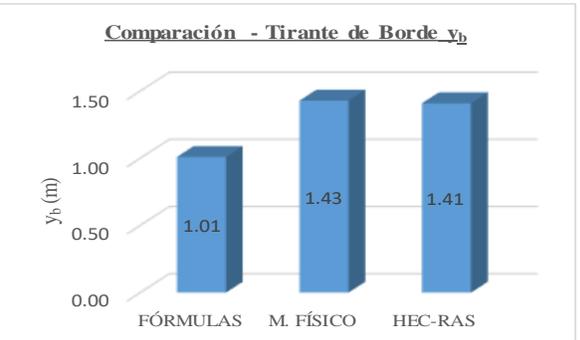
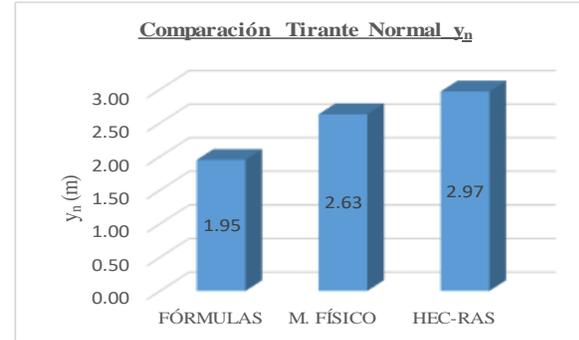
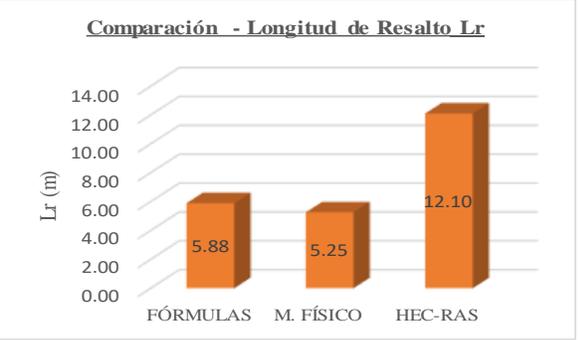
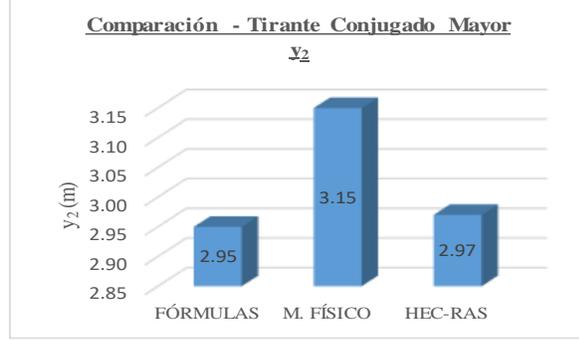
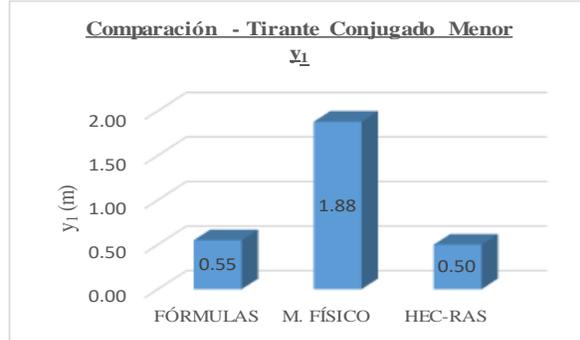


Figura N° 136. Parámetros Hidráulicos al 120% (84 m³/seg) del Caudal de Diseño.

3.1.4.8 Comparación de Resultados para un Caudal del 140% (98 m³/seg) del Caudal de Diseño.

Se realizó la comparación de los resultados para el 140 % del caudal de diseño Q_d, los resultados se pueden observar en la siguiente Tabla y gráficas.

Tabla 83. Comparación al 140% (98 m³/seg) del Caudal de Diseño.

ANÁLISIS DEL FLUJO SALTANTE (NAP) CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

$$Q = 140 \%$$

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)					
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR	
				REAL	E: 1/75
DATOS					
1	Caudal de diseño	Q _d	m ³ /seg	70.00	0.0014
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Q _e	%	140	
3	Caudal a evaluar	Q _e	m ³ /seg	98	0.0020
4	Caudal a evaluar por canal.	Q _{pc}	m ³ /seg	49	0.0010
5	Altura de escalón	h	m	4.65	0.06
6	Longitud de escalón	l	m	19.3	0.26
7	Ancho de escalón	W	m	7.95	0.11

COMPARACIÓN						
DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	ANÁLISIS	MODELO	SOFTWARE	
			FÓRMULAS	M. FÍSICO	HEC-RAS	
8	Tirante Conjugado Menor	y ₁	m	0.63	1.88	0.57
9	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V ₁	m/seg	9.80	3.28	10.77
10	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F ₁	0	3.94	0.76	4.55
11	Tirante Conjugado Mayor	y ₂	m	3.20	3.30	3.17
12	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V ₂	m/seg	1.92	1.87	1.94
13	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F ₂	0	0.34	0.33	0.35
14	Tirante Normal	y _n	m	2.17	2.70	3.17
15	Tirante en el Borde del Escalón	y _b	m	1.12	1.65	1.57
16	Longitud de Resalto	L _r	m	6.56	6.00	16.50
17	Distancia de Impacto del Chorro	L _d	m	8.30	7.13	---
18	Espesor del Chorro de Agua	y _i	m	0.64	0.75	---

En las siguientes gráficas se pueden observar la diferencia que hay entre los tirantes y longitudes de los parámetros hidráulicos de los escalones para un caudal de 140 % (98 m³/seg) del caudal de diseño.

GRÁFICAS COMPARATIVAS $Q = 140 \%$

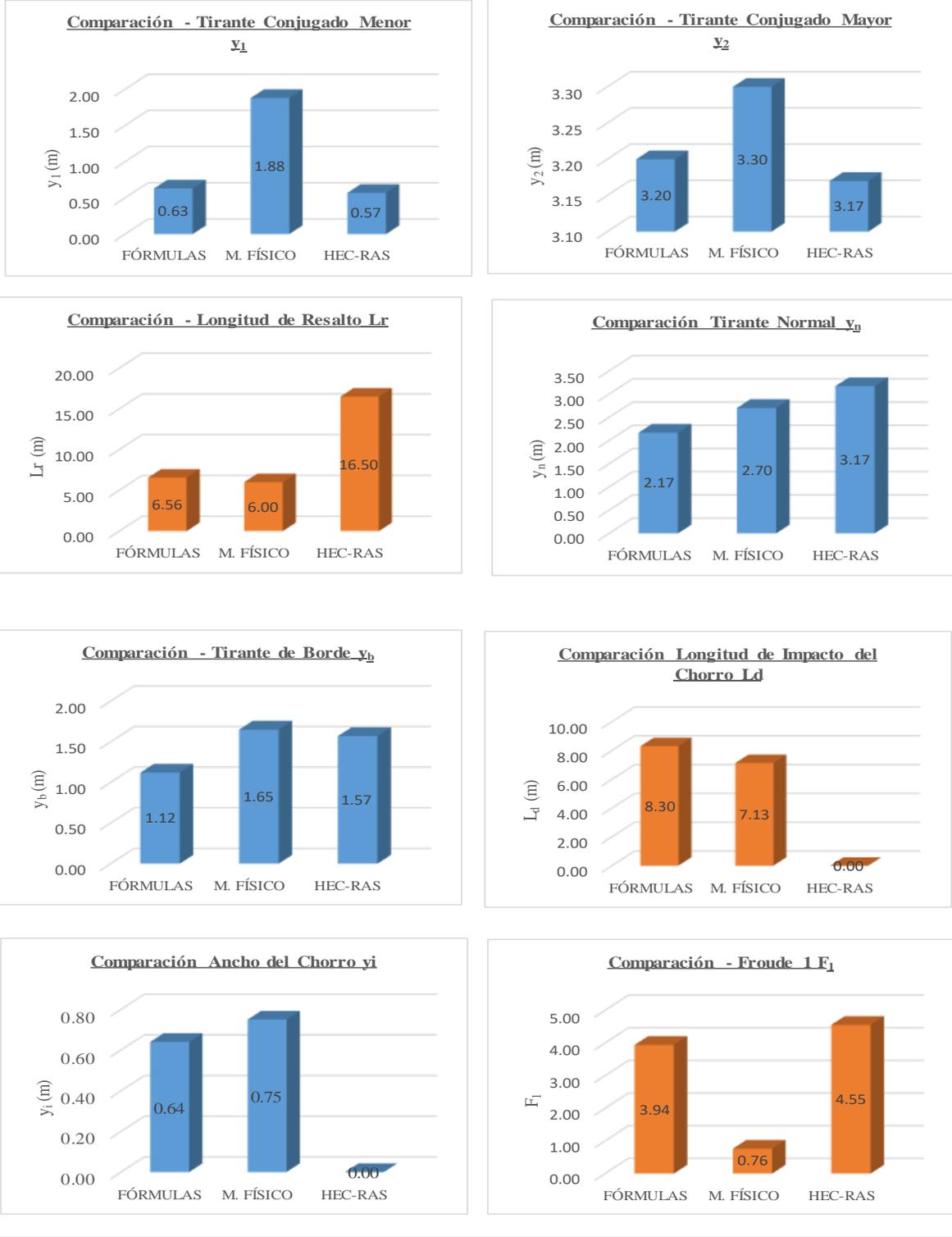


Figura N° 137. Parámetros Hidráulicos al 140% (98 m³/seg) del Caudal de Diseño.

3.1.4.9 Comparación de Resultados para un Caudal del 150% (105 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Se realizó la comparación de los resultados para el 150 % del caudal de diseño Qd, los resultados se pueden observar en la siguiente Tabla y gráficas.

Tabla 84. Comparación al 150% (105 m3/seg) del Caudal de Diseño.

ANÁLISIS DEL FLUJO SALTANTE (NAP) CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

$$Q = 150 \%$$

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)					
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR	
				REAL	E: 1/75
DATOS					
1	Caudal de diseño	Qd	m3/seg	70.00	0.0014
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	150	
3	Caudal a evaluar	Qe	m3/seg	105	0.0022
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m3/seg	52.5	0.0011
5	Altura de escalón	h	m	4.65	0.06
6	Longitud de escalón	l	m	19.3	0.26
7	Ancho de escalón	W	m	7.95	0.11
COMPARACIÓN					
	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	ANÁLISIS	MODELO SOFTWARE
				FÓRMULAS	M. FÍSICO HEC-RAS
8	Tirante Conjugado Menor	y ₁	m	0.67	1.50 0.59
9	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V ₁	m/seg	9.90	4.40 11.17
10	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F ₁	0	3.87	1.15 4.64
11	Tirante Conjugado Mayor	y ₂	m	3.33	3.38 ---
12	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V ₂	m/seg	1.99	1.95 ---
13	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F ₂	0	0.35	0.34 ---
14	Tirante Normal	y _n	m	2.28	2.78 3.27
15	Tirante en el Borde del Escalón	y _b	m	1.18	1.73 1.65
16	Longitud de Resalto	Lr	m	6.88	6.38 16.50
17	Distancia de Impacto del Chorro	Ld	m	8.61	7.50 ---
18	Espesor del Chorro de Agua	y _i	m	0.68	0.83 ---

En las siguientes gráficas se pueden observar la diferencia que hay entre los tirantes y longitudes de los parámetros hidráulicos de los escalones para un caudal de 150 % (105 m³/seg) del caudal de diseño.

GRÁFICAS COMPARATIVAS $Q = 150 \%$

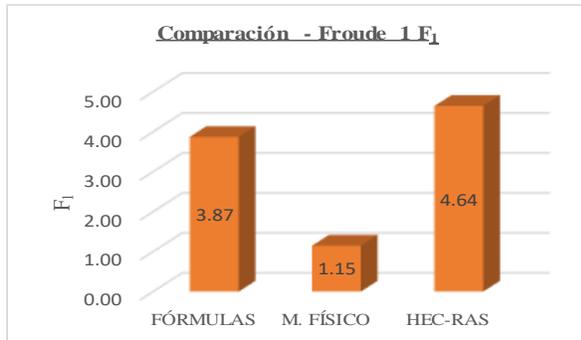
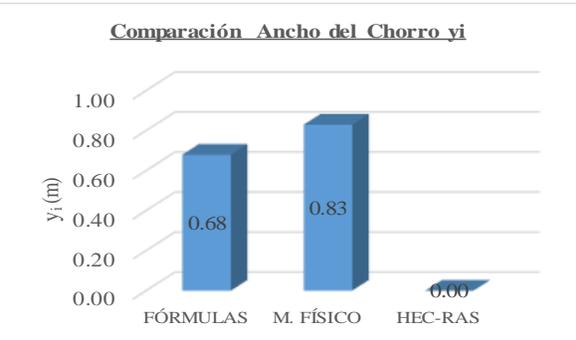
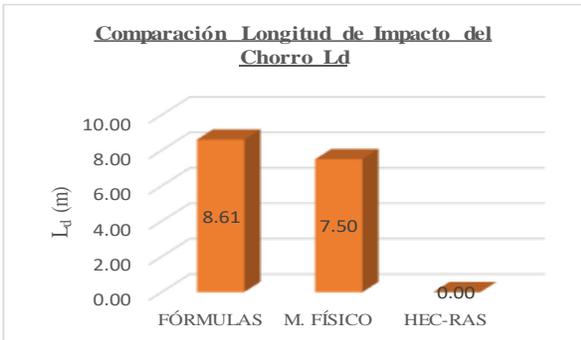
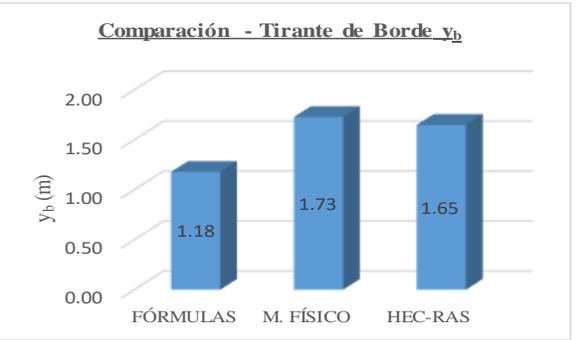
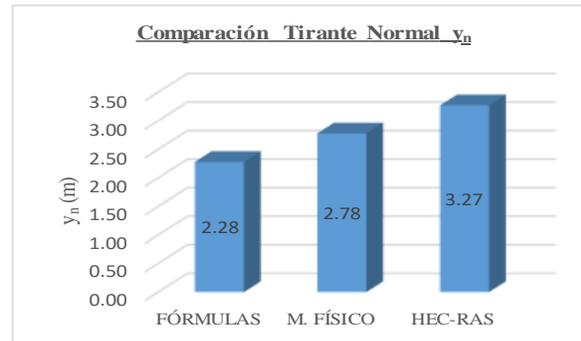
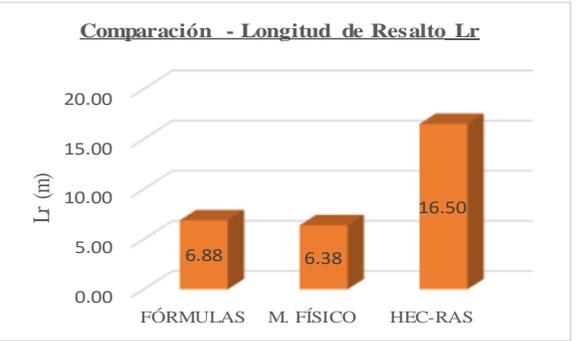
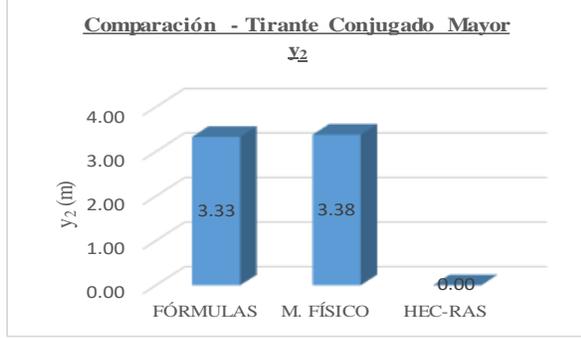
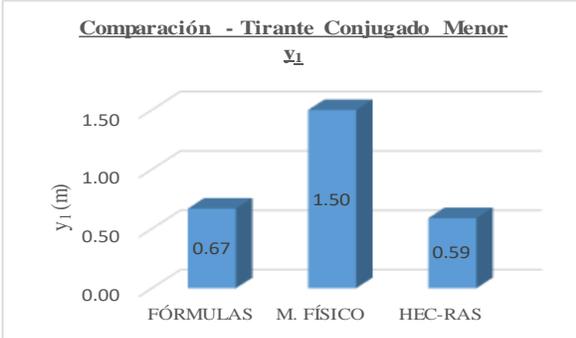


Figura N° 138. Parámetros Hidráulicos al 150% (105 m³/seg) del Caudal de Diseño.

Para una mejor interpretación de los resultados comparativos se realizó un cuadro resumen de los parámetros hidráulicos más resaltantes, como se puede apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 85. Resumen de Comparación de Resultados.

**ANÁLISIS DEL FLUJO SALTANTE (NAP)
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO**

RESÚMEN - COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Item N°	Caudal Qe %	y ₁		y ₂		Lr		y _n		y ₁		y _b		Ld		F ₁					
		MF	AF	MF	AF	MF	AF	MF	AF	MF	AF	MF	AF	MF	AF	MF	AF				
1	15	10.50	0.09	1.43	---	0.96	1.80	---	0.50	1.65	1.49	0.07	---	0.25	0.45	0.35	2.48	---	7.29	0.12	---
2	30	21.00	0.17	1.50	---	1.39	2.10	---	0.78	1.88	1.79	0.14	---	0.40	0.75	0.56	3.61	---	6.02	0.23	---
3	50	35.00	0.26	1.80	---	1.84	2.48	---	1.08	2.18	2.12	0.23	---	0.57	1.13	0.79	4.76	---	5.23	0.29	---
4	75	52.50	0.37	1.95	0.32	2.29	2.85	2.46	1.42	2.25	2.46	0.34	0.30	0.74	1.13	1.03	5.92	4.88	4.68	0.39	5.79
5	90	63.00	0.43	2.03	0.38	2.52	2.93	2.64	1.60	2.48	2.64	0.41	0.38	0.84	1.20	1.17	6.54	5.55	4.45	0.44	5.39
6	100	70.00	0.47	2.18	0.42	2.67	3.00	2.75	1.72	2.55	2.75	0.46	0.45	0.90	1.28	1.25	6.92	5.63	4.33	0.44	5.17
7	120	84.00	0.55	1.88	0.50	2.95	3.15	2.97	1.95	2.63	2.97	0.55	0.60	1.01	1.43	1.41	7.64	6.38	4.11	0.65	4.82
8	140	98.00	0.63	1.88	0.57	3.20	3.30	3.17	2.17	2.70	3.17	0.64	0.75	1.12	1.65	1.57	8.30	7.13	3.94	0.76	4.55
9	150	105.00	0.67	1.50	0.59	3.33	3.38	---	2.28	2.78	3.27	0.68	0.83	1.18	1.73	1.65	8.61	7.50	3.87	1.15	4.64

Donde:

- y₁ = Tirante Conjugado Menor (m)
- y₂ = Tirante Conjugado Mayor (m)
- F₁ = Número de Froude en Tirante Conjugado Menor
- y_n = Tirante Normal (m)
- y_b = Tirante en el Borde del Escalón (m)
- Lr = Longitud de Resalto Hidráulico (m)
- Ld = Distancia de Impacto del Chorro (m)
- y_i = Espesor del Chorro de Agua (m).
- AF= Análisis con Fórmulas
- MF= Análisis con Modelo Físico
- HEC - RAS= Análisis con software Hec - Ras.

3.1.4.10 Descripción de Resultados Comparativos de Parámetros Hidráulicos Analizados

Descripción del Tirante Conjugado Menor y_1

En las gráficas del tirante conjugado menor y_1 se observan que los resultados tienen una sola tendencia para los 3 elementos evaluados (Fórmulas, Modelo Físico y Hec – Ras), la tendencia tiene una forma ascendente para análisis con fórmulas hasta análisis con Modelo Físico y una forma descendente de Modelo Físico a análisis con Hec – Ras, con excepción de que para un rango de 15% al 50% para análisis con Hec – Ras no presenta un valor de tirante y_1 definido.

Descripción del Tirante Conjugado Mayor y_2

En las gráficas del tirante conjugado mayor y_2 se aprecian que los valores tienen una sola tendencia para los 3 elementos evaluados, en la mayoría de caudales evaluados adoptando una forma ascendente de Fórmulas hasta Modelo Físico y descendente para Modelo Físico a Hec – Ras, con excepción de que para un rango del 15% -50% y además para el 150% del análisis con Hec – Ras no presenta un valor de y_2 definido.

Descripción del Longitud de Resalto Hidráulico L_r

En las gráficas de la longitud de resalto L_r se observan 2 tendencias para los 3 elementos evaluados, la primera tendencia para un rango de caudales de 15% - 75% y la segunda tendencia para un rango de 90% - 150%. La primera tendencia es de forma ascendente de análisis con Fórmulas hasta Modelo Físico y descendente de Modelo Físico hasta Hec – Ras, con una excepción de que para un rango de caudales de 15 – 50% para Hec – Ras no se presenta un valor definido. La segunda tendencia presenta una forma descendente desde análisis con Fórmulas hasta Modelo Físico y ascendente desde Modelo Físico hasta Hec - Ras.

Descripción del Tirante Normal y_n

En las gráficas del tirante normal y_n se observan 2 tendencias para los 3 elementos evaluados, la primera para un rango de caudales del 15% - 75% y la segunda tendencia para un rango de 90% - 150%. La primera tendencia de forma ascendente desde análisis con Fórmulas hasta Modelo Físico y descendente desde Modelo Físico hasta Hec – Ras. La segunda tendencia presenta una forma ascendente desde Fórmulas hasta Modelo Físico y continúa de forma ascendente de Modelo Físico hasta Hec – Ras.

Descripción del Tirante de Borde y_b

En las gráficas del tirante de borde y_b se observa una sola tendencia para todos los caudales evaluados con una forma ascendente desde análisis con Fórmulas hasta Modelo Físico y descendente desde Modelo físico hasta Hec – Ras.

Descripción del Espesor del Chorro y_i

En las gráficas del espesor del chorro y_i se observa 3 tendencias para los caudales evaluados, la primera en un rango de caudales 15% - 50%, la segunda de 75% - 100%, la tercera tendencia de 120% - 150%. La primera tendencia solamente presenta un valor para análisis con análisis con Fórmulas. La segunda de forma descendente desde Fórmulas hasta Modelo Físico sin presencia de algún valor definido para Hec Ras. La tercera de forma ascendente desde Fórmulas hasta Modelo Físico, pero de la misma manera que la anterior sin presencia de algún valor definido para Hec – ras.

Descripción de la Longitud de Impacto del Chorro L_d

En las gráficas de la Longitud de Impacto del Chorro L_d se observa 2 tendencias, la primera tendencia para un rango de caudales de 15% - 50%, la segunda para un rango de 75% - 150%. La primera tendencia solamente presenta un valor definido para análisis con Fórmulas mas no para análisis con Modelo Físico y Hec – Ras. La segunda tendencia se observa una forma descendente desde Fórmulas hasta Modelo Físico sin presencia de algún valor definido para análisis con Hec – Ras.

Descripción del Número de Froude en la Sección 1 F_1

En las gráficas del Número de Froude en la sección 1 F_1 se observa 2 tendencias, la primera para un rango de caudales de 15% - 50%, la segunda tendencia de 75 % - 150%. La primera tendencia presenta una forma descendente desde análisis con Fórmulas hasta Modelo Físico, sin presencia de algún valor definido para análisis con Hec – Ras. La segunda tendencia se aprecia una forma descendente desde análisis con Fórmulas hasta Modelo Físico y forma ascendente desde Modelo Físico hasta Hec – Ras. Además, englobando las dos tendencias para análisis con Fórmulas se tiene un régimen supercrítico en todos los caudales evaluados, al igual que para Hec – Ras, pero solamente en un rango de caudales de 75% - 150%, ya que para 15% - 50% no presenta resalto hidráulico, para lo resultados de Modelo Físico se tiene un régimen subcrítico para caudales 15% -140% y régimen supercrítico para el caudal de 150%.

3.2. Discusión de Resultados

3.2.1 Recolección de la información geométrica e hidráulica de la caída escalonada La Cascada

3.2.1.1 Inspección visual de La Caída Escalonada La Cascada.

Se realizó varias visitas a la Caída Escalonada La Cascada ubicada en el Distrito de Chongoyape a 1 km de distancia desde el mismo Distrito aproximadamente, con la finalidad de observar el funcionamiento de la estructura hidráulica, entre ellas se observó el comportamiento de flujo, en la cual se pudo apreciar el flujo de Tipo Saltante o NAPPE, en el cual el flujo realizaba saltos en cada escalón generando un chorro en cada uno de ellos. Además, en cada escalón se pudo observar ligeramente un resalto hidráulico que iniciaba justamente a continuación del punto de impacto del chorro.

El resalto hidráulico generado después del chorro probablemente es poco apreciable por el efecto de la Viga de Choque que se encuentra a una distancia cercana del punto de impacto del chorro el cual tiene un efecto de reten para el flujo impidiendo la formación normal del resalto hidráulico.

En el flujo también se pudo observar olas pequeñas a lo largo de la longitud o huella de los escalones.

Además, se realizaron más visitas para hacer mediciones de la geometría del canal siendo estas casi imposible de hacer todas las mediciones que se requerían para la construcción del modelo físico de la estructura, ya que La Cascada en todas las visitas que se realizó se encontraba operando con flujo existente no se podía medir detalles de los umbrales y las vigas de choque, por tal motivo no se realizó todas las medidas con cinta métrica, teniendo que buscar otra solución para obtener las dimensiones de La Cascada.

En todas las visitas realizadas La Cascada se pudo observar el Flujo de Tipo Saltante, sin poder observar otro Tipo de Flujo.

3.2.1.2 Visita a las instalaciones del PEOT

Al no poder obtener la información geométrica de La Cascada en las visitas de inspección realizadas, se recurrió a las oficinas del PEOT Institución encargada de la administración general de dicho proyecto, a quien se dirigió una Solicitud (**Ver Anexo N° 8**) pidiendo nos brinde información geométrica, e hidráulica de La Cascada, En la cual se obtuvo el Caudal de diseño 70 m³/seg por medio de una Entrevista (**Ver Anexo N° 9**). también se brindó la información geométrica por medio de planos virtuales en formato PDF (**Ver Anexo N° 43**).

Los planos fueron contrastados con la estructura real, en la cual se encontraron varias diferencias, como la mampostería que se tenía en los umbrales de salida y viga de choque la cual el plano indicaba concreto armado, además en la estructura real tenia umbral de salida con pared inclinada la cual no concordaba con los planos obtenidos.

3.2.2 Diseño del modelo físico a escala de la caída escalonada La Cascada.

3.2.2.1 Diseño del Modelo Físico

La selección de la escala para el diseño del modelo físico fue fundamental ya que esta escala tendría que ser factible para la construcción de dicho modelo y representativa de la estructura real siendo esta escala 1/75, inicialmente se realizó un boceto el cual representa una primera idea de la forma geométrica, funcionamiento hidráulico y materiales a utilizar, la cual se sustenta en que la forma geométrica de La Cascada se daría con material de acrílico transparente apoyada sobre parantes metálicos, estos parantes metálicos se apoyarían en una mesa también metálica. El uso de acrílico para dar la geometría del canal escalonado no representaría una similitud de la estructura real en términos de rugosidad, pudiendo utilizar otro material como aluminio, pero este al no ser un material transparente no permitiría la observación del flujo, por lo que se justifica el uso de acrílico transparente.

El funcionamiento hidráulico está dado por un alimentador hidráulico, el cual consiste en un depósito de almacenamiento de agua y una bomba para suministrar dicho elemento por medio de una tubería hasta la parte superior del modelo físico y hacer la descarga en el tanque de

inundamiento, la capacidad máxima del alimentador hidráulico fue un factor importante ya que esta alcanzó el máximo de los caudales que se había proyectado evaluar, teniendo que haberse utilizado otro alimentador hidráulico de mayor capacidad si se tuviera el caso de que el caudal a evaluar hubiera sido mayor al proyectado.

Posteriormente a realizar el boceto del modelo físico se planteó algunos cambios en el diseño en cuanto a la forma geométrica que estaría dado por acrílico y además por tubos rectangulares metálicos adoptando la forma de escalones, esto se realizó para tener una mejor resistencia para las cargas que se presentarían durante la operación del modelo físico ya que en el boceto el acrílico estaría unido por pegamento siendo altamente riesgoso a que durante el funcionamiento del modelo estos se despegaran, en estos cambios también se agregó el uso de pernos para asegurar las paredes laterales del canal en los escalones metálicos y dar estabilidad a las mismas, de esta manera se obtuvo el diseño final del modelo físico en la cual no se tuvieron en cuenta otras cosas como el montaje de las paredes de acrílico entre otras, que se tuvieron que resolver durante la etapa de construcción del modelo físico. Ver **Anexo N° 44**.

3.1.3. Análisis Hidráulico, Construcción y Ensayos del Modelo Físico a Escala de la Caída Escalonada

3.1.3.1 Análisis Hidráulico

3.1.3.1.1 Análisis Hidráulico con Fórmulas.

Se realizó el análisis hidráulico usando fórmulas matemáticas en la cual se evaluó a varios porcentajes del caudal de diseño Q_d como son 15%, 30%, 50%, 75%, 90%, 100% y para evaluar el comportamiento del flujo en caso de eventos extraordinarios se analizó al 120%, 140%, 150%, esto también se realizó con el propósito de observar el cambio de régimen de flujo escalonado Saltante, Transitorio o Rasante, ya que estos depende directamente del caudal circulante, con el análisis hidráulico con fórmulas realizado variando los caudales en un rango desde 15% al 150% con respecto al caudal de diseño Q_d , el flujo se mantiene en el régimen de flujo Saltante NAP de Tipo 1 denominado también Flujo Saltante con Resalto completamente desarrollado, en el cual el flujo realiza un salto de escalón en escalón y en la huella del escalón se forma un resalto hidráulico el cual siempre se desarrolla por completo dentro del mismo escalón, la permanencia

del flujo saltante en todos los caudales evaluados se debe a la pendiente baja del escalón (menor a 22°). Ver **Figura N° 58**.

Se realizó la verificación del diseño hidráulico de la caída escalonada La Cascada con el caudal de diseño Qd representado por el 100% (70 m³/seg), en el cual se obtuvo un diseño muy similar en cuanto a las dimensiones de los obstáculos y umbrales en los escalones, además de un diseño similar en cuanto a la configuración geométrica de las alturas de los escalones pudiendo haberse diseñado con otros criterios para un mejor funcionamiento de la estructura hidráulica, en la verificación por sumergencia si cumple con alturas menores como el del diseño real de La Cascada, también hay una diferencia en el borde libre de la pared del canal del diseño real siendo esta menor en 3 cm de la estructura real. Ver **Anexo N° 35**.

3.1.3.1.2 Análisis hidráulico con Hec Ras.

Se realizó el análisis en el software Hec – Ras por ser un software conocido, versátil y práctico en el diseño de estructuras hidráulicas, para el análisis se utilizó los mismos porcentajes de caudal que en el análisis con fórmulas, en la cual del software se extrajeron resultados solamente de tirante normal y parámetros del resalto hidráulico generado en los escalones ya que al finalizar el proceso de análisis y al obtener resultados se determinó que dicho software no modela el salto del flujo en caída libre que realiza el flujo en régimen de Flujo Saltante NAP, que se representa por una corriente de agua o flujo que salta de un escalón a otro en caudales menores, por lo que se debió utilizar un software más avanzado diferente a HEC-RAS capaz de simular el flujo saltante.

3.1.3.2 Construcción del Modelo Físico

Durante la construcción del modelo físico se tuvo algunas dificultades para el montaje de las paredes, ya que por las dimensiones estas eran inestables, para la cual se optó por agregar más tornillos para fijar en los laterales del canal y dar estabilidad a las paredes, aun así las paredes seguían presentando inestabilidad, por lo que se añadió arcos de acrílico en forma de abrazadera para confinar las paredes, estos arcos colocados espaciados a lo largo de todo el canal obteniendo una estabilidad apropiada para la utilización del modelo físico.

También se presentó algunas dificultades para la obtención de los conectores de la tubería de suministro de agua del modelo físico con la tubería del alimentador hidráulico ya que en el mercado de la ciudad de Chiclayo no existía dichos conectores, obteniéndose a manera de pedido especial desde la ciudad de Lima, representando una demora en la etapa de realización de ensayos y de esta manera alargando los plazos dispuestos para esta investigación.

3.1.3.3 Ensayos del Modelo Físico a Escala

Se realizó los ensayos en el modelo físico con los caudales escalados para los porcentajes 15%, 30%, 50%, 75%, 90 %, 100 % y para evaluar el comportamiento del flujo en caso de eventos extraordinarios se analizó a 150%, 120%, 140%, 150% y en la cual se pudo observar que para todos los caudales evaluados se generó el flujo de régimen Saltante NAP, prosiguiéndose a tomar medida de los parámetros hidráulicos generados en los escalones, tomándose como muestra realizar las mediciones en 3 (Escalón N°4, N°6 y N°10) de los 12 escalones, se realizaron mediciones de tirante normal y_n , tirante de borde y_b , conjugados (y_1 y y_2), longitud de resalto hidráulico, longitud de impacto del chorro L_d y espesor del chorro y_i .

El régimen de Flujo Saltante se caracteriza por generar un chorro de agua en cada escalón el cual en los ensayos realizados de 15% al 50% no se generó dicho chorro, es probable que la escala utilizada para el modelo físico haya influido en la no generación del chorro de agua, que por el contrario en los ensayos del 75% al 150% si hubo presencia de este chorro de agua que caracteriza al régimen de flujo Saltante NAP.

Durante la etapa de ensayos en el modelo físico se obtuvo algunas dificultades ya que el alimentador hidráulico era prestado por la Universidad Señor de Sipan y el traslado juntamente con los permisos requeridos para la prestación del alimentador hidráulico generaba algunos retrasos para la realización de estos ensayos, por otra parte, las dimensiones del modelo físico requerían un espacio amplio en la cual se optó por alquilar un local donde se pueda realizar los ensayos.

En la ubicación de resultados de los ensayos del modelo físico en la **Figura N° 127**, para el caso de realizar una correlación con las ecuaciones que determinan los límites del flujo se tendría que trabajar en el modelo físico con caudales mucho mayores, teniendo que emplearse un

alimentador hidráulico de mayor capacidad para generar caudales mayores y obtener valores bajos de h/y_c .

3.1.4. Comparación de Resultados Obtenidos por medio de Fórmulas, Software y constatando en el Modelo Físico a Escala.

3.1.4.1 Comparación por Caudales

Se realizó la comparación de resultados para cada uno de los caudales evaluados.

Para un caudal del 15% con respecto al caudal de diseño se observa que los tirantes del conjugados del flujo para el modelo físico son mayores que del análisis con fórmulas, longitudes de resalto (L_r) elevado para el modelo físico, en Hec Ras no se observa resalto hidráulico, se presenta un tirante normal (y_n) muy similares para modelo físico y para Hec – Ras, tirantes de borde (y_b) distintos, para el caudal evaluado no hay presencia del chorro por lo que no se puede realizar una comparación de la longitud de impacto (L_d) y espesor del chorro de agua (y_i). El número de Froude (F_1) para modelo Físico es $F_1 < 1$, por lo contrario, para análisis con fórmulas $F_1 > 1$, esto debido al efecto de los umbrales del tanque amortiguador que producen la elevación de los tirantes del flujo en el cual el análisis con fórmulas no lo toma en cuenta. Ver **Figura N° 130**.

Para un caudal del 30% con respecto al caudal de diseño se observa que los tirantes conjugados del flujo para el modelo físico son mayores que del análisis con fórmulas, longitudes de resalto (L_r) elevado para el modelo físico, en Hec Ras no se observa resalto hidráulico, se presenta un tirante normal (y_n) muy similares para modelo físico y para Hec – Ras, tirantes de borde (y_b) distintos, para el caudal evaluado no hay presencia del chorro por lo que no se puede realizar una comparación de la longitud de impacto (L_d) y espesor del chorro de agua (y_i). El número de Froude (F_1) para modelo Físico es $F_1 < 1$, por lo contrario, para análisis con fórmulas $F_1 > 1$, esto debido al efecto de los umbrales del tanque amortiguador que producen la elevación de los tirantes del flujo en el cual es análisis con fórmulas no lo toma en cuenta. Ver **Figura N° 131**.

Para un caudal del 50% con respecto al caudal de diseño se observa que los tirantes conjugados del flujo para el modelo físico son mayores que del análisis con fórmulas, longitudes de resalto (L_r) elevado para el modelo físico, en Hec Ras no se observa resalto hidráulico, se presenta un tirante normal (y_n) muy similares para modelo físico y para Hec – Ras, tirantes de borde (y_b) distintos, para el caudal evaluado no hay presencia del chorro por lo que no se puede realizar una comparación de la longitud de impacto (L_d) y espesor del chorro de agua (y_i). El número de Froude (F_1) para modelo Físico es $F_1 < 1$, por lo contrario, para análisis con fórmulas $F_1 > 1$, esto debido al efecto de los umbrales del tanque amortiguador que producen la elevación de los tirantes del flujo en el cual es análisis con fórmulas no lo toma en cuenta. Ver **Figura N° 132**.

Para un caudal del 75% con respecto al caudal de diseño se observa que los tirantes conjugados del flujo para el modelo físico son mayores que del análisis con fórmulas, longitudes de resalto (L_r) elevado para el modelo físico, en Hec Ras se observa resalto hidráulico, se presenta un tirante normal (y_n) muy similares para modelo físico y para Hec – Ras, tirantes de borde (y_b) similares para modelo físico y Hec - Ras, para el caudal evaluado si hay presencia del chorro por lo que se observa una longitud de impacto (L_d) distintas, espesor del chorro de agua (y_i) similares para modelo físico y análisis con fórmulas. El número de Froude (F_1) para modelo Físico es $F_1 < 1$, por lo contrario, para análisis con fórmulas y Hec Ras $F_1 > 1$, esto debido al efecto de los umbrales del tanque amortiguador que producen la elevación de los tirantes del flujo en el cual el análisis con fórmulas no lo toma en cuenta. Hec – Ras presenta F_1 mucho mayor que el análisis con fórmulas debido a que el software lo toma como una rápida. Ver **Figura N° 133**.

Para un caudal del 90% con respecto al caudal de diseño se observa que los tirantes conjugados del flujo para el modelo físico son mayores que del análisis con fórmulas y Hec - Ras, longitud de resalto (L_r) elevado para el análisis con fórmulas, se presenta un tirante normal (y_n) muy similares para modelo físico y para Hec – Ras, tirantes de borde (y_b) similares para modelo físico y Hec - Ras, para el caudal evaluado en el modelo físico si hay presencia del chorro por lo que se observa una longitud de impacto (L_d) distintas, espesor del chorro de agua (y_i) similares para modelo físico y análisis con fórmulas. El número de Froude (F_1) para modelo

Físico es $F1 < 1$, por lo contrario, para análisis con fórmulas y Hec Ras $F1 > 1$, esto debido al efecto de los umbrales del tanque amortiguador que producen la elevación de los tirantes del flujo en el cual el análisis con fórmulas no lo toma en cuenta. Hec – Ras presenta $F1$ mucho mayor que el análisis con fórmulas debido a que el software lo toma como una rápida. Ver **Figura N° 134**.

Para un caudal del 100% con respecto al caudal de diseño se observa que los tirantes conjugados del flujo para el modelo físico son mayores que del análisis con fórmulas y Hec - Ras, longitud de resalto (L_r) similar para el análisis con fórmulas y modelo físico, se presenta un tirante normal (y_n) muy similares para modelo físico y para Hec – Ras, tirantes de borde (y_b) similares para modelo físico y Hec - Ras, para el caudal evaluado en el modelo físico si hay presencia del chorro por lo que se observa una longitud de impacto (L_d) distintas, espesor del chorro de agua (y_i) similares para modelo físico y análisis con fórmulas. El número de Froude ($F1$) para modelo Físico es $F1 < 1$, por lo contrario, para análisis con fórmulas y Hec Ras $F1 > 1$, esto debido al efecto de los umbrales del tanque amortiguador que producen la elevación de los tirantes del flujo en el cual el análisis con fórmulas no lo toma en cuenta. Hec – Ras presenta $F1$ mucho mayor que el análisis con fórmulas debido a que el software lo toma como una rápida. Ver **Figura N° 135**.

Para un caudal del 120% con respecto al caudal de diseño se observa que los tirantes conjugados del flujo para el modelo físico son mayores que del análisis con fórmulas y Hec - Ras, longitud de resalto (L_r) similar para el análisis con fórmulas y modelo físico, se presenta un tirante normal (y_n) muy similares para modelo físico y para Hec – Ras, tirantes de borde (y_b) similares para modelo físico y Hec - Ras, para el caudal evaluado en el modelo físico si hay presencia del chorro por lo que se observa una longitud de impacto (L_d) distintas, espesor del chorro de agua (y_i) similares para modelo físico y análisis con fórmulas. El número de Froude ($F1$) para modelo Físico es $F1 < 1$, por lo contrario, para análisis con fórmulas y Hec Ras $F1 > 1$, esto debido al efecto de los umbrales del tanque amortiguador que producen la elevación de los tirantes del flujo en el cual el análisis con fórmulas no lo toma en cuenta. Hec – Ras presenta $F1$ mayor que el análisis con fórmulas debido a que el software lo toma como una rápida. Ver **Figura N° 136**.

Para un caudal del 140% con respecto al caudal de diseño se observa que los tirantes conjugados del flujo para el modelo físico son mayores que del análisis con fórmulas y Hec - Ras, longitud de resalto (L_r) similar para el análisis con fórmulas y modelo físico, se presenta un tirante normal (y_n) muy similares para modelo físico y para Hec - Ras, tirantes de borde (y_b) similares para modelo físico y Hec - Ras, para el caudal evaluado en el modelo físico si hay presencia del chorro por lo que se observa una longitud de impacto (L_d) distintas, espesor del chorro de agua (y_i) similares para modelo físico y análisis con fórmulas. El número de Froude (F_1) para modelo Físico es $F_1 < 1$, por lo contrario, para análisis con fórmulas y Hec Ras $F_1 > 1$, esto debido al efecto de los umbrales del tanque amortiguador que producen la elevación de los tirantes del flujo en el cual el análisis con fórmulas no lo toma en cuenta. Hec - Ras presenta F_1 mayor que el análisis con fórmulas debido a que el software lo toma como una rápida. Ver **Figura N° 137**.

Para un caudal del 150% con respecto al caudal de diseño se observa que los tirantes conjugados del flujo para el modelo físico son mayores que del análisis con fórmulas y Hec - Ras, longitud de resalto (L_r) similar para el análisis con fórmulas y modelo físico, se presenta un tirante normal (y_n) similares para los 3 elementos de comparación, tirantes de borde (y_b) similares para modelo físico y Hec - Ras, para el caudal evaluado en el modelo físico si hay presencia del chorro por lo que se observa una longitud de impacto (L_d) distintas, espesor del chorro de agua (y_i) similares para modelo físico y análisis con fórmulas. El número de Froude (F_1) para modelo Físico es $F_1 > 1$ para los 3 elementos de comparación, en el análisis con modelo físico es el primer ensayo en la cual $F_1 > 1$ debido al aumento del caudal y la pérdida del efecto de los umbrales, Hec - Ras presenta F_1 mayor que el análisis con fórmulas debido a que el software lo toma como una rápida. Ver **Figura N° 138**.

3.1.4.2 Comparación por Tendencias de los Resultados de los Parámetros Hidráulicos

Discusión del Tirante Conjugado Menor y_1

En la única tendencia que se observa en las gráficas de los resultados comparativos para y_1 se observa que, el análisis con Fórmulas presenta valores bajos con respecto al análisis con Modelo Físico, esto debido a que la grada en Modelo Físico contiene umbrales y obstáculos el cual hacen que el escalón se inunde y por efecto haciendo que el perfil del flujo se eleve, no obstante, el análisis con Fórmulas no toma en cuenta los efectos anteriormente descritos. De la misma manera Hec – Ras presenta valores bajos, pero muy similares a análisis con Fórmulas debido a que Hec – Ras para este caso trabaja como una rápida y no genera el chorro del escalón, además de que este último no genera resalto hidráulico para el rango de caudales de 15% - 50% debido a los efectos de los umbrales sumado al bajo caudal de operación. Tomando en cuenta estas evidencias se puede comparar con la investigación de Cuzque H. (2019) en la obtención de resultados variables para los tirantes conjugados entre modelo experimental y análisis con software.

Discusión del Tirante Conjugado Mayor y_2

En la única tendencia que se observa en las gráficas de los resultados comparativos para y_2 se observa que, el análisis con Fórmulas presenta valores bajos con respecto al análisis con Modelo Físico, con una variación que se va reduciendo a medida que aumenta el caudal, esto debido a que la grada en el Modelo Físico contiene umbrales y obstáculos que generan efectos secundarios en el flujo que anteriormente se describieron para y_1 , la variación de valores de y_2 se reduce debido a que se aumenta el caudal y los umbrales con los obstáculos mantienen la misma altura.

Por otra parte, Hec – Ras muestra valores bajos, pero similares al análisis con Fórmulas debido a que Hec – Ras trabaja como una rápida y no genera el chorro del escalón, así pues, éste último no genera resalto hidráulico para el rango de caudales de 15% - 50%, asimismo Hec – Ras no muestra un valor definido en el caudal de 150% debido a una limitación del software. Dentro de este marco se puede vincular con la investigación de Ortega N. (2013) en la obtención de resultados distintos para los tirantes conjugados entre modelo experimental y cálculo matemático.

Discusión del Longitud de Resalto Hidráulico L_r

En la primera tendencia que se muestra en los resultados comparativos para L_r se observa que, el análisis con Fórmulas arroja valores bajos con respecto a Modelo Físico, debido a que el obstáculo del escalón en el Modelo Físico genera un efecto de elevación en el perfil del flujo, de esta manera aumentando el valor de L_r ya generada antes por el chorro del escalón.

En la segunda tendencia análisis con Fórmulas muestra valores altos respecto al Modelo Físico, debido a que el Modelo Físico cuenta con obstáculos y umbrales que producen una reducción de la longitud L_r , así mismo en la segunda tendencia Hec ras presenta valores altos debido a la limitación del software para el análisis del flujo en caída libre por lo que el flujo trabaja como una rápida, produciendo grandes valores de L_r . De las evidencias anteriores se puede comparar con la investigación de Abarca H. (2013) en la obtención de resultados que varían para la longitud de resalto hidráulico entre modelo experimental y cálculo matemático.

Discusión del Tirante Normal y_n

En las dos tendencias que se muestran en los resultados comparativos para y_n se observa que, el análisis con Fórmulas muestra valores bajos con respecto al Modelo Físico y Hec – Ras debido a que el análisis con Fórmulas no toma en cuenta el efecto de inundamiento de los umbrales del escalón, por otro lado, el modelo Físico y Hec – Ras muestran valores aproximados debido a la probabilidad de algún efecto de escala del Modelo Físico.

Discusión del Tirante de Borde y_b

En la única tendencia que se observa en los resultados comparativos para y_b se observa que, el análisis con Fórmulas muestra valores bajos con respecto al análisis con Modelo Físico y Hec – Ras, debido al efecto de los umbrales que el análisis con Fórmulas no toma en cuenta, asimismo el Modelo Físico y Hec – Ras muestran valores aproximados con alguna pequeña variación debido a algún efecto de escala del Modelo Físico.

Discusión del Espesor del Chorro y_i

En la tendencia que se observa en los resultados comparativos de y_i se muestra que, solamente el análisis con Fórmulas presenta algún valor definido, debido a que el Modelo Físico por efecto

de escala no proyecta el chorro del escalón, de la misma manera para Hec – Ras, pero debido las limitaciones que tiene el software, En la segunda tendencia se observan valores similares para el análisis con Fórmulas y Modelo Físico, sin presencia de valores de Hec – Ras debido a las limitaciones del mismo. En la tercera tendencia mantiene las mismas características que la segunda tendencia.

Discusión de la Longitud de Impacto del Chorro L_d

En la primera tendencia que se muestra en los gráficos comparativos para L_d se observa que, solamente el análisis con Fórmulas presenta valores definidos, esto debido a que el Modelo Físico por efectos de escala no genera el chorro del flujo, Hec – Ras también no genera el chorro, pero debido a las limitaciones del software para el análisis de este tipo de flujos. En la segunda tendencia se observa que el Modelo Físico presenta valores bajos con respecto al análisis con Fórmulas debido a efectos de escala del Modelo Físico sumado al efecto de inundamiento de los umbrales que produce una reducción de la longitud L_d , para esta última tendencia Hec – Ras no presenta valores debido a las limitaciones del software. Por lo expuesto anteriormente se puede comparar con la investigación de Abarca H. (2013) en la obtención de resultados que varían para la longitud de impacto del chorro entre modelo experimental y cálculo matemático.

Discusión del Número de Froude en la Sección 1 F_1

En la primera tendencia que se muestra en los gráficos de los resultados comparativos para F_1 se observa que, el análisis con Fórmulas presenta valores altos con respecto al análisis con

modelo físico, debido a que el análisis con Fórmulas no toma en cuenta el efecto de inundamiento producido por los umbrales y obstáculos que impiden la formación normal del resalto hidráulico, por otra parte, Hec - Ras no tiene valores definidos para F_1 debido al bajo caudal que opera en esta tendencia.

En la segunda tendencia de la misma manera que en la primera el análisis con Fórmulas presenta valores altos con respecto al Modelo Físico, pero con valores altos de resultados de Hec – Ras debido a que Hec – Ras trabaja como una rápida produciendo F_1 con valores altos.

Generalizando ambas tendencias para F_1 , con respecto al Modelo Físico en todos los ensayos para los caudales evaluados desarrolla valores $F_1 < 1$ excepto para un caudal del 150% da un valor $F_1 > 1$ obteniéndose un régimen supercrítico solo para el 150% del caudal, de esta manera se comprueba el efecto del umbral y el los obstáculos que impiden el desarrollo normal del resalto hidráulico dentro del escalón, ya que para caudales menores se mantiene el régimen subcrítico favoreciendo al cuidado de la estructura hidráulica. Por los conceptos expuestos anteriormente se puede tener en cuenta los resultados obtenidos por Guarníz M. (2014) en su investigación comparativa de Hec – Ras con otros softwares determinando limitaciones de Hec – Ras para análisis de canales con pendientes mayores a 1 -10.

3.3. Aporte Práctico

Establecer un proceso de evaluación del diseño hidráulico para La Cascada la cual consiste en seguir las sugerencias antes citadas en esta investigación con la modelación de una estructura hidráulica empleando un modelo físico a escala, con fórmulas matemáticas desarrolladas por otros investigadores y utilizando software Hec Ras, de esta manera así tener una comparación de estas.

Para la evaluación del diseño hidráulico se ha sometido a La Cascada a trabajar con caudales inferiores y superiores al de su diseño, los cuales en porcentaje con respecto al caudal de diseño son 15%, 30%, 50%, 75%, 90%, 100%, 120%, 140% y 150%.

Se evaluó caudales mayores al del diseño para observar el comportamiento de la estructura en caso de máximas avenidas o eventos extraordinarios, y para evaluar la posibilidad de un cambio de régimen en el tipo de Flujo Saltante, Rasante o Transitorio.

3.3.1 Ampliación del análisis con fórmulas para caudales mayores.

Con los análisis realizados para los porcentajes anteriormente indicados se determinó que no existe cambio de régimen para el flujo escalonado manteniéndose en Flujo Saltante NAP, por lo que se realizó una ampliación de los análisis a través de Análisis con Fórmulas a los porcentajes 217%, 250%, 300%, 400%, 500%, 540%, 600%, 700%, 800%, 890%, 900%, 1600%, 2000% y 2500%, lográndose determinar que hasta el 217 % se tiene un régimen de Flujo Saltante de Tipo 1 o NAP1, de 250% hasta 500% se presenta un régimen de Flujo Saltante de Tipo 2 o NAP2, de 540% hasta 890% se presenta un régimen de Flujo Transitorio o TRA, de 900% a 1600% se desarrolla un régimen de Flujo Rasante de Tipo 1 o SK1 y de 2000% hasta 2500% se presenta un régimen de Flujo Rasante de Tipo 2 o SK2. Los resultados se pueden observar en la **Tabla 86, Figura N°139 y Figura N°140.**

Tabla 86. Tabla de Ampliación de Resultados de Análisis con Fórmulas.

ANÁLISIS DEL FLUJO
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO

COMPORTAMIENTO DEL FLUJO AMPLIANDO EL ANÁLISIS CON FÓRMULAS

CAUDAL DE DISEÑO Qd = 70 m3/seg

COMPORTAMIENTO DEL FLUJO				
AMPLIACIÓN DE ANÁLISIS CON FÓRMULAS				
CAUDAL EVALUADO	CAUDAL EVALUADO	TIPO DE FLUJO		
		ANÁLISIS CON FÓRMULAS	ANÁLISIS MODELO FÍSICO	ANÁLISIS SOFTWARE HEC-RAS
Qe %	Qe m3/seg			
15	10.5	NAP1	NAP1	NAP1
30	21.0	NAP1	NAP1	NAP1
50	35.0	NAP1	NAP1	NAP1
75	52.5	NAP1	NAP1	NAP1
90	63.0	NAP1	NAP1	NAP1
100	70.0	NAP1	NAP1	NAP1
120	84.0	NAP1	NAP1	NAP1
140	98.0	NAP1	NAP1	NAP1
150	105.0	NAP1	NAP1	NAP1
217	151.9	NAP1	----	----
250	175.0	NAP2	----	----
300	210.0	NAP2	----	----
400	280.0	NAP2	----	----
500	350.0	NAP2	----	----
540	378.0	TRA	----	----
600	420.0	TRA	----	----
700	490.0	TRA	----	----
800	560.0	TRA	----	----
890	623.0	TRA	----	----
900	630.0	SK2	----	----
1600	1120.0	SK2	----	----
2000	1400.0	SK1	----	----
2500	1750.0	SK1	----	----

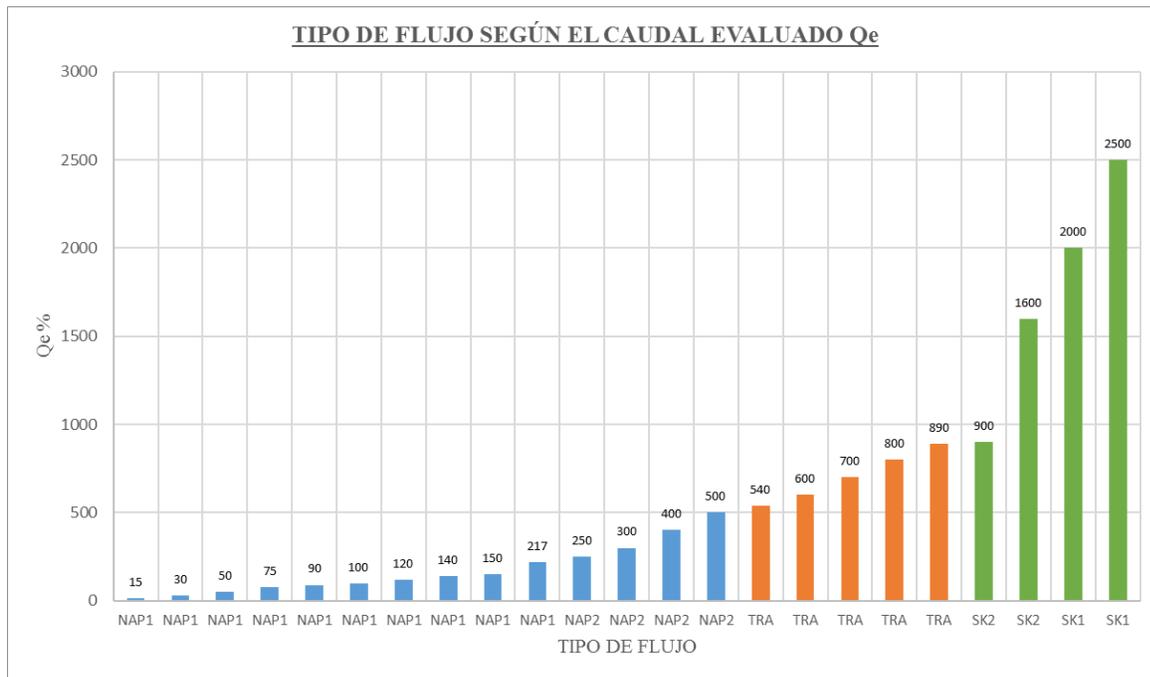


Figura N° 139. Gráfica de Resultados de Ampliación de Análisis con fórmulas en %.

El flujo se mantiene en condiciones de Flujo Saltante NAP hasta el Caudal Evaluado $Q_e=500\%$, el flujo Transitorio TRA se desarrolla entre los caudales 540% y 890% y el Flujo Rasante SK se desarrolla a partir del caudal 900% .

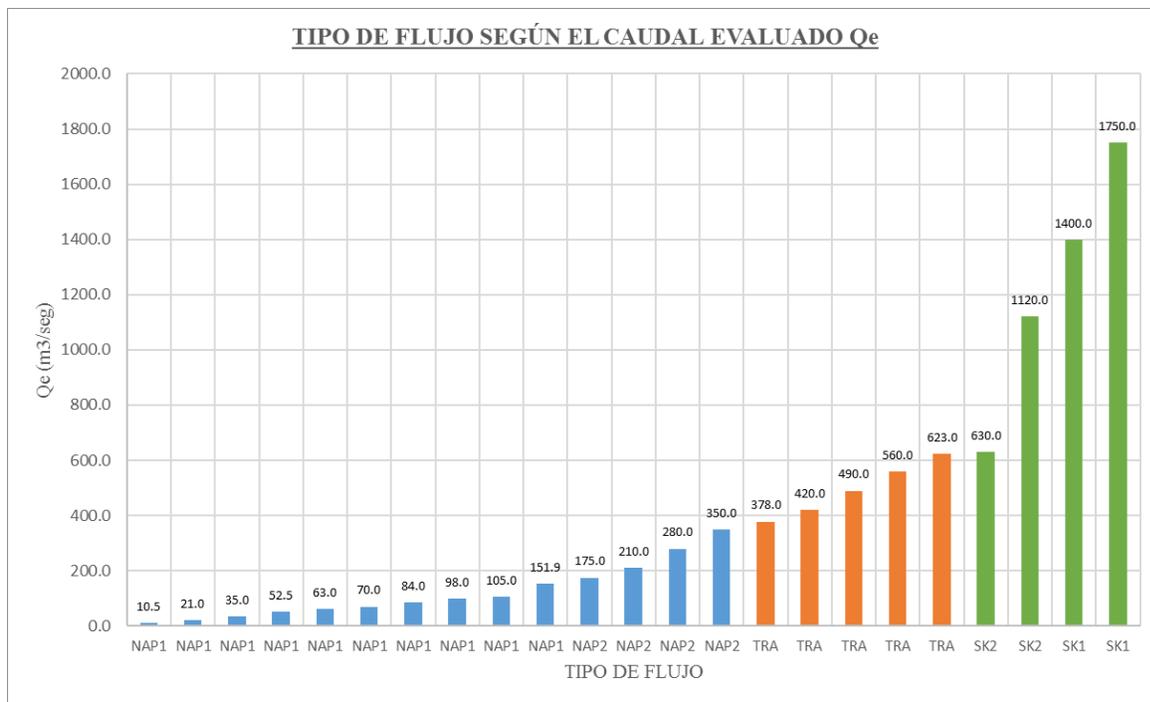


Figura N° 140. Gráfica de Resultados de Ampliación de Análisis con fórmulas en m³/seg.

El flujo se mantiene en condiciones de Flujo Saltante NAP hasta el Caudal Evaluado $Q_e=105$ m³/seg, el flujo Transitorio TRA se desarrolla entre los caudales 378.0 y 623.0 m³/seg y el Flujo Rasante SK se desarrolla a partir del caudal 630 m³/seg.

3.3.1.1 Análisis con Fórmulas al 217% (151.9 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Tabla 87. Análisis con Fórmulas al 217% (151.9 m3/seg).

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO
CAUDAL AL 217 %

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)				
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
DATOS				
1	Caudal de diseño	Qd	m3/seg	70.00
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	217
3	Caudal a evaluar	Qe	m3/seg	151.90
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m3/seg	75.95
5	Altura de escalón	h	m	4.65
6	Longitud de escalón	l	m	19.30
7	Ancho de escalón	W	m	7.95
8	Longitud de la caída	L	m	225.95
9	Pendiente aguas arriba de la caída.	S		0.001
10	Ancho de Escalón	W	m	7.95
11	Factor de rugosidad de Maning.	n		0.014
12	Altura total de la caída	z	m	45.20
13	Gravedad	g	m/seg ²	9.81
14	Número de escalones	N°e		12
CÁLCULOS				
15	Pendiente del escalón	Θ	°	14
16	Tirante Crítico.	y_c	m	2.10
17	Relación h/l	h/l		0.24
18	Relación yc/h	yc/h		2.21
19	Verificación de Flujo Rasante (Sánchez)	$yc/h < 0.983 - 0.171 \cdot h/l$		Cumple
20	Verificación de Flujo Rasante (Ohtsu y Yasuda)	$yc/h < 0.862 \cdot (h/l)^{-0.165}$		Cumple
21	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 2002)	$yc/h < 1.2 - 0.325 \cdot \text{tg}\Theta$		Cumple
22	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 1994)	$yc/h > 1.057 - 0.465 \cdot h/l$		Cumple
23	Tipo de flujo Saltante		NAP 01	NAPPE 01
24	Tirante Conjugado Menor	y_1	m	0.91
25	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V_1	m/seg	10.46
26	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F_1	Supercrítico	3.50
27	Tirante Conjugado Mayor	y_2	m	4.06
28	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V_2	m/seg	2.35
29	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F_2	Subcrítico	0.37
30	Tirante Normal	y_n	m	2.97
31	Longitud de Resalto	L_r	m	8.74
32	Distancia de Impacto del Chorro	L_d	m	10.52
33	Profundidad del Flujo Aguas Arriba del Chorro de Agua	dp	m	2.75
34	Ángulo de Inclinación del Chorro de Agua	β	°	53
35	Espesor del Chorro de Agua	y_i	m	0.98

ESQUEMA GENERAL DEL DISEÑO DE UN ESCALÓN

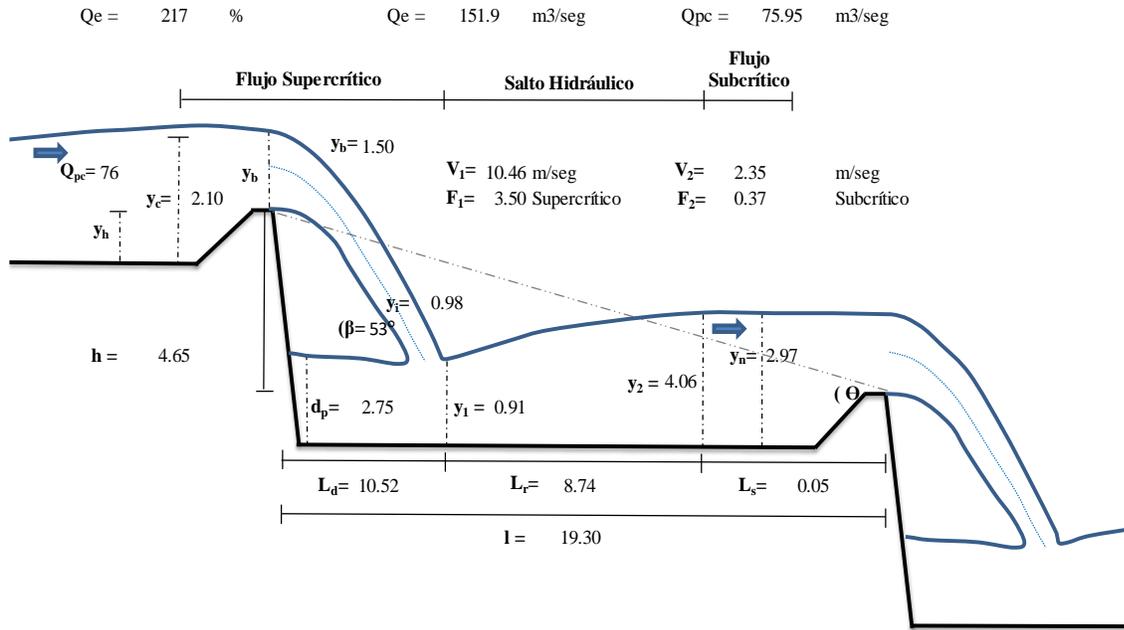


Figura N° 141. Esquema General de un Escalón con Caudal al 217% (151.9 m³/seg) del Caudal de Diseño.

Para detalles de los cálculos ver **Anexo N° 21**.

3.3.1.2 Análisis con Fórmulas al 250% (175 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Tabla 88. Análisis con Fórmulas al 250% (175 m3/seg).

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO
CAUDAL AL 250 %

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)				
Nº	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
DATOS				
1	Caudal de diseño	Qd	m3/seg	70.00
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	250
3	Caudal a evaluar	Qe	m3/seg	175.00
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m3/seg	87.50
5	Altura de escalón	h	m	4.65
6	Longitud de escalón	l	m	19.30
7	Ancho de escalón	W	m	7.95
8	Longitud de la caída	L	m	225.95
9	Pendiente aguas arriba de la caída.	S		0.001
10	Ancho de Escalón	W	m	7.95
11	Factor de rugosidad de Maning.	n		0.014
12	Altura total de la caída	z	m	45.20
13	Gravedad	g	m/seg ²	9.81
14	Número de escalones	Nºe		12
CÁLCULOS				
15	Pendiente del escalón	Θ	°	14
16	Tirante Crítico.	y_c	m	2.31
17	Relación h/l	h/l		0.24
18	Relación yc/h	yc/h		2.01
19	Verificación de Flujo Rasante (Sánchez)	$yc/h < 0.983 - 0.171 \cdot h/l$		Cumple
20	Verificación de Flujo Rasante (Ohtsu y Yasuda)	$yc/h < 0.862 \cdot (h/l)^{-0.165}$		Cumple
21	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 2002)	$yc/h < 1.2 - 0.325 \cdot \text{tg}\Theta$		Cumple
22	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 1994)	$yc/h > 1.057 - 0.465 \cdot h/l$		Cumple
23	Tipo de flujo Saltante		NAP 02	NAPPE 02
24	Tirante Conjugado Menor	y_1	m	1.03
25	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V_1	m/seg	10.69
26	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F_1	Supercrítico	3.36
27	Tirante Conjugado Mayor	y_2	m	1.05
28	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V_2	m/seg	2.51
29	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F_2	Subcrítico	0.38
30	Tirante Normal	y_n	m	3.29
31	Longitud de Resalto	L_r	m	9.47
32	Longitud Parcial de Resalto	L_r'	m	7.95
33	Distancia de Impacto del Chorro	L_d	m	11.35
34	Profundidad del Flujo Aguas Arriba del Chorro de Agua	dp	m	2.93
35	Ángulo de Inclinación del Chorro de Agua	β	°	52
36	Espesor del Chorro de Agua	y_i	m	1.13

ESQUEMA GENERAL DEL DISEÑO DE UN ESCALÓN

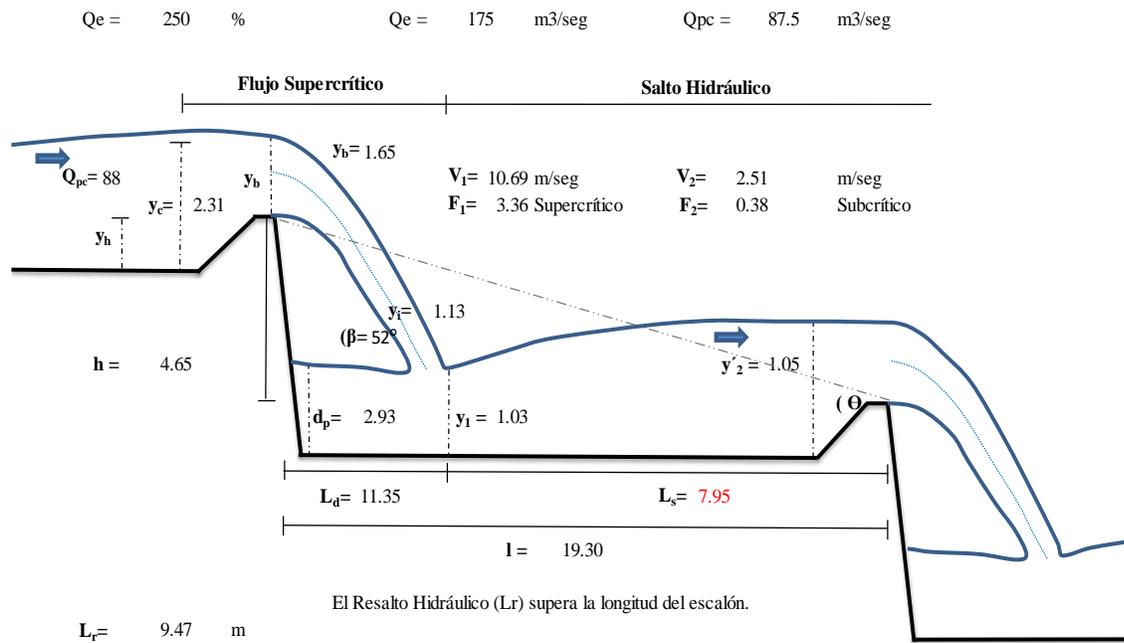


Figura N° 142. Esquema General de un Escalón con Caudal al 250% (175 m³/seg) del Caudal de Diseño.

Para detalles de los cálculos ver **Anexo N° 22**.

3.3.1.3 Análisis con Fórmulas al 300% (210 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Tabla 89. Análisis con Fórmulas al 300% (210 m3/seg).

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO
CAUDAL AL 300 %

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)				
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
DATOS				
1	Caudal de diseño	Qd	m3/seg	70.00
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	300
3	Caudal a evaluar	Qe	m3/seg	210.00
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m3/seg	105.00
5	Altura de escalón	h	m	4.65
6	Longitud de escalón	l	m	19.30
7	Ancho de escalón	W	m	7.95
8	Longitud de la caída	L	m	225.95
9	Pendiente aguas arriba de la caída.	S		0.001
10	Ancho de Escalón	W	m	7.95
11	Factor de rugosidad de Maning.	n		0.014
12	Altura total de la caída	z	m	45.20
13	Gravedad	g	m/seg ²	9.81
14	Número de escalones	N°e		12
CÁLCULOS				
15	Pendiente del escalón	Θ	°	14
16	Tirante Crítico.	y _c	m	2.61
17	Relación h/l	h/l		0.24
18	Relación yc/h	yc/h		1.78
19	Verificación de Flujo Rasante (Sánchez)	$yc/h < 0.983 - 0.171 \cdot h/l$		Cumple
20	Verificación de Flujo Rasante (Ohtsu y Yasuda)	$yc/h < 0.862 \cdot (h/l)^{-0.165}$		Cumple
21	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 2002)	$yc/h < 1.2 - 0.325 \cdot \text{tg} \Theta$		Cumple
22	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 1994)	$yc/h > 1.057 - 0.465 \cdot h/l$		Cumple
23	Tipo de flujo Saltante		NAP 02	NAPPE 02
24	Tirante Conjugado Menor	y ₁	m	1.20
25	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V ₁	m/seg	10.98
26	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F ₁	Supercrítico	3.20
27	Tirante Conjugado Mayor	y'₂	m	1.22
28	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V ₂	m/seg	2.73
29	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F ₂	Subcrítico	0.40
30	Tirante Normal	y _n	m	3.77
31	Longitud de Resalto	L _r	m	10.38
32	Longitud Parcial de Resalto	L' _r	m	6.77
33	Distancia de Impacto del Chorro	L _d	m	12.53
34	Profundidad del Flujo Aguas Arriba del Chorro de Agua	dp	m	3.18
35	Ángulo de Inclinación del Chorro de Agua	β	°	50
36	Espesor del Chorro de Agua	yi	m	1.36

ESQUEMA GENERAL DEL DISEÑO DE UN ESCALÓN

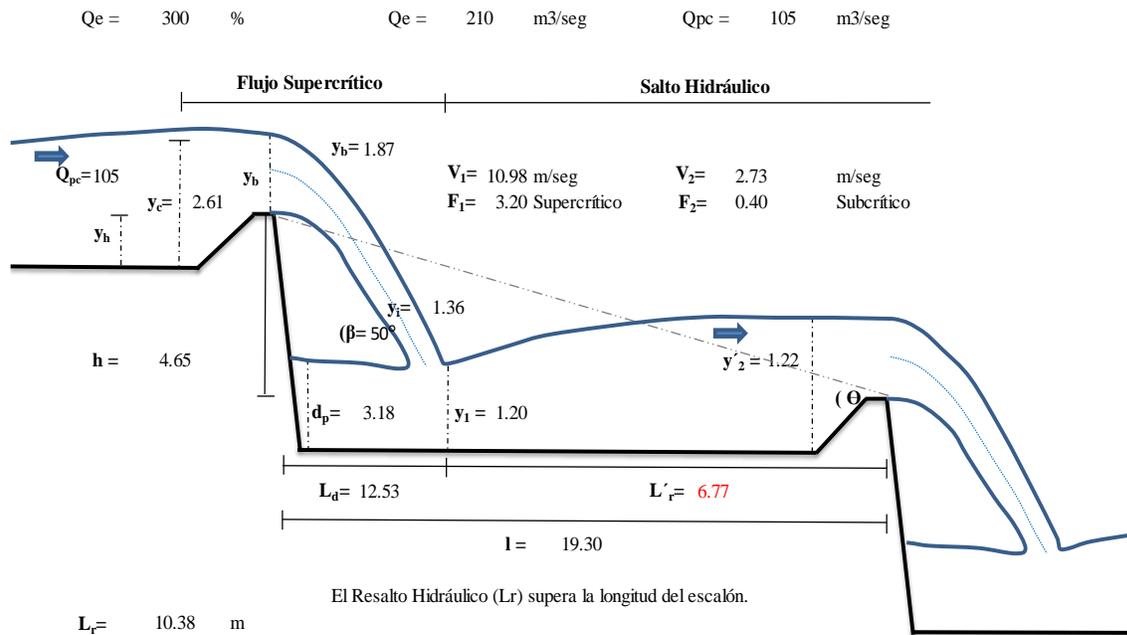


Figura N° 143. Esquema General de un Escalón con Caudal al 300% ($210 \text{ m}^3/\text{seg}$) del Caudal de Diseño.

Para detalles de los cálculos ver **Anexo N° 23**.

3.3.1.4 Análisis con Fórmulas al 400% (280 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Tabla 90. Análisis con Fórmulas al 400% (280 m3/seg).

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO
CAUDAL AL 400 %

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)				
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
DATOS				
1	Caudal de diseño	Qd	m3/seg	70.00
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	400
3	Caudal a evaluar	Qe	m3/seg	280.00
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m3/seg	140.00
5	Altura de escalón	h	m	4.65
6	Longitud de escalón	l	m	19.30
7	Ancho de escalón	W	m	7.95
8	Longitud de la caída	L	m	225.95
9	Pendiente aguas arriba de la caída.	S		0.001
10	Ancho de Escalón	W	m	7.95
11	Factor de rugosidad de Maning	n		0.014
12	Altura total de la caída	z	m	45.20
13	Gravedad	g	m/seg ²	9.81
14	Número de escalones	N°e		12
CÁLCULOS				
15	Pendiente del escalón	Θ	°	14
16	Tirante Crítico.	y_c	m	3.16
17	Relación h/l	h/l		0.24
18	Relación yc/h	yc/h		1.47
19	Verificación de Flujo Rasante (Sánchez)	$yc/h < 0.983 - 0.171 \cdot h/l$		Cumple
20	Verificación de Flujo Rasante (Ohtsu y Yasuda)	$yc/h < 0.862 \cdot (h/l)^{-0.165}$		Cumple
21	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 2002)	$yc/h < 1.2 - 0.325 \cdot \text{tg}\Theta$		Cumple
22	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 1994)	$yc/h > 1.057 - 0.465 \cdot h/l$		Cumple
23	Tipo de flujo Saltante		NAP 02	NAPPE 02
24	Tirante Conjugado Menor	y_1	m	1.54
25	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V_1	m/seg	11.47
26	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F_1	Supercrítico	2.95
27	Tirante Conjugado Mayor	y_2	m	1.55
28	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V_2	m/seg	3.12
29	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F_2	Subcrítico	0.42
30	Tirante Normal	y_n	m	4.68
31	Longitud de Resalto	Lr	m	11.54
32	Longitud Parcial de Resalto	L'r	m	4.67
33	Distancia de Impacto del Chorro	Ld	m	14.63
34	Profundidad del Flujo Aguas Arriba del Chorro de Agua	dp	m	3.60
35	Ángulo de Inclinación del Chorro de Agua	β	°	46
36	Espesor del Chorro de Agua	y_i	m	1.80

ESQUEMA GENERAL DEL DISEÑO DE UN ESCALÓN

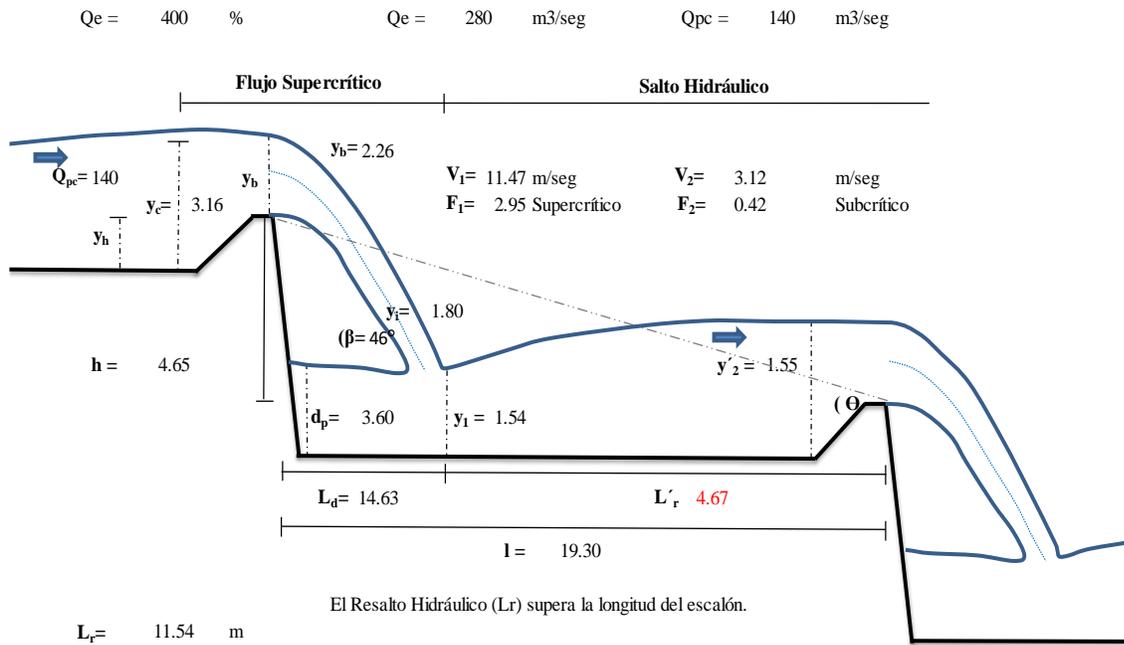


Figura N° 144. Esquema General de un Escalón con Caudal al 400% (280 m³/seg) del Caudal de Diseño.

Para detalles de los cálculos ver **Anexo N° 24**.

3.3.1.5 Análisis con Fórmulas al 500% (350 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Tabla 91. Análisis con Fórmulas al 500% (350 m3/seg).

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO
CAUDAL AL 500 %

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO SALTANTE (NAPPE)				
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
DATOS				
1	Caudal de diseño	Qd	m3/seg	70.00
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	500
3	Caudal a evaluar	Qe	m3/seg	350.00
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m3/seg	175.00
5	Altura de escalón	h	m	4.65
6	Longitud de escalón	l	m	19.30
7	Ancho de escalón	W	m	7.95
8	Longitud de la caída	L	m	225.95
9	Pendiente aguas arriba de la caída.	S		0.001
10	Ancho de Escalón	W	m	7.95
11	Factor de rugosidad de Maning.	n		0.014
12	Altura total de la caída	z	m	45.20
13	Gravedad	g	m/seg ²	9.81
14	Número de escalones	N°e		12
CÁLCULOS				
15	Pendiente del escalón	Θ	°	14
16	Tirante Crítico.	y_c	m	3.67
17	Relación h/l	h/l		0.24
18	Relación yc/h	yc/h		1.27
19	Verificación de Flujo Rasante (Sánchez)	$yc/h < 0.983 - 0.171 \cdot h/l$		Cumple
20	Verificación de Flujo Rasante (Ohtsu y Yasuda)	$yc/h < 0.862 \cdot (h/l)^{-0.165}$		No cumple
21	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 2002)	$yc/h < 1.2 - 0.325 \cdot \text{tg}\Theta$		Cumple
22	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 1994)	$yc/h > 1.057 - 0.465 \cdot h/l$		Cumple
23	Tipo de flujo Saltante		NAP 02	NAPPE 02
24	Tirante Conjugado Menor	y_1	m	1.86
25	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V_1	m/seg	11.86
26	Número de Froude en Tirante Conjugado Menor	F_1	Supercrítico	2.78
27	Tirante Conjugado Mayor	y_2	m	1.87
28	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V_2	m/seg	3.46
29	Número de Froude en Tirante Conjugado Mayor	F_2	Subcrítico	0.44
30	Tirante Normal	y_n	m	5.56
31	Longitud de Resalto	L_r	m	11.87
32	Longitud Parcial de Resalto	L_r'	m	2.80
33	Distancia de Impacto del Chorro	L_d	m	16.50
34	Profundidad del Flujo Aguas Arriba del Chorro de Agua	dp	m	3.98
35	Ángulo de Inclinación del Chorro de Agua	β	°	44
36	Espesor del Chorro de Agua	y_i	m	2.25

ESQUEMA GENERAL DEL DISEÑO DE UN ESCALÓN

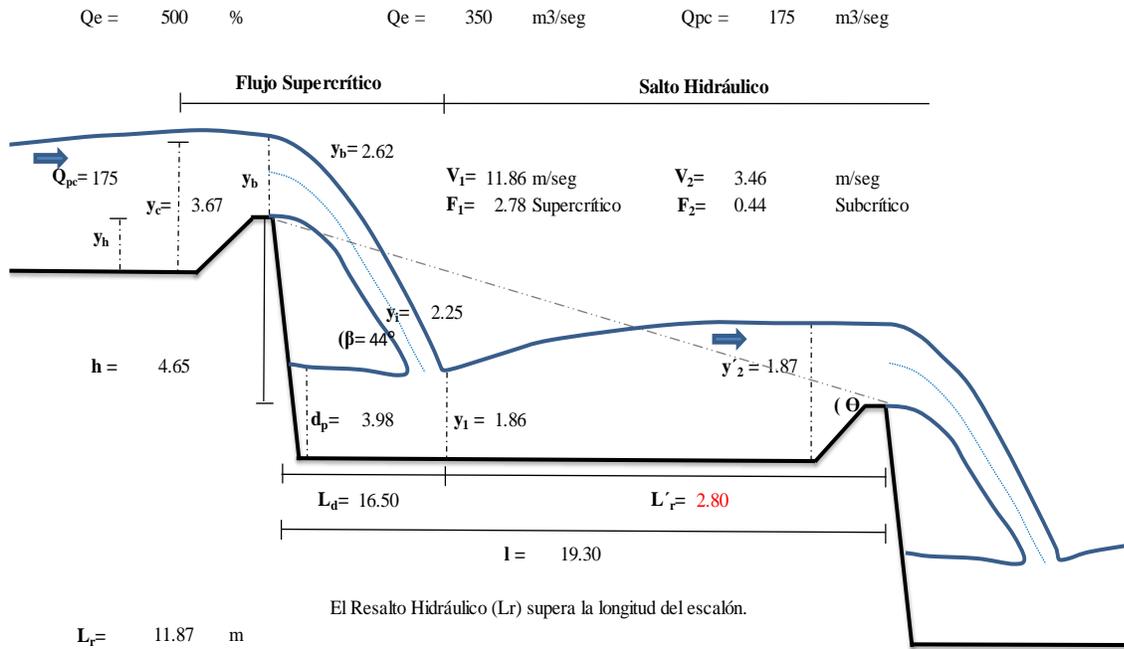


Figura N° 145. Esquema General de un Escalón con Caudal al 500% (350 m³/seg) del Caudal de Diseño.

Para detalles de los cálculos ver **Anexo N° 25**.

3.3.1.6 Análisis con Fórmulas al 540% (378 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Para este caudal evaluado se presenta el Flujo Transitorio para el cual no hay método de cálculo establecido para determinar los parámetros hidráulicos debido a la asimetría que presenta el perfil del flujo y solamente se realizó su predicción a través de la siguiente gráfica.

Relación: Eje X: $h/l \rightarrow h/l = 0.241$
Eje Y: $h/y_c \rightarrow h/y_c = 1.204$

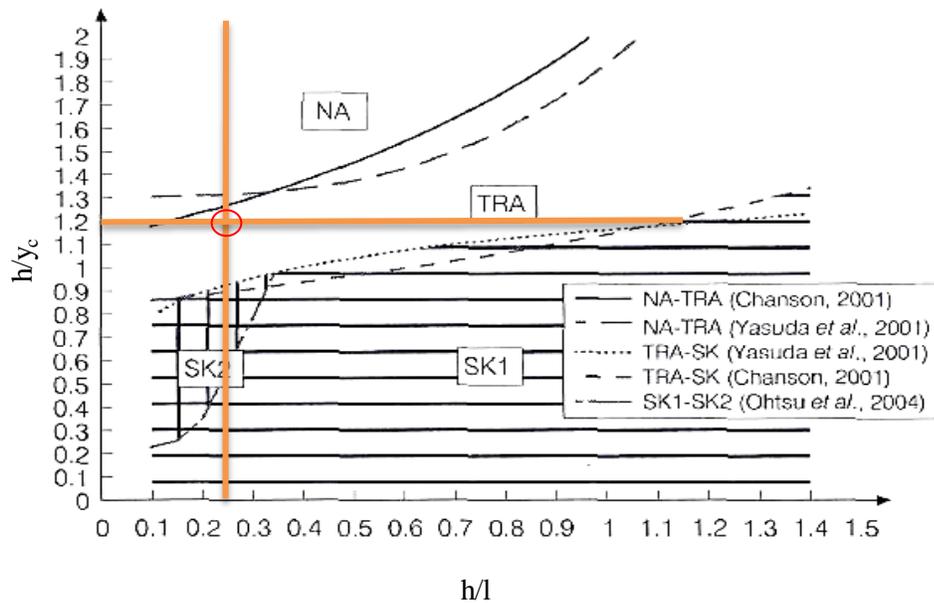


Figura N° 146. Gráfica de predicción de Flujo para un Caudal del 540% (378 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Ubicando el valor (h/l) para el eje X y el valor (h/y_c) para el eje Y en la gráfica, se indica que, para el caudal Q_e analizado el flujo se encuentra dentro del régimen de Flujo Transitorio.

Para más detalles ver **Anexo N° 26.**

3.3.1.7 Análisis con Fórmulas al 600% (420 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Para este caudal evaluado se presenta el Flujo Transitorio para el cual no hay método de cálculo establecido para determinar los parámetros hidráulicos debido a la asimetría que presenta el perfil del flujo y solamente se realizó su predicción a través de la siguiente gráfica.

Relación: Eje X: $h/l \rightarrow h/l = 0.241$
Eje Y: $h/y_c \rightarrow h/y_c = 1.122$

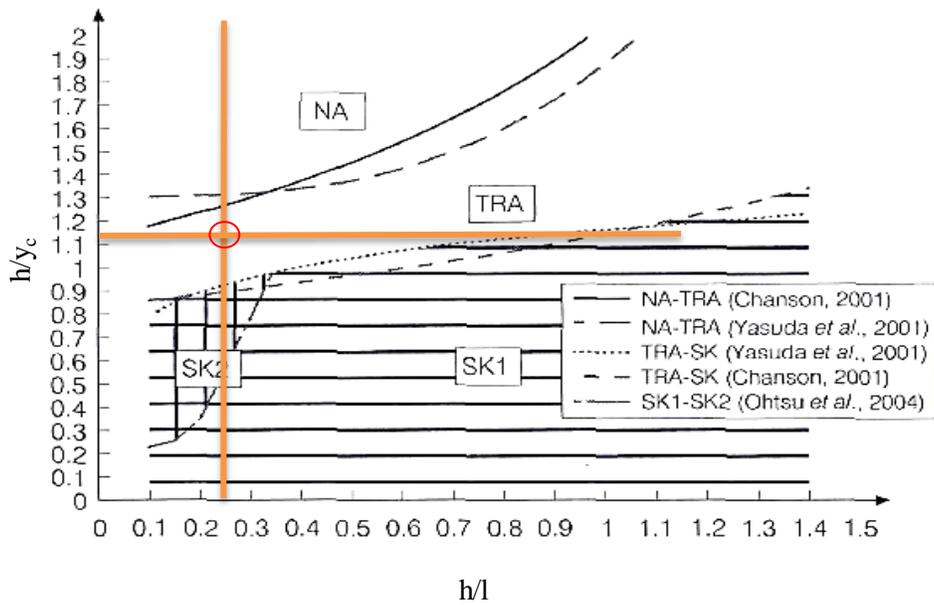


Figura N° 147. Gráfica de predicción de Flujo para un Caudal del 600% (420 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Ubicando el valor (h/l) para el eje X y el valor (h/y_c) para el eje Y en la gráfica, se indica que, para el caudal Q_e analizado el flujo se encuentra dentro del régimen de Flujo Transitorio.

Para más detalles ver **Anexo N° 27.**

3.3.1.8 Análisis con Fórmulas al 700% (490 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Para este caudal evaluado se presenta el Flujo Transitorio para el cual no hay método de cálculo establecido para determinar los parámetros hidráulicos debido a la asimetría que presenta el perfil del flujo y solamente se realizó su predicción a través de la siguiente gráfica.

Relación: Eje X: $h/l \rightarrow h/l = 0.241$
Eje Y: $h/y_c \rightarrow h/y_c = 1.013$

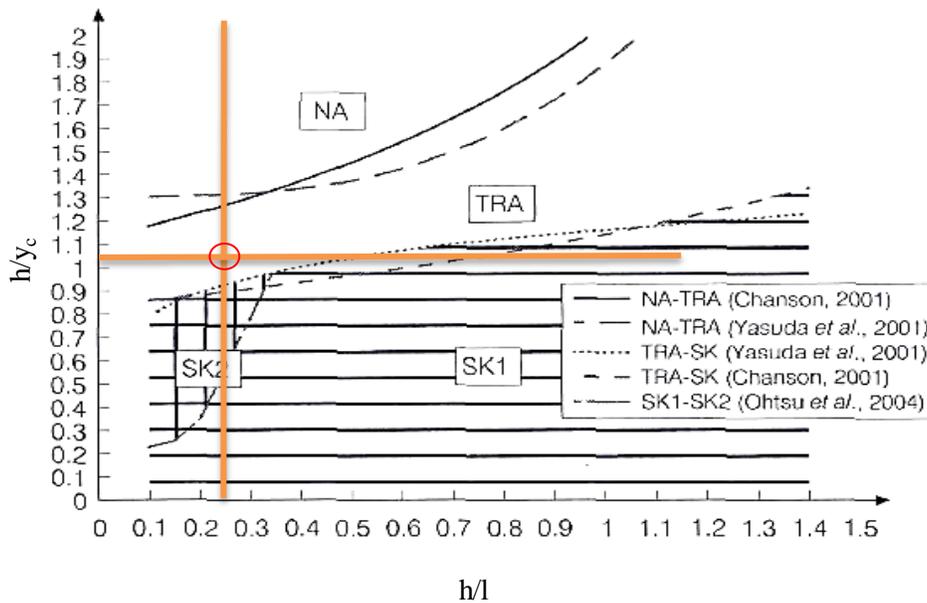


Figura N° 148. Gráfica de predicción de Flujo para un Caudal del 700% (490 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Ubicando el valor (h/l) para el eje X y el valor (h/y_c) para el eje Y en la gráfica, se indica que, para el caudal Q_e analizado el flujo se encuentra dentro del régimen de Flujo Transitorio.

Para más detalles ver **Anexo N° 28**.

3.3.1.9 Análisis con Fórmulas al 800% (560 m³/seg) del Caudal de Diseño.

Para este caudal evaluado se presenta el Flujo Transitorio para el cual no hay método de cálculo establecido para determinar los parámetros hidráulicos debido a la asimetría que presenta el perfil del flujo y solamente se realizó su predicción a través de la siguiente gráfica.

Relación: Eje X: $h/l \rightarrow h/l = 0.241$
Eje Y: $h/y_c \rightarrow h/y_c = 0.926$

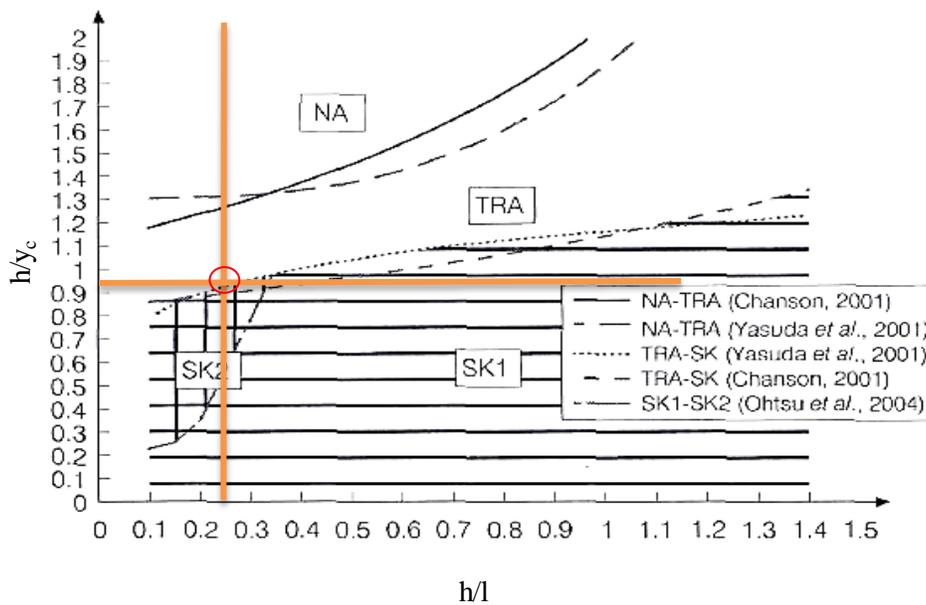


Figura N° 149. Gráfica de predicción de Flujo para un Caudal del 800% (560 m³/seg) del Caudal de Diseño.

Ubicando el valor (h/l) para el eje X y el valor (h/y_c) para el eje Y en la gráfica, se indica que, para el caudal Q_e analizado el flujo se encuentra dentro del régimen de Flujo Transitorio.

Para más detalles ver **Anexo N° 29**.

3.3.1.10 Análisis con Fórmulas al 890% (560 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Para este caudal evaluado se presenta el Flujo Transitorio para el cual no hay método de cálculo establecido para determinar los parámetros hidráulicos debido a la asimetría que presenta el perfil del flujo y solamente se realizó su predicción a través de la siguiente gráfica.

Relación: Eje X: $h/l \rightarrow h/l = 0.241$
Eje Y: $h/y_c \rightarrow h/y_c = 0.863$

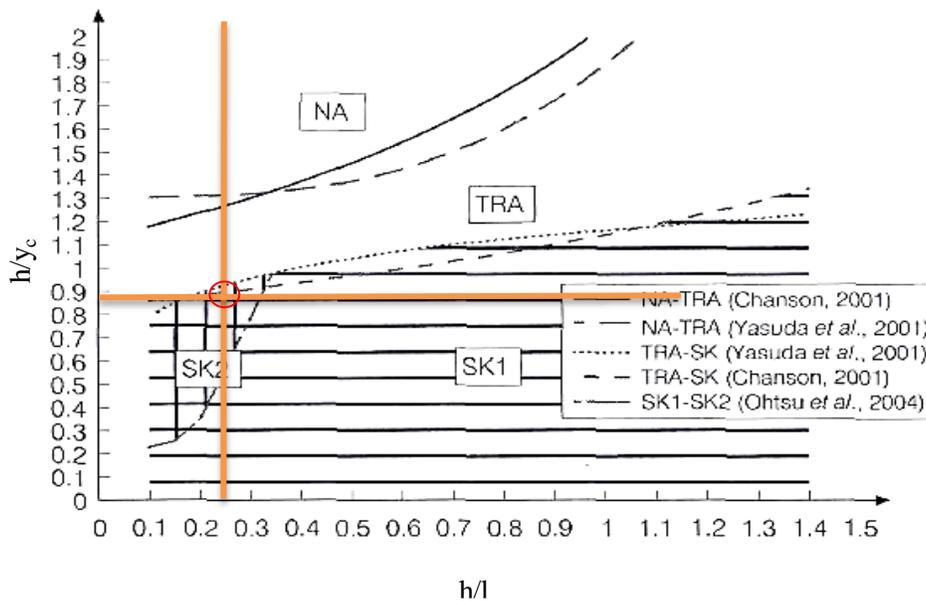


Figura N° 150. Gráfica de predicción de Flujo para un Caudal del 890% (560 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Ubicando el valor (h/l) para el eje X y el valor (h/y_c) para el eje Y en la gráfica, se indica que, para el caudal Q_e analizado el flujo se encuentra en los límites cercanos entre Flujo Transitorio y Flujo Rasante.

Para más detalles ver **Anexo N° 30**.

3.3.1.11 Análisis con Fórmulas al 900% (630 m³/seg) del Caudal de Diseño.

Por medio de fórmulas que se obtuvieron de algunos textos de diversos autores como resultado de sus investigaciones, se determinó que, el Flujo Rasante se produce a partir de caudales que superan el 900% con respecto al caudal de diseño Qd. Los resultados se pueden observar en las siguientes tablas y figuras, para más detalles ve anexos de cálculos para el caudal determinado.

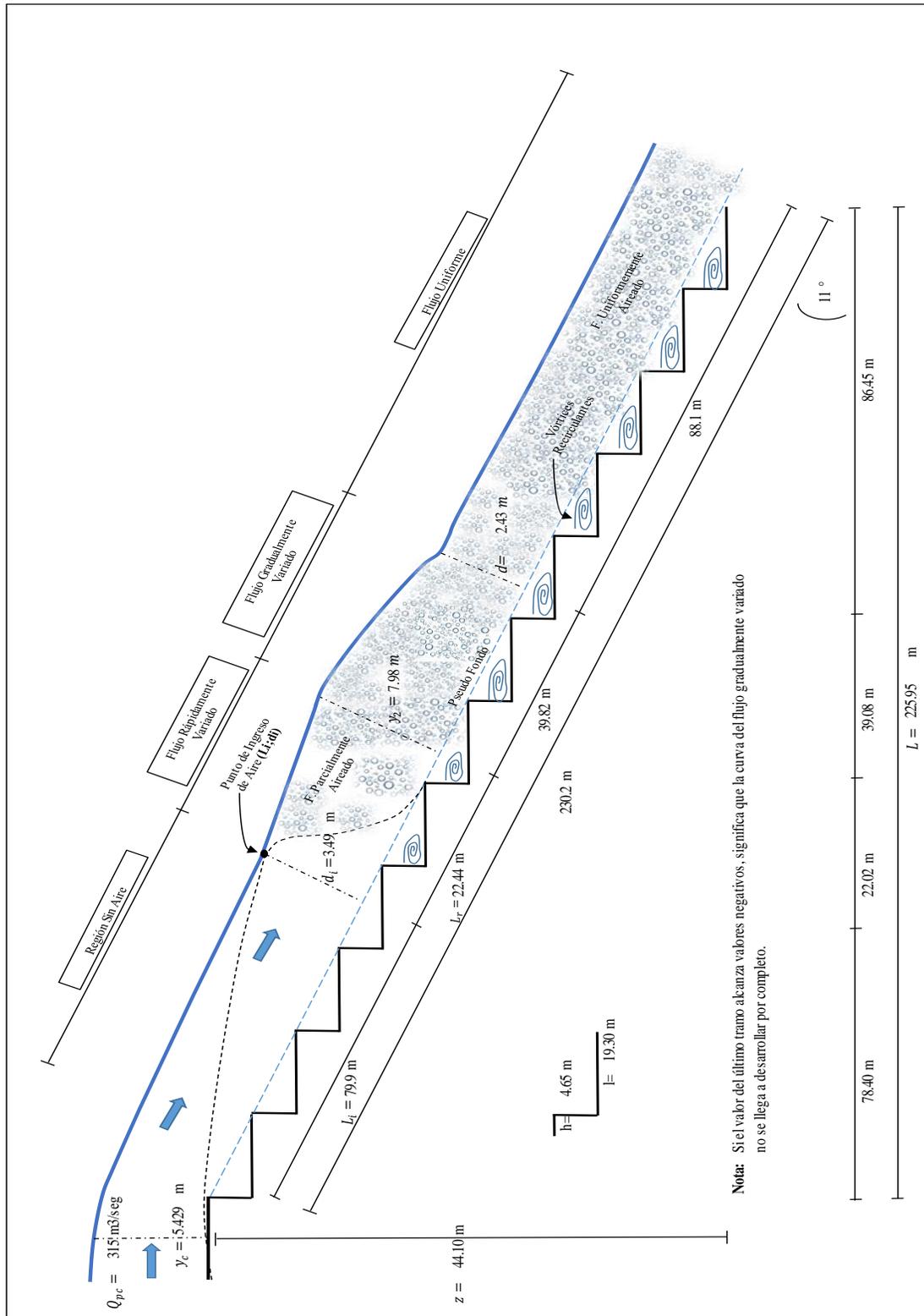
Tabla 92. Análisis con Fórmulas al 900% (630 m3/seg). Ver Anexo N° 31.

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO RASANTE
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO

CAUDAL 900 %

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO RASANTE				
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
DATOS				
1	Caudal de diseño	Qd	m3/seg	70
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	900
3	Caudal a evaluar	Qe	m3/seg	630
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m3/seg	315
5	Altura de escalón	h	m	4.65
6	Longitud de escalón	l	m	19.30
7	Ancho de escalón	W	m	7.95
8	Longitud de la caída	L	m	225.95
9	Pendiente aguas arriba de la caída.	S		0.001
10	Ancho del canal aguas arriba.	B	m	16.30
11	Factor de rugosidad de Manning.	n		0.014
12	Altura total de la caída	z	m	44.10
13	Gravedad	g	m/seg ²	9.81
14	Número de escalones	N°e		12
CÁLCULOS				
15	Pendiente del escalón	Θ	°	14
16	Tirante Crítico.	yc		5.43
17	Relación h/l	h/l		0.24
18	Relación yc/h	yc/h		0.86
19	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 2002)	$yc/h > 1.2 - 0.325 \cdot tg\Theta$		Cumple
20	Verificación de Flujo Rasante (Sánchez)	$yc/h > 0.983 - 0.171 \cdot h/l$		Cumple
21	Verificación de Flujo Rasante (Ohtsu y Yasuda)	$yc/h > 0.862 \cdot (h/l)^{-0.165}$		Cumple
22	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 1994)	$yc/h > 1.057 - 0.465 \cdot h/l$		Cumple
23	Tipo de flujo Rasante		SK 2	Skimming Tipo 2
24	Número de Froude Rugoso	F*		2.72
25	Coordenada Horizontal del Punto de Ingreso de Aire	Li		79.88
26	Coordenada Vertical del Punto de Ingreso de Aire	di		3.49
27	Verificación de Alta o Baja Rugosidad			Flujo Gradualmente Variado
28	Tirante Conjugado Menor	y1	m	3.49
29	Tirante Conjugado Mayor	y2	m	7.98
30	Longitud de Resalto	Lr	m	22.44
31	Cabezal de Energía Total	Hmáx	m	53.03
32	Relación (Hmáx/yc)	Hmáx/yc		9.77
33	Tirante Característico	d	m	1.82
34	Velocidad Media	Uw	m/seg	21.72
35	Concentración Media de Aire	\bar{C}		30%
36	Tirante y ₉₀	y ₉₀	m	3.47
37	Borde Libre	BL	m	1.39
38	Altura de pared	hw	m	4.85
39	Tirante del Flujo Aire Agua al 90 %	d _{A-A}	m	2.43
40	Velocidad Media respecto al Tirante Flujo Aire Agua 90 %	Uw _{A-A}	m/seg	16.32

ESQUEMA DE FLUJO RASANTE
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE



Nota: Si el valor del último tramo alcanza valores negativos, significa que la curva del flujo gradualmente variado no se llega a desarrollar por completo.

Figura N° 151. Esquema General del Flujo Rasante para un Caudal del 900% (630 m³/seg) del Caudal de Diseño.

3.3.1.12 Análisis con Fórmulas al 1600% (1120 m3/seg) del Caudal de Diseño.
Tabla 93. Análisis con Fórmulas al 1600% (1120 m3/seg). Ver Anexo N° 32.

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO RASANTE
CAÍDA ES CALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO
 CAUDAL 1600 %

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO RASANTE				
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
DATOS				
1	Caudal de diseño	Qd	m3/seg	70
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	1600
3	Caudal a evaluar	Qe	m3/seg	1120
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m3/seg	560
5	Altura de escalón	h	m	4.65
6	Longitud de escalón	l	m	19.30
7	Ancho de escalón	W	m	7.95
8	Longitud de la caída	L	m	225.95
9	Pendiente aguas arriba de la caída.	S		0.001
10	Ancho del canal aguas arriba.	B	m	16.30
11	Factor de rugosidad de Manning.	n		0.014
12	Altura total de la caída	z	m	44.10
13	Gravedad	g	m/seg ²	9.81
14	Número de escalones	N°e		12
CÁLCULOS				
15	Pendiente del escalón	Θ	°	14
16	Tirante Crítico.	yc		7.97
17	Relación h/l	h/l		0.24
18	Relación yc/h	yc/h		0.58
19	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 2002)	$yc/h > 1.2 - 0.325 \cdot tg\Theta$		Cumple
20	Verificación de Flujo Rasante (Sánchez)	$yc/h > 0.983 - 0.171 \cdot h/l$		Cumple
21	Verificación de Flujo Rasante (Ohtsu y Yasuda)	$yc/h > 0.862 \cdot (h/l)^{-0.165}$		Cumple
22	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 1994)	$yc/h > 1.057 - 0.465 \cdot h/l$		Cumple
23	Tipo de flujo Rasante		SK 2	Skimming Tipo 2
24	Número de Froude Rugoso	F*		4.83
25	Coordenada Horizontal del Punto de Ingreso de Aire	Li		120.39
26	Coordenada Vertical del Punto de Ingreso de Aire	di		4.91
27	Verificación de Alta o Baja Rugosidad			Flujo Gradualmente Variado
28	Tirante Conjugado Menor	y1	m	4.91
29	Tirante Conjugado Mayor	y2	m	12.10
30	Longitud de Resalto	Lr	m	35.95
31	Cabezal de Energía Total	Hmáx	m	58.69
32	Relación (Hmáx/yc)	Hmáx/yc		7.37
33	Tirante Característico	d	m	2.68
34	Velocidad Media	Uw	m/seg	26.31
35	Concentración Media de Aire	\bar{C}		29%
36	Tirante y ₉₀	y ₉₀	m	5.09
37	Borde Libre	BL	m	2.03
38	Altura de pared	hw	m	7.12
39	Tirante del Flujo Aire Agua al 90 %	d _{A-A}	m	3.59
40	Velocidad Media respecto al Tirante Flujo Aire Agua 90 %	Uw _{A-A}	m/seg	19.63

ESQUEMA DE FLUJO RASANTE
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE

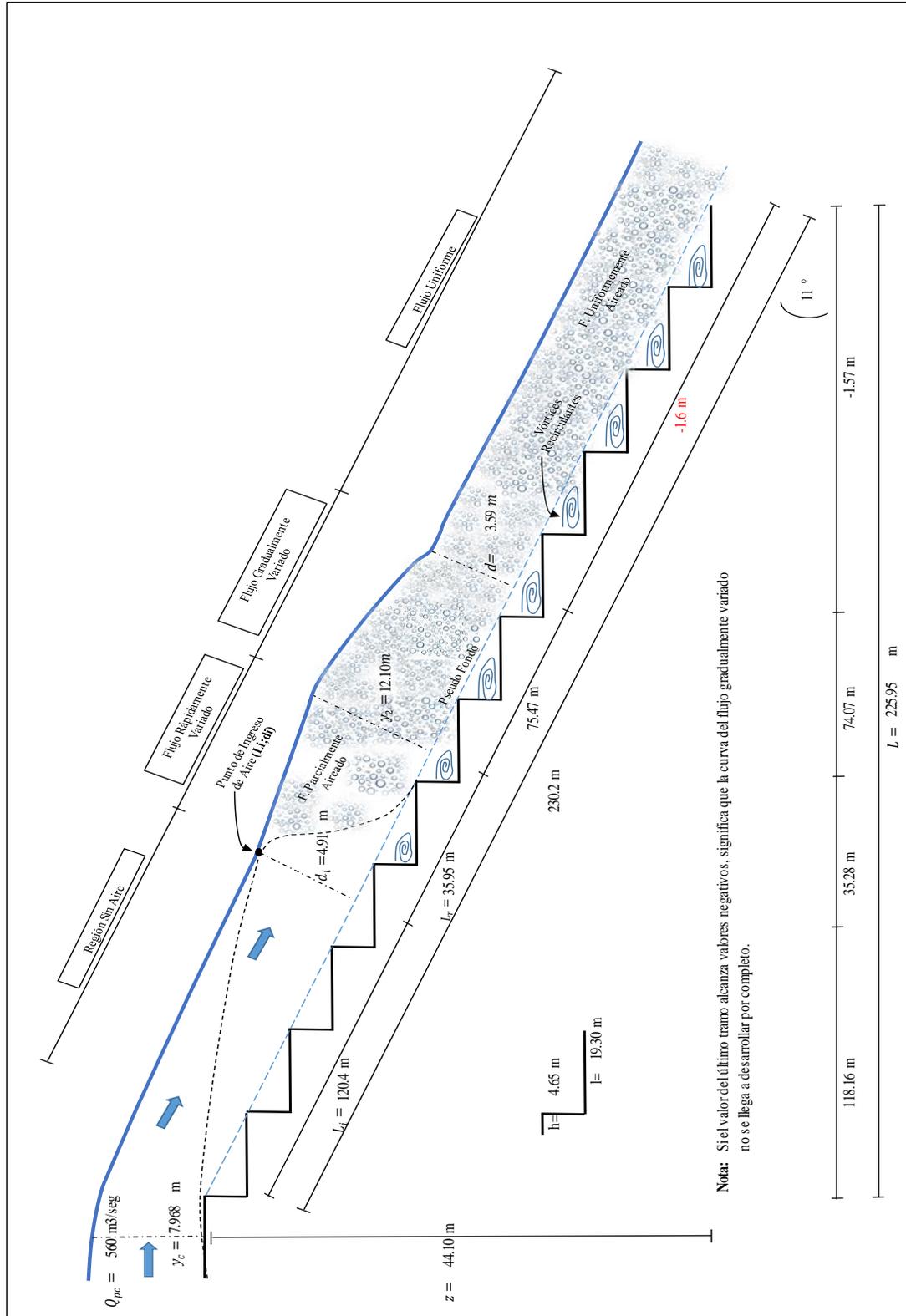


Figura N° 152. Esquema General del Flujo Rasante para un Caudal del 1600% (1120 m³/seg) del Caudal de Diseño.

3.3.1.13 Análisis con Fórmulas al 2000% (1400 m3/seg) del Caudal de Diseño.

Tabla 94. Análisis con Fórmulas al 2000% (1400 m3/seg). Ver Anexo N° 33.

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO RASANTE
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO
CAUDAL 2000 %

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO RASANTE				
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
DATOS				
1	Caudal de diseño	Qd	m3/seg	70
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	2000
3	Caudal a evaluar	Qe	m3/seg	1400
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m3/seg	700
5	Altura de escalón	h	m	4.65
6	Longitud de escalón	l	m	19.30
7	Ancho de escalón	W	m	7.95
8	Longitud de la caída	L	m	225.95
9	Pendiente aguas arriba de la caída.	S		0.001
10	Ancho del canal aguas arriba.	B	m	16.30
11	Factor de rugosidad de Maning.	n		0.014
12	Altura total de la caída	z	m	44.10
13	Gravedad	g	m/seg ²	9.81
14	Número de escalones	N°e		12
CÁLCULOS				
15	Pendiente del escalón	Θ	°	14
16	Tirante Crítico.	yc		9.25
17	Relación h/l	h/l		0.24
18	Relación yc/h	yc/h		0.50
19	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 2002)	$yc/h > 1.2 - 0.325 \cdot tg \Theta$		Cumple
20	Verificación de Flujo Rasante (Sánchez)	$yc/h > 0.983 - 0.171 \cdot h/l$		Cumple
21	Verificación de Flujo Rasante (Ohtsu y Yasuda)	$yc/h > 0.862 \cdot (h/l)^{-0.165}$		Cumple
22	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 1994)	$yc/h > 1.057 - 0.465 \cdot h/l$		Cumple
23	Tipo de flujo Rasante		SK 1	Skimming Tipo 1
24	Número de Froude Rugoso	F*		6.04
25	Coordenada Horizontal del Punto de Ingreso de Aire	Li		141.15
26	Coordenada Vertical del Punto de Ingreso de Aire	di		5.61
27	Verificación de Alta o Baja Rugosidad			Flujo Gradualmente Variado
28	Tirante Conjugado Menor	y1	m	5.61
29	Tirante Conjugado Mayor	y2	m	14.22
30	Longitud de Resalto	Lr	m	43.07
31	Cabezal de Energía Total	Hmáx	m	61.87
32	Relación (Hmáx/yc)	Hmáx/yc		6.69
33	Tirante Característico	d	m	3.14
34	Velocidad Media	Uw	m/seg	28.05
35	Concentración Media de Aire	C̄		29%
36	Tirante y90	y90	m	5.96
37	Borde Libre	BL	m	2.39
38	Altura de pared	hw	m	8.35
39	Tirante del Flujo Aire Agua al 90 %	dA-A	m	4.24
40	Velocidad Media respecto al Tirante Flujo Aire Agua 90 %	UwA-A	m/seg	20.75

ESQUEMA DE FLUJO RASANTE
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE

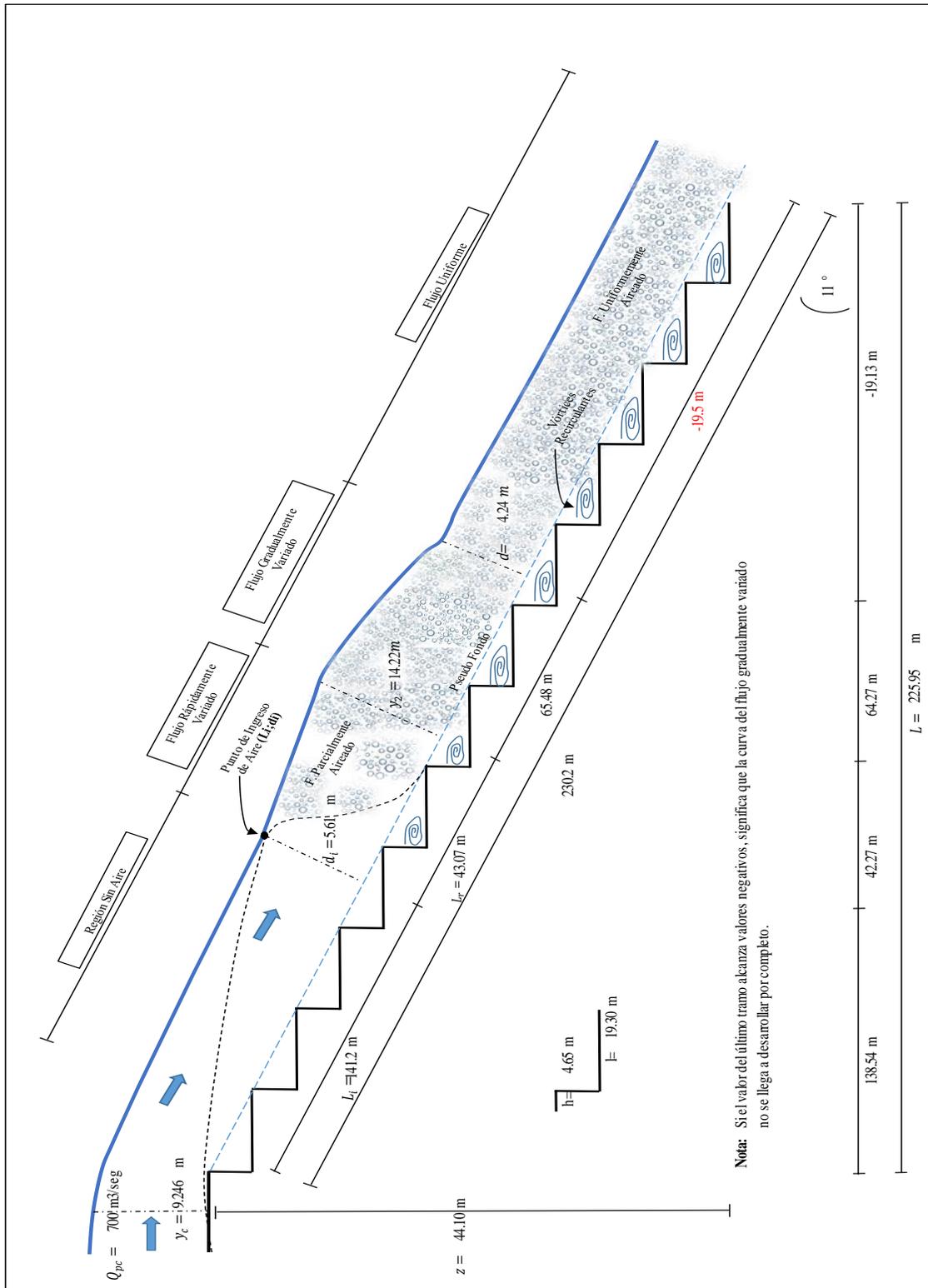


Figura N° 153. Esquema General del Flujo Rasante para un Caudal del 2000% (1400 m³/seg) del Caudal de Diseño.

3.3.1.14 Análisis con Fórmulas al 2500% (1750 m³/seg) del Caudal de Diseño.

Tabla 95. Análisis con Fórmulas al 2500% (1750 m³/seg). Ver Anexo N° 34.

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO RASANTE
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO

CAUDAL 2500 %

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE FLUJO RASANTE				
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
DATOS				
1	Caudal de diseño	Qd	m ³ /seg	70
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	2500
3	Caudal a evaluar	Qe	m ³ /seg	1750
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m ³ /seg	875
5	Altura de escalón	h	m	4.65
6	Longitud de escalón	l	m	19.30
7	Ancho de escalón	W	m	7.95
8	Longitud de la caída	L	m	225.95
9	Pendiente aguas arriba de la caída.	S		0.001
10	Ancho del canal aguas arriba.	B	m	16.30
11	Factor de rugosidad de Manning.	n		0.014
12	Altura total de la caída	z	m	44.10
13	Gravedad	g	m/seg ²	9.81
14	Número de escalones	N°e		12
CÁLCULOS				
15	Pendiente del escalón	Θ	°	14
16	Tirante Crítico.	yc		10.73
17	Relación h/l	h/l		0.24
18	Relación y/c/h	y/c/h		0.43
19	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 2002)	$yc/h > 1.2 - 0.325 \cdot tg\Theta$		Cumple
20	Verificación de Flujo Rasante (Sánchez)	$yc/h > 0.983 - 0.171 \cdot h/l$		Cumple
21	Verificación de Flujo Rasante (Ohtsu y Yasuda)	$yc/h > 0.862 \cdot (h/l)^{-0.165}$		Cumple
22	Verificación de Flujo Rasante (Chanson, 1994)	$yc/h > 1.057 - 0.465 \cdot h/l$		Cumple
23	Tipo de flujo Rasante		SK 1	Skimming Tipo 1
24	Número de Froude Rugoso	F*		7.55
25	Coordenada Horizontal del Punto de Ingreso de Aire	Li		165.50
26	Coordenada Vertical del Punto de Ingreso de Aire	di		6.40
27	Verificación de Alta o Baja Rugosidad			Flujo Gradualmente Variado
28	Tirante Conjugado Menor	y1	m	6.40
29	Tirante Conjugado Mayor	y2	m	16.71
30	Longitud de Resalto	Lr	m	51.55
31	Cabezal de Energía Total	Hmáx	m	65.82
32	Relación (Hmáx/yc)	Hmáx/yc		6.14
33	Tirante Característico	d	m	3.69
34	Velocidad Media	Uw	m/seg	29.82
35	Concentración Media de Aire	C̄		28%
36	Tirante y ₉₀	y ₉₀	m	7.01
37	Borde Libre	BL	m	2.81
38	Altura de pared	hw	m	9.82
39	Tirante del Flujo Aire Agua al 90 %	d _{A-A}	m	5.05
40	Velocidad Media respecto al Tirante Flujo Aire Agua 90 %	Uw _{A-A}	m/seg	21.77

ESQUEMA DE FLUJO RASANTE
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE

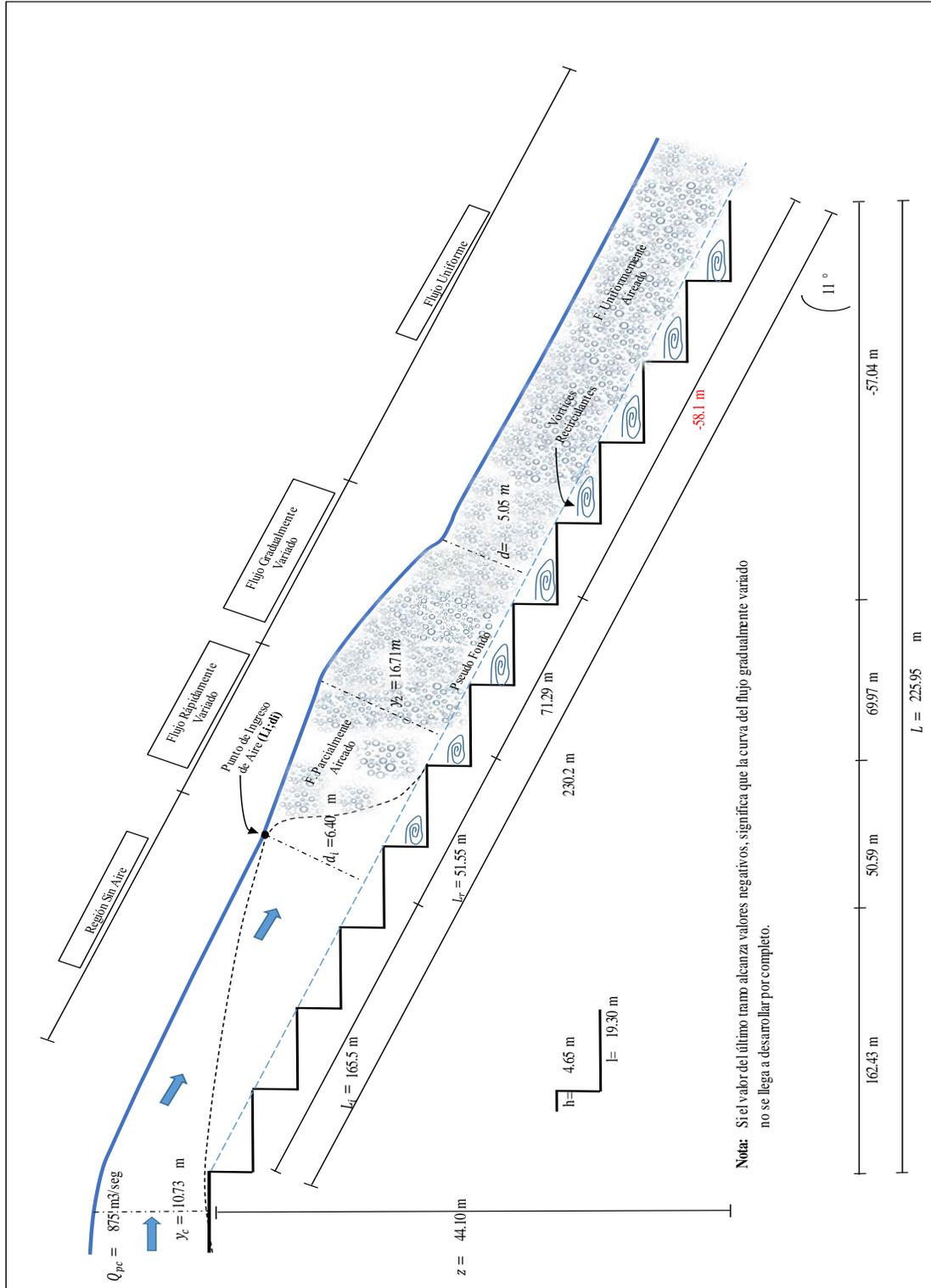


Figura N° 154. Esquema General del Flujo Rasante para un Caudal del 2500% (1750 m³/seg) del Caudal de Diseño.

3.3.2 Diseño Hidráulico Óptimo de la Caída Escalonada La Cascada.

Se realizó un diseño hidráulico óptimo para la caída escalonada, consiguiendo una estructura con dimensiones menores para los escalones y obstáculos, con las cotas y progresivas del canal se realizó la siguiente gráfica **Figura N° 155**, para un mayor entendimiento del inicio del diseño hidráulico óptimo, no tomar en cuenta el relieve del terreno ya que para este caso solamente es representativo.

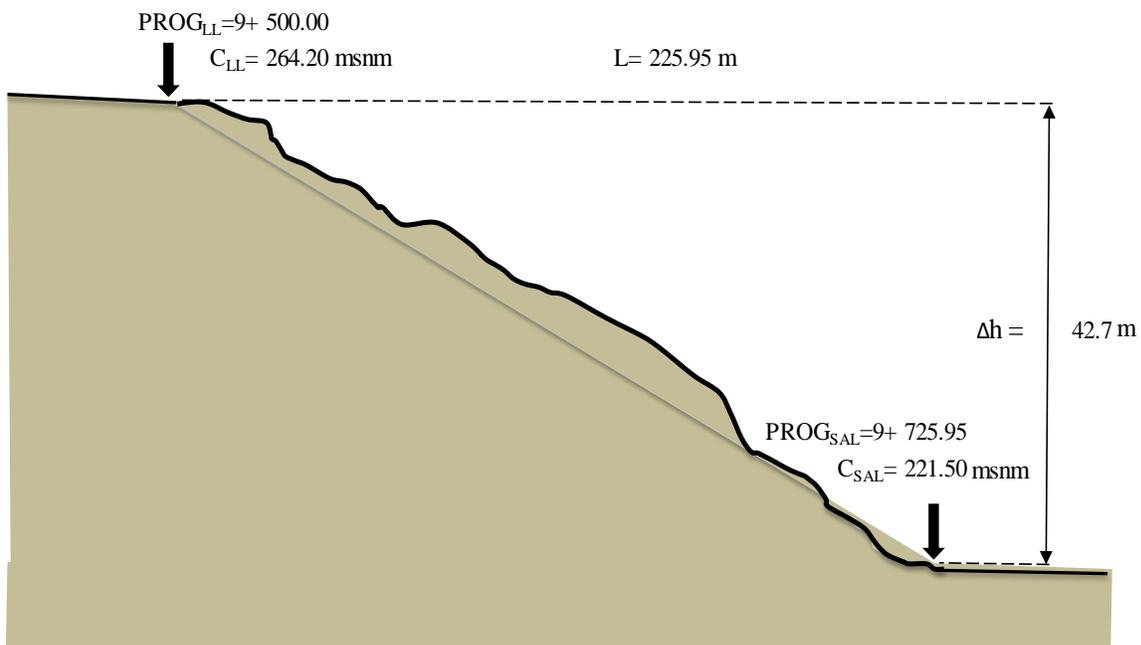
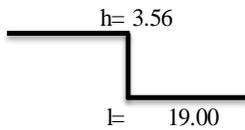


Figura N° 155. Datos Topográficos para el Diseño Hidráulico Óptimo.

Se realizó el pre dimensionamiento de los escalones para el diseño óptimo de la caída escalonada La Cascada, obteniendo una configuración geométrica de los mismos como se puede observar en la **Figura N° 156**.

Escalón N° 1 - N° 11



Escalón N° 12

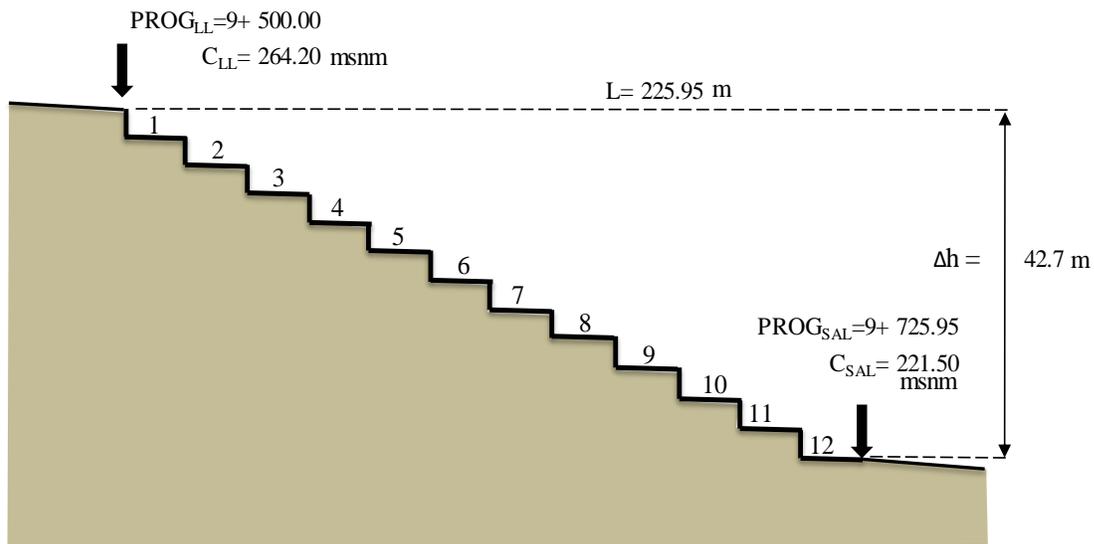
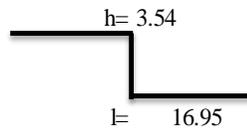


Figura N° 156. Pre dimensionamiento de Escalones - Diseño Hidráulico Óptimo.

Se realizó el diseño del tanque amortiguador o poza de disipación para el diseño óptimo de la caída escalonada La Cascada, los resultados se pueden observar en la **Figura N° 157**.

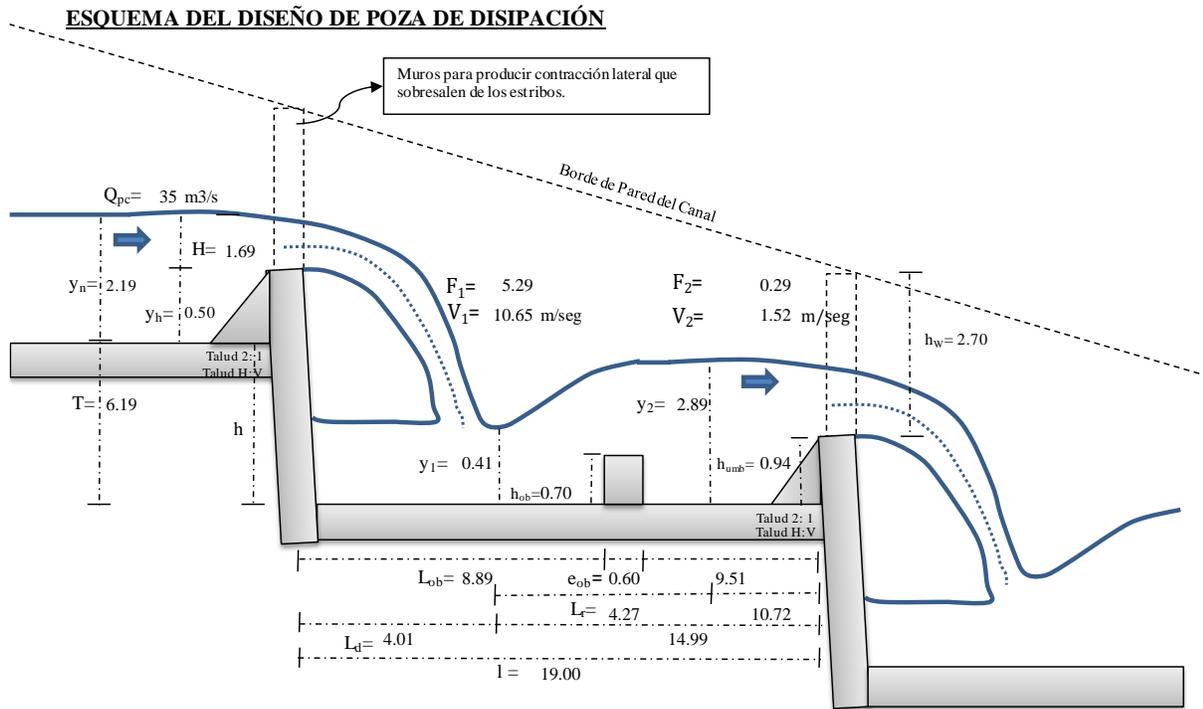


Figura N° 157. Diseño del Tanque Amortiguador - Diseño Óptimo.

En resumen, los resultados del diseño hidráulico óptimo de la caída escalonada La Cascada se pueden observar en la **Tabla N° 96** y la **Figura N° 157**, para mayores detalles de los cálculos ver **Anexo N° 36**.

Tabla 96. Cuadro Resumen de Diseño Hidráulico Óptimo de La Cascada.

**RESULTADOS DE DISEÑO HIDRÁULICO ÓPTIMO
CAÍDA ESCALONADA LA CASCADA - CHONGOYAPE - CHICLAYO**

RESULTADOS DE DISEÑO HIDRÁULICO ÓPTIMO DE LA CASCADA				
N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
DATOS				
1	Caudal de diseño	Qd	m3/seg	70.00
2	Caudal a evaluar en porcentaje	Qe	%	100
3	Caudal a evaluar	Qe	m3/seg	70.00
4	Caudal a evaluar por canal.	Qpc	m3/seg	35.00
5	Pendiente Natural del Terreno	S _t	m/m	0.19
6	Diferencia de Nivel de Canales	Δh	m	42.70
7	Ancho del canal	W	m	7.95
RESULTADOS				
8	Tirante Crítico y _c	y _c	m	1.25
9	Relación y _c /h (Asumido)	y _c /h (asumido)		0.22
10	Altura o Contrahuella de Escalón de Cálculo	h (cálculo)	m	5.70
11	Altura o Contrahuella de Escalón Óptima	h _{ópt}	m	0.38
12	Altura o Contrahuella de Escalón Promedio	h _{promedio}	m	3.04
13	Altura o Contrahuella de Escalón Asumida	h _{asumida}	m	3.56
14	Altura o Contrahuella de Escalones Intermedios	h	m	3.56
15	Altura o Contrahuella de Escalón N° 1	h	m	4.00
16	Altura o Contrahuella de Escalón N° 12	h	m	3.54
17	Longitud o Huella del Escalón de Cálculo	l (cálculo)	m	18.74
18	Longitud o Huella del Escalón Asumida	l (asumida)	m	19.00
19	Longitud o Huella del Escalones Intermedios	l	m	19.00
20	Longitud o Huella del Escalón N° 12	l	m	16.95
21	Pendiente del Escalón	h/l		0.19
22	Número Total de Escalones	N°e		12.00
23	Longitud Total de la Caída	L	m	225.95
24	Tirante Normal	y _n	m	2.19
25	Carga Hidráulica sobre el Vertedero	H	m	1.69
26	Tirante Conjugado Menor	y ₁	m	0.41
27	Velocidad en Tirante Conjugado Menor	V ₁	m/seg	10.65
28	Froude en Tirante Conjugado Menor	F ₁		5.29 Supercrítico
29	Tirante Conjugado Mayor	y ₂	m	2.89
30	Velocidad en Tirante Conjugado Mayor	V ₂	m/seg	1.52
31	Froude en Tirante Conjugado Mayor	F ₂		0.29 Subcrítico
32	Longitud de Resalto Hidráulico	L _r	m	4.27
33	Energía Disipada en la Caída Escalonada	ΔE ₁₋₂	m	42.84
34	Tanque Armortiguador USBR			Tipo II
35	Longitud Mínima de Poza de Disipación	L _m	m	13.46
36	Altura de Umbral de Entrada	y _h	m	0.50
37	Altura de Umbral de Salida	y _{umb}	m	0.94
38	Ubicación de los Obstáculos	L _{ob}	m	8.89
39	Altura Óptima de Obstáculos	h _{ob}	m	0.70
40	Espesor de Obstáculos	e _{ob}	m	0.60
41	Altura de Pared del Canal	h _w	m	2.70

ESQUEMA GENERAL DE LA CAÍDA ESCALONADA - DISEÑO HIDRAULICO OPTIMO

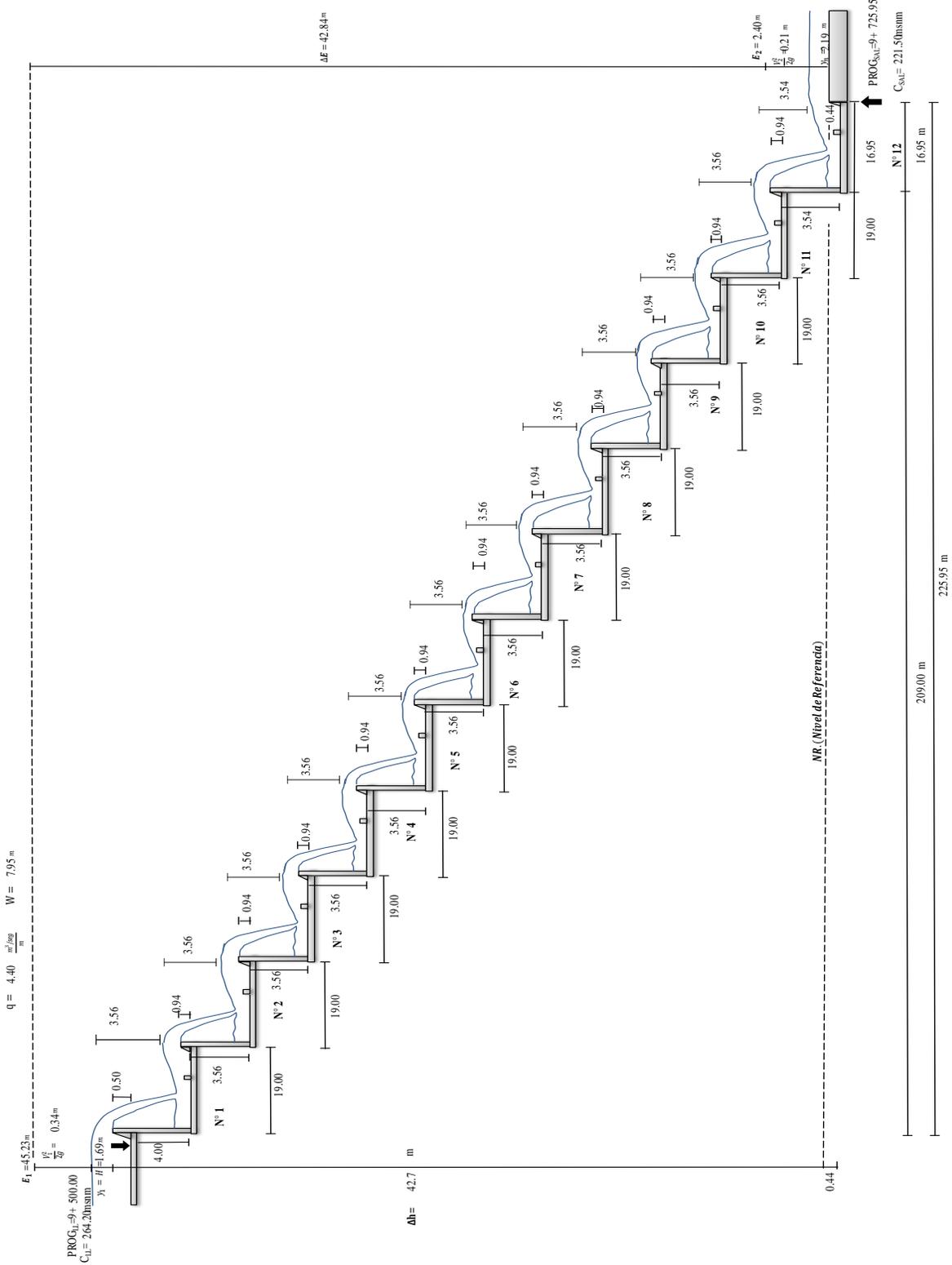


Figura N° 158. Esquema General del Diseño Hidráulico Óptimo de la Caída Escalonada La Cascada.

3.3.3 Correlación para una Nueva Gráfica de Tipos de Flujo

Se realizó una correlación con las ecuaciones utilizadas para la predicción del flujo del análisis hidráulico con fórmulas, la cual para el eje horizontal se tiene la relación h/l y para el eje vertical se tiene la relación h/y_c .

3.3.3.1 Correlación de Ecuaciones de Flujo Saltante (NAP)

Para la correlación de las ecuaciones de flujo Saltante se excluyó la 1ra Ecuación de flujo NAP por tener una tendencia distinta a las demás, también se añadió la 1ra Ec. de flujo Transitorio TRA. Para mayores detalles ver **Anexo N° 40**.

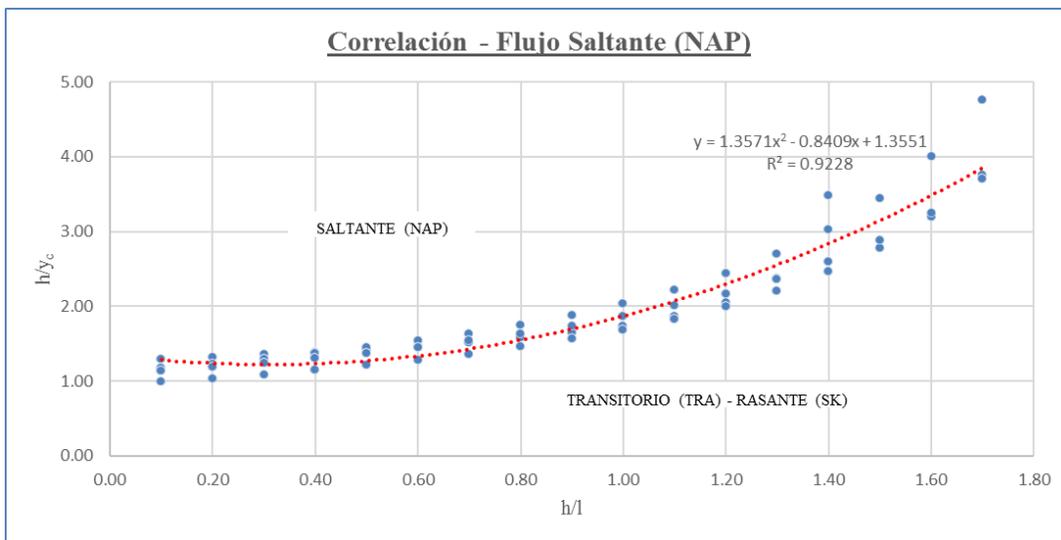


Figura N° 159. Correlación de Flujo Saltante (NAP).

La nueva ecuación obtenida al correlacionar las ecuaciones utilizadas en el cálculo analítico para esta investigación en Flujo Saltante es la siguiente:

$$\frac{h}{y_c} = 1.3571 \cdot \left(\frac{h}{l}\right)^2 - 0.8409 \cdot \left(\frac{h}{l}\right) + 1.3551$$

Ecuación 104. Límite entre flujo NAP y TRA (2020).

3.3.3.2 Correlación de Ecuaciones de Flujo Rasante (NAP)

Para la correlación de las ecuaciones de flujo rasante (SK) se excluyó la 4ta Ecuación de flujo rasante (SK) por tener una tendencia distinta a las demás, también se añadió la 2da Ec de flujo Transitorio (TRA). Para mayores detalles ver **Anexo N° 40**.

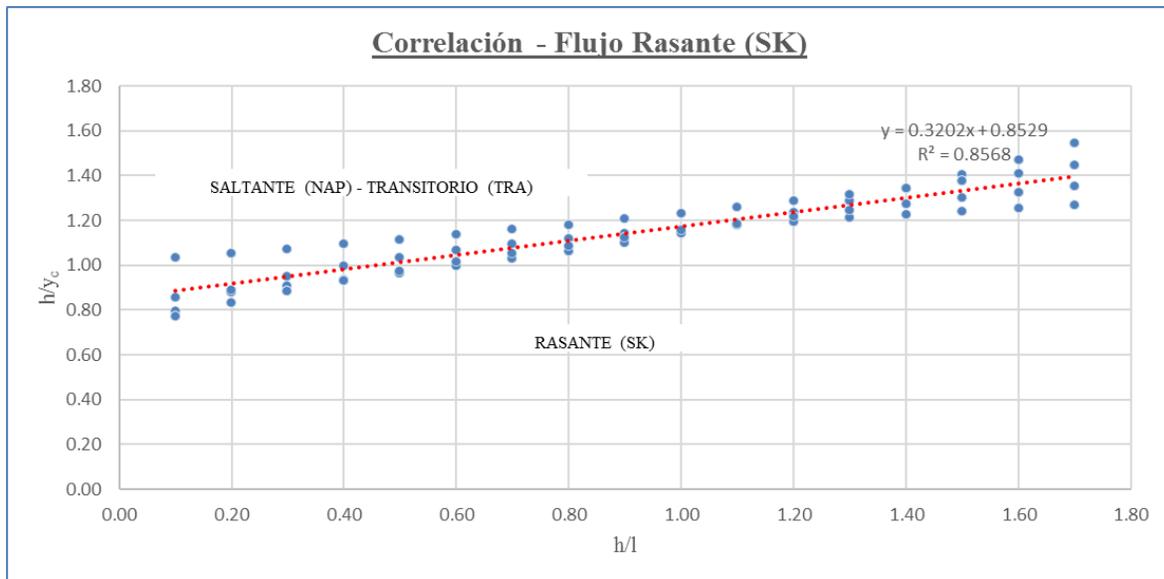


Figura N° 160. Correlación de Flujo Rasante (SK).

La nueva ecuación obtenida al correlacionar las ecuaciones utilizadas en el cálculo analítico para esta investigación en Flujo Rasante es la siguiente:

$$\frac{h}{y_c} = 0.3202 \cdot \left(\frac{h}{l}\right) + 0.8529$$

Ecuación 105. Límite entre flujo TRA y SK (2020).

Al graficar las nuevas ecuaciones obtenidas (**Ecuación 104** y **Ecuación 105**) se obtiene la siguiente gráfica para predecir el flujo escalonado.

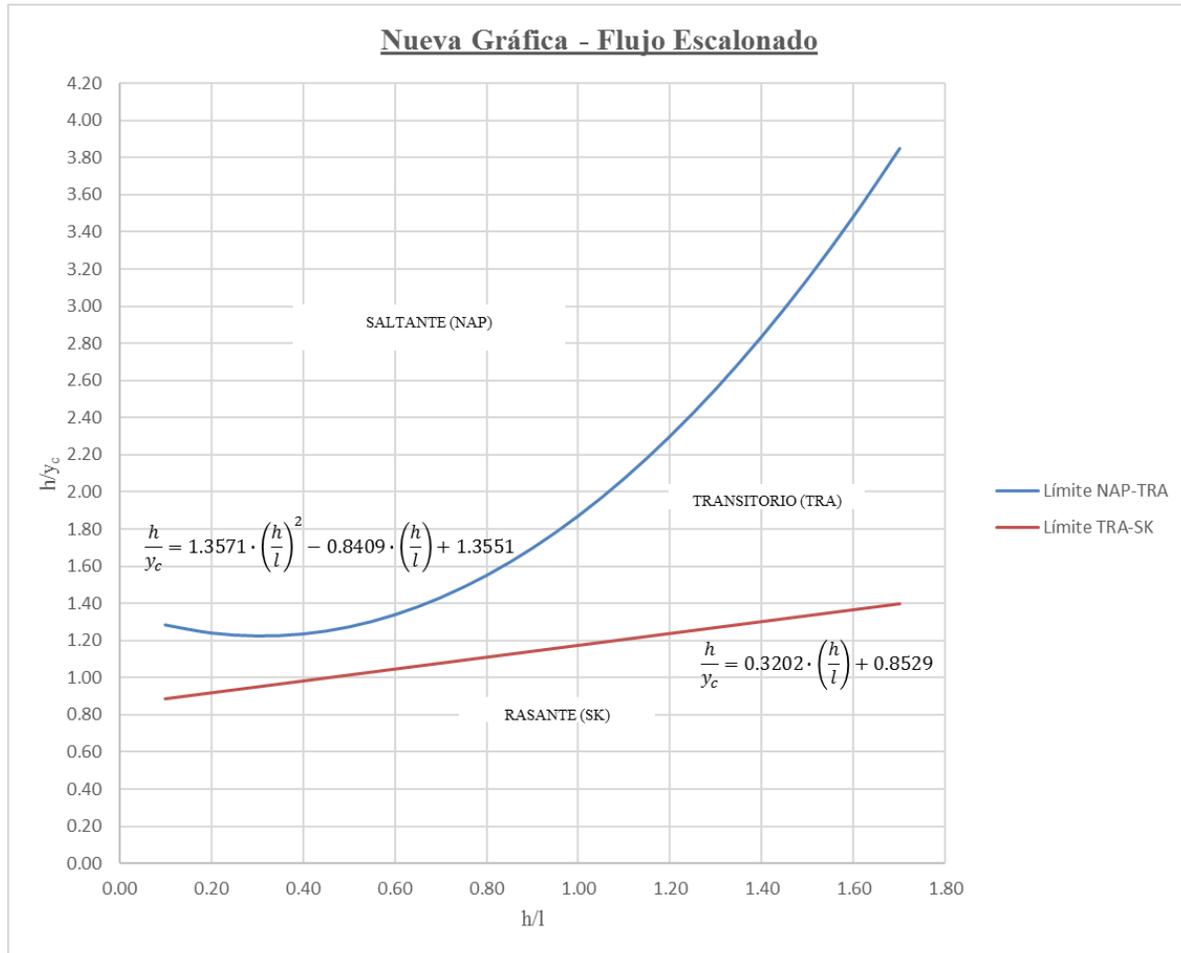


Figura N° 161. Nueva Gráfica para Predicción del Flujo Escalonado. Ver Anexo N° 40.

CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- A.** La obtención de información en entidades del estado suele ser de reacción tardía a la solicitud de la misma, en el caso de La Cascada se obtuvo información geométrica por medio de los planos que se encontraban en el archivo del PEOT el cual se ubica en las instalaciones del ANA.

- B.** En el diseño del Modelo Físico se determinó emplear la escala de 1/75 y emplear acrílico para su construcción, ya que lo que se buscó es observar el comportamiento de los flujos con variación del caudal de diseño incluso superándolo hasta el 150%, el diseño del modelo físico ayudo a determinar la manera del soporte de la estructura de base metálica y como se acoplaría luego los elementos de acrílico permitiendo la simulación real del comportamiento del flujo de la estructura hidráulica La Cascada.

- C.** En los ensayos se notó las variaciones que existe entre un modelo y una estructura real, el material por donde pasa el flujo vendría siendo el principal junto con el tamaño ya que estos influyen directamente en cómo se comporte el flujo en la estructura, se observó cómo se mantiene el flujo saltante hasta el caudal evaluado del 150%, para observar un cambio de régimen de flujo escalonado en la estructura evaluada tendría que operar caudales elevados como 540% para Transitorio y 900 % para Rasante.

- D.** En la comparación de resultados se pudo observar la similitud que hay en el régimen Saltante (NAP) para el Modelo Físico, análisis con Fórmulas, pero con una amplia variación en general para los resultados de los parámetros hidráulicos debido a los efectos del tanque amortiguador. Se verificó el correcto diseño hidráulico de la caída escalonada, pudiendo optimizarse al tomar otros criterios de diseño. El Software Hec – Ras no es ideal para evaluar flujo en canales de fondo escalonado y flujos en caída libre.

4.2. Recomendaciones

- a. Solicitar la información de proyectos en las instituciones públicas de forma anticipada para no tener inconvenientes con el desarrollo y plazos establecido en la culminación de nuevas investigaciones.
- b. Planificar muy bien las etapas de construcción en el diseño de modelos físicos, prever los materiales a emplear y equipos o herramientas a utilizar.
- c. Realizar el análisis de flujos escalonados en un modelo físico, el cual sea ideal para la generación de dichos tipos de flujos con caudales que sean posibles de generar en el modelo físico y determinar nuevas ecuaciones de predicción para cada tipo de flujo, ya que en el modelo físico realizado no se observó el flujo Rasante y Transitorio. Así mismo un análisis detallado del flujo Saltante se podría realizar en un modelo físico independiente a mayor escala con grada simple y grada con umbrales que permita analizar los parámetros hidráulicos que se producen dentro del escalón.
- d. Realizar investigaciones comparativas de análisis de flujos escalonados en softwares avanzados como pueden ser Open FOAM, Real FLOW 3D, ANSYS y FLOW 3D, ya que el software utilizado en esta investigación no dio los resultados esperados para este tipo de flujos.

REFERENCIAS

- Arista, A. R. L. (2004) - Estudios Experimentales de Erosión Localizada a la Salida de una Compuerta. Tesis (Titulación). Lima, Perú. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Arreguín, C. y Alcocer, Y. (2010) - Diseño Hidráulico de Vertedores. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA) (1965) – Proyecto Tinajones. Perú.
- Aguilar Aguinaga D. A. (2016) – Comparación Técnica entre el uso de Gaviones y Geoceldas como Estructuras de Defensa Ribereña. Lima, Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA) (2010) - Criterios de Diseños de Obras Hidráulicas para la Formulación de Proyectos Hidráulicos Multisectoriales y de Afianzamiento Hídrico.
- Barreto Escobedo C. (2014) – Investigación Hidráulica Utilizando un Modelo Numérico 3D de la Presa Tablones Alto – Chincas. Piura, Perú. Universidad de Piura.
- Bayón Barrachina A. (2015) – Modelado Matemático de flujo no aireado en Aliviaderos escalonados mediante OpenFOAM. Valencia, España. Universidad Politécnica de Valencia.
- Rosado, C. G. A. (2017) - Metodología para el Diseño de Canales Escalonados, Disipadores de Energía, Empleados en Drenaje Urbano, Basada en Modelación Física. Tesis (Maestría). Colombia. Universidad de Colombia.
- Chanson, H. y Gonzáles, C. (2007) - Diseño Hidráulico de Vertedores Escalonados con Pendientes Moderadas: Metodología Basada en un Estudio Experimental. Australia. Universidad de Queensland.
- Chanson y Toombes. (2000) - Stream Reaeration in Nonuniform Flow - Flujo de reareación en flujo no uniforme. The University of Queensland, Australia.
- Chanson, H. (2002) - The hydraulics of stepped chutes and spillways - La hidráulica de rampas y vertederos escalonados. Australia. Universidad de Queensland.
- Chirinos Sota F. R. (2017) – Estudio de Socavación de la Subestructura de Puente y Analisis de Estabilidad – Caso Puente Nicolas Dueñas de la Ciudad de Lima en el 2017. Lima, Perú. Universidad Cesar Vallejo.
- Cuzque, H. N. (2019) - Diseño de un Modelo Físico Hidráulico para Disipar Energía en un Canal con Pantallas Deflectoras. Tesis (Titulación). Chiclayo, Perú. Universidad Señor de Sipán.

- Del Toro, A. N. (2013) - Bases y Criterios de Diseño de Canales con Flujo Escalonado y Sujetos a Aireación Natural. Tesis (Titulación). Ecuador. Universidad Central del Ecuador.
- Espinosa, J. y Mera, C. (2007) - Análisis Experimental de Disipación de Energía, Distribución de Presiones y Resistencia al Flujo de una Rápida con Fondo Escalonado con Relación Altura (h) – Longitud de Grada (l) de $h/l = 0.10$. Tesis (Titulación). Ecuador. Universidad Politécnica Nacional.
- Escobar, R. B. (2014) - Diseño Hidráulico de Estructuras de Retención de Sólidos Provenientes de Laderas del Cerro la Picota-Ayacucho. Tesis (Titulación). Ayacucho, Perú. Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga.
- Flores Alarcón W. (2015) – Comportamiento del Flujo en Vertedores Escalonados con Descarga Convergente. México. Universidad Nacional Autónoma de México.
- González, G. E. J. y Peláez, C. R. J. (2017) - Influencia de la Longitud de Diseño del Sistema de Drenaje Tipo Horizontal para un Modelamiento Físico Bidimensional en Presas de Material Homogéneo no Cohesivo y Compactado. Tesis (Titulación). Chiclayo, Perú. Universidad Señor de Sipán.
- Gutiérrez De La Torre F. (2016) – Modelación Numérica con Telemac del Comportamiento del Flujo y Sedimentos del Desarenador Quitaraca I. Piura, Perú. Universidad de Piura.
- Ljubomir Tanchev (2004) – Dams and Appurtenant Hydraulic Structures. London, Inglaterra.
- Ministerio de Agricultura (1998) – Estudio sobre El Clima, Hidrología, Sequia e Inundaciones en los Departamentos de Tacna, Moquegua y Puno. Lima, Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Paredes Salazar R.R. (2014) – Investigación de la Disipación de Energía del Segundo Aliviadero de Excedencia – Presa Sabana Yegua. Piura, Perú. Universidad de Piura.
- Peterka J. (1983) - Hydraulic Design of Stilling Basin and Energy Dissipators. Indiana, EEUU. University of Indiana.
- Pulcha, D. M. E. (2014) - Modelación Matemática Bi-dimensional de Estructuras Hidráulicas. Aplicación a Modelos Físicos de las Bocatomas Chao-Virú, Achirana, Atacayán y Batea Comezango. Tesis (Titulación). Lima, Perú. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Ricardi, G. R. (2011) - Diseño de Vertederos Escalonados. Tesis (Maestría). México. Instituto Politécnico Nacional.
- Rojas, G. W. T. (2004) - Modelamiento Hidráulico para el Estudio de la Socavación en Pilares de Puentes y Análisis de los Métodos para su Cálculo. Tesis (Titulación). Arequipa, Perú. Universidad Católica de Santa María.

- Rojas Naira P. y Humpiri Pari V. (2016) – Evaluación, Diseño y Modelamiento del Sistema de Drenaje Pluvial de la ciudad de Juliaca con la Aplicación del Software SWMM. Puno, Perú. Universidad Nacional del Altiplano.
- Silva Dávila M. R. (2012) – Estudio y Modelamiento Matemático de los Procesos de Sedimentación y Purga de un Reservorio. Lima. Perú. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Sviatoslav Krochin. (1986) - Diseño Hidráulico. Quito, Ecuador. Escuela Politécnica.
- Toral, S. E. (2013) - Comportamiento Hidráulico de Aliviaderos Escalonados Sin Cajeros Laterales en Presas de HCR. Tesis (Doctorado). España. Universidad de Catalunya.
- Tovar Barrera A. C. (2014) – Diseño Hidráulico de Estructuras de Disipación de Energía del Canal Sur, Distrito de Jangas Provincia Huaraz, Región Ancash. Lima, Perú. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Vergara, S. M. A. (1993) – Técnicas de Modelación en Hidráulica. Libro (Publicación). Distrito Federal, México.
- Villón, V. m. (2005) – Diseño de Estructuras Hidráulicas. Primera Edición. Lima, Perú. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

ANEXOS