UNIVERSIDAD NACIONAL
"SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO"

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:

"ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA DE LAS CORRIENTES DE AGUA EN CANALES DE CONCRETO DE 100% DE PENDIENTE EMPLEANDO PANTALLAS DEFLECTORAS".

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR EL BACHILLER:

MALPASO NIÑO ROSBERT JHONY

ASESOR:

Ing. MONTORO VERGARA DANILO ENRIQUE

HUARAZ - ANCASH - PERÚ

2019

FORMATO DE AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TESIS Y TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN, PARA OPTAR GRADOS ACADÉMICOS Y TÍTULOS PROFESIONALES EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DIGITAL - UNASAM

Conforme al Reglamento del Repositorio Nacional de Trabajos de Investigación – RENATI.
Resolución del Consejo Directivo de SUNEDU N°033-2016-SUNEDU/CD

1. Datos del Autor:

Apellidos y Nombres: MALPASO NIÑO, Rosbert Jhony.

Código de alumno: 081.0904.405 Teléfono: 943937548

Correo electrónico: rosbertumr@gmail.com DNI o Extranjería: 47014204

2. Modalidad de trabajo de investigación:

( ) Trabajo de investigación ( ) Trabajo académico

( ) Trabajo de suficiencia profesional (X) Tesis

3. Título profesional o grado académico:

( ) Bachiller (X) Título ( ) Segunda especialidad

( ) Licenciado ( ) Magister ( ) Doctor

4. Título del trabajo de investigación:

"ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA DE LAS CORRIENTES DE AGUA EN CANALES DE CONCRETO DE 100% DE PENDIENTE EMPLEANDO PANTALLAS DEFLECTORAS".

5. Facultad de: INGENIERÍA CIVIL

6. Escuela, Carrera o Programa: INGENIERÍA CIVIL

7. Asesor:

Apellidos y Nombres: ING. MONTORO VERGARA, D. Teléfono: 992867892

Correo electrónico: dmontorove@hotmail.com DNI o Extranjería: 31671051

A través de este medio autorizo a la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, publicar el trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Institucional Digital, Repositorio Nacional Digital de Acceso Libre (ALICIA) y el Registro Nacional de Trabajos de Investigación (RENATI).

Asimismo, por la presente dejo constancia que los documentos entregados a la UNASAM, versión impresa y digital, son las versiones finales del trabajo sustentado y aprobado por el jurado y son de autoría del suscrito en estricto respeto de la legislación en materia de propiedad intelectual.

Firma: .....

D.N.I.: 47014204

FECHA: 23 / 11 / 2019

DEDICATORIA.

A mis amados padres Máximo y Teodosia,
por sus buenos consejos y apoyo en cada etapa de mi vida.

A la memoria de mi abuelita Alvina, mi malli Matiaza, mi palli Ambrocio,
por sus enseñanzas a través de historias, cuentos y su vida.

A la acogedora y maestra de mi educación profesional, la FIC-UNASAM.

A Sonia, gracias por apoyarme y alentarme.

A mi amigo Juan, siempre es bueno hablar contigo.

Al amable lector e investigador.

AGRADECIMIENTOS.

Mi gratitud para todos mis familiares y amigos que me brindaron su apoyo con mi investigación.

-Deyvi Malpaso, Oswaldo Malpaso, Jaime Malpaso, Oscar Malpaso, Victoria De La Cruz, Fernando Niño, Max Malpaso, Marino Malpaso, Magno Malpaso, Rubén Mendoza, Jorge García, Javier Pachas, Naani, Silvana Niño, Aurora Niño,Angie P. Niño, Diana Justiniano, Luis Rojas, Máximo Niño, Edgar Niño, Florentino Antunez Celmi, Patricio Alvarado, amigos y familiares.

ÍNDICE.

RESUMEN. vi
ABSTRACT. vii
INTRODUCCIÓN. viii
SIMBOLOGÍA. xi
LISTA DE FIGURAS. xiv
LISTA DE TABLAS. xx
LISTA DE ANEXOS. xx
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN. 1
1.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA. 1
1.2. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA. 2
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN. 3
1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA. 3
1.5 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN. 5
1.5.1 HIPÓTESIS. 5
1.5.2 VARIABLES Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES. . 5
1.5.3 OBJETIVOS. 6
1.6 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN. 6
1.6.1 PERSPECTIVA METODOLOGICA Y TIPO DE INVESTIGACIÓN. 6
1.6.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN. 6
1.6.3 LÍMITES DE LA INVESTIGACIÓN. 7
1.6.4 CONTEXTO. 7
1.6.5 UNIDAD DE ANÁLISIS: POBLACIÓN Y MUESTRA. 7
POBLACIÓN Y MUESTRA. 7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL. 8
ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN. 8
2.1 TIPOS DE FLUJO. 11
2.2 ESTADO DE FLUJO. 14
2.3 REGÍMENES DE FLUJO. 18
2.4 CANALES ABIERTOS Y SUS PROPIEDADES. 19
2.5 GEOMETRÍA Y ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE UNA CANAL. 22
2.6 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN UNA SECCIÓN DE CANAL. 23

2.7 ENERGÍA DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS. 26
2.7.1 PÉRDIDA O DISIPACIÓN DE ENERGÍA. 28
2.7.2 ENERGÍA ESPECÍFICA. 29
2.7.3 ECUACIÓN DE ENERGÍA PARA NO UNIFORME CON AUTOAERACIÓN. 33
2.8 RUGOSIDAD HIDRÁULICA EN CANALES DE FUERTE PENDIENTE. 33
2.8.1 CAPA LÍMITE. 33
2.8.2 RUGOSIDAD SUPERFICIAL. 34
2.8.3 ECUACIÓN DE RESISTENCIA AL FLUJO. 36
2.8.4 ESTUDIO ACERCA DE LAS MACRORUGOSIDADES EN LOS CONDUCTOS A GRAVEDAD. 40
2.9 ANÁLISIS DEL FLUJO UNIFORME. 49
2.9.1 CONSIDERACIONES PREVIAS. 49
2.9.2 FLUJO CON ADMISIÓN DE AIRE EN CANALES. 51
2.10 ANÁLISIS DEL FLUJO VARIADO (NO UNIFORME). 54
2.10.1 FLUJO CON ADMISIÓN DE AIRE EN CANALES. 56
2.10.2 ECUACIÓN DE LA ENERGÍA. 57
2.11 FENÓMENOS HIDRÁULICOS DESARROLLADOS EN EL FLUJO SUPERCRÍTICO. 58
2.11.1 FORMACIÓN DE ONDAS. 59
2.11.2 FLUJO PULSANTE. 61
2.11.3 ONDAS DE FROUDE. 62
2.11.4 CAVITACIÓN. 63
2.12 ANÁLISIS DIMENSIONAL DE CANALES CON ELEMENTOS RUGOSOS. 64
CAPÍTULO III: DISEÑO DE RÁPIDAS. 67
3.1 DEFINICIÓN DE RÁPIDAS. 67
3.2 ELECCIÓN DE LA SECCIÓN DEL CANAL DE LA RÁPIDA. . 68
3.3 VELOCIDAD MÁXIMA DE EROSIÓN. 69
3.4 CANAL CON PANTALLAS DEFLECTORAS (CPD). 69
CAPÍTULO IV: SIMULACIÓN EN MODELOS NUMÉRICOS Y ENSAYO EN UN MODELO FÍSICO. 72
A) SIMULACIÓN NUMÉRICA CON EL SOFTWARE IBER. 72
4.1 CÁLCULOS PREVIOS. 72
4.1.1 SISTEMA DE REFERENCIACIÓN. 84
4.1.2 ANÁLISIS NUMÉRICO CON EL SOFTWARE IBER. 89

4.1.3 ESTIMACIÓN DE RESULTADOS. 135
B) ENSAYO EN UN MODELO FÍSICO. 155
4.2 ESTRUCTURA, EQUIPOS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN. 155
4.2.1 PROCEDIMIENTOS DEL ENSAYO. 161
CAPÍTULO V: ANÁLISIS, COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS. 170
5.1 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE DATOS. 170
A) Confiabilidad y validez de la simulación numérica con el software Iber 2.4.2. 170
B) Prueba de hipótesis. 181
C) Eficiencia de las pantallas deflectoras en la disipación de energía específica. 188
D) Descripción de fenómenos locales. 196
5.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS. 201
CONCLUSIONES. 204
RECOMENDACIONES. 205
BIBLIOGRAFÍA 206
ANEXOS 209

RESUMEN.

Para disipar la energía específica, disminuyendo la velocidad de un flujo con régimen supercrítico en canales de pendiente fuerte muy notables como el de 45°, es necesario realizar un análisis experimental con el material de mayor uso en la construcción de las obras hidráulicas como es el caso del concreto, a fin de poder evaluar una nueva alternativa para la disipación de energía específica frente a los comúnmente usados (Tanque amortiguador, Disipador de Rejillas, etc.).

Para determinar la eficiencia que presentan el uso de una determinada forma de pantallas deflectoras de concreto orientados con un ángulo de 45° con respecto al eje longitudinal de un canal de 10.00 m de longitud, 0.20m de ancho y 0.50m de borde libre (altura), con un caudal promedio de flujo de agua de 25.00l/s medido por un vertedero de pared delgada triangular, se realizó mediciones del tirante del flujo a cada 0.10m a lo largo del canal; y con ello se calculó la velocidad del flujo, con el tirante medido y la velocidad se determinó la energía [específica] en el canal con pantallas deflectoras y se comparó con la energía del flujo en el canal sin pantallas deflectoras, donde el resultado fue que las pantallas deflectoras [usadas] pueden llegar a tener una eficiencia media en la disipación de energía de 76.63%, comparado con un canal sin pantallas deflectoras.

PALABRAS CLAVES: energía específica, disipación de energía, pantallas deflectoras.

ABSTRACT.

To dissipate the specific energy, reducing the speed of a supercritical flow in very steep channels such as 45 °, it is necessary to perform an experimental analysis with the material most used in the construction of hydraulic works such as In the case of concrete, in order to evaluate a new alternative for the dissipation of specific energy against those commonly used (buffer tank, grid heatsink, etc.).

To determine the efficiency of the use of a certain form of concrete deflector screens oriented at an angle of 45 ° with respect to the longitudinal axis of a channel 10.00 m long, 0.20m wide and 0.50m free edge (height), with an average water flow rate of 25.00l / s measured by a triangular thin-walled landfill, measurements of the flow strap were made at every 0.10m along the canal; and with this the flow velocity was calculated, with the measured strut and the velocity the [specific] energy in the channel with deflector screens was determined and compared with the energy of the flow in the channel without deflector screens, where the result was that the deflector screens [used] can have an average energy dissipation efficiency of 76.63%, compared to a channel without deflector screens.

KEYWORDS: specific energy, energy dissipation, deflector screens.

INTRODUCCIÓN.

Para crear nuevas alternativas en la disipación de la energía específica del flujo de agua en canales de gran pendiente, se ha realizado un estudio a nivel teórico y experimental del uso de pantallas como elementos macrorugosos que puedan disipar la energía específica del flujo, y teniendo en cuenta el escaso material bibliográfico que existe en cuanto al objetivo planteado, se desarrolló una investigación en la que se cuantificó la eficiencia que alcanzó un determinado tipo y configuración de pantalla deflectora en un canal de 45° de pendiente.

Para la mejor comprensión de la tesis se ha estructurado y dividido en seis capítulos, los que se describen a continuación:

En el Capítulo I, Planteamiento del Problema y Metodología de la Investigación, se describe y plantea el problema, los objetivos y la hipótesis de investigación, para el presente informe.

En el Capítulo II, Marco teórico conceptual, se hace una revisión de los principales conceptos de la hidráulica general, y los tipos de flujo, estado de flujo, regímenes de flujo, canales abiertos y sus propiedades, geometría y elementos geométricos de una canal, distribución de velocidades en una sección de canal, energía del flujo en canales abiertos, rugosidad hidráulica en canales de fuerte pendiente, análisis del flujo uniforme, análisis del flujo variado (no uniforme) y fenómenos hidráulicos desarrollados en el flujo supercrítico y el Análisis dimensional de canales con elementos rugosos, describe las variables; geométricas (ancho del canal, factor de forma del canal, altura del elemento rugoso, espesor del elemento

rugoso, ancho del elemento rugoso, espaciamiento longitudinal del elemento rugoso, espaciamiento transversal del elemento rugoso y factor de forma de los elementos rugosos), características del flujo (velocidad media del flujo, radio hidráulico del canal y esfuerzo cortante en el contorno del canal y de los elementos rugosos) y características del fluido (densidad del fluido, viscosidad dinámica del fluido y peso específico del fluido), que interactúan para dar la relación matemática entre en el coeficiente de Chézy en función de la rugosidad relativa.

En el Capítulo III, Diseño de rápidas, se centra en los criterios y consideraciones hidráulicas para el diseño de rápidas en general y de rápidas con pantallas deflectoras.

En el Capítulo IV, simulación en modelos numéricos y ensayo en un modelo físico, se presenta los detalles del desarrollo numérico realizado por el software Hcanales v3.0 para la estructura de ingreso a la rápida y el software Iber 2.4.2 para la rápida de 10.00 de longitud con pendiente de 100% (con pantallas deflectoras y sin pantallas deflectoras), de tal modo que se pueda seleccionar la configuración de pantallas deflectoras con mayor estabilidad y eficiencia en la disipación de energía específica.

En el Capítulo V, Análisis, Comparación y Discusión de Resultados, en este acápite se compara y discute los resultados obtenidos en la modelación numérica realizado con el software Iber 2.4.2 con las mediciones obtenidas en el modelo físico construido.

Las conclusiones al cual se llegó contribuirán a que se entienda mejor el comportamiento del flujo de agua en rápidas de 100% de pendiente y a su vez se siga investigando aún más en este tipo de disipadores de

energía, debido a que, según el estudio experimental realizado en la presente investigación, este tipo de estructuras presentan ventajas y desventajas frente a las estructuras hidráulicas de disipación de energía clásico y pueden tener además otro tipo de aplicaciones.

SIMBOLOGÍA.

Q, caudal.

q, Caudal por unidad de ancho, caudal unitario.

R_*, Número de Reynolds.

V, Velocidad media.

V_M, Velocidad máxima.

V_w, Velocidad media del agua clara.

$(V_M)_a$, Velocidad máxima del flujo en la sección donde empieza la autoaeración.

v, velocidad real.

υ, viscosidad cinemática del agua.

F_r, Número de Froude.

$F_{r_{cr}}$, Valor crítico del Número de Froude.

D, Profundidad hidráulica.

A, Área de la sección trasversal del agua perpendicular a la dirección del flujo en el canal o área mojada.

B, Ancho de la superficie libre.

b, ancho del canal.

L, longitud característica.

g, aceleración de la gravedad.

d, profundidad de flujo de la sección.

y, profundidad de flujo vertical.

y_n, profundidad normal del flujo.

y_{90}, profundidad ficticia del agua con 90% de aire.

y_a, profundidad de agua en la sección donde empieza la autoaeración.

θ, ángulo de la pendiente longitudinal del canal.

T, ancho superficial o espejo de agua.

P, perímetro mojado.

R, radio hidráulico.

α, coeficiente de energía o coeficiente de Coriolis.

α^*, Coeficiente de correlación de la altura de velocidad según la ecuación (59).

dA, diferencial de área.

ΔA, incremento de área por v.

δ, espesor de la capa limite.
magnitud empírica.

e, rugosidad absoluta.

k, tamaño de la rugosidad.

k_c, rugosidad critica.

k_r, altura del elemento rugoso para flujo sumergido.
(Para flujo no sumergido se considera igual a la profundidad de flujo).

κ, magnitud empírica.

h_f, pérdida de energía o disipación.

L, longitud del tramo.

n, coeficiente de Manning.

C, coeficiente de Chezy.

$\frac{C}{\sqrt{g}}$, coeficiente de Resistencia

c, concentración local de aire.

f_{D-W}, Coeficiente de Darcy-Weisbach.

λ, espaciamiento longitudinal de los elementos rugosos.
Coeficiente de Darcy-Weisbach.

λ_a, coeficiente de perdida de energía para el caso de flujo de agua sin aire.

λ_c, coeficiente de perdida de energía para el caso de flujo con aeración total.

j, ancho de la ranura de los elementos rugosos.

χ, rugosidad del canal en función del factor de forma.

η, densidad de los elementos rugosos.

$A_1, B_1, A_2\, y\, B_2$ son parámetros que dependen del tipo de flujo y arreglo de los elementos rugosos.

ρ_L, densidad del aire.

ρ_w, densidad del agua.

L, longitud analizada de la rápida.

$\boldsymbol{V}$, número de Vendernikov.

M, número de Montouri.

I, pendiente.

s_f, pendiente de la gradiente de energía.

b_r, espesor del elemento rugoso.

a_r, ancho del elemento rugoso.

x, espaciamiento longitudinal del elemento rugoso.

z, espaciamiento transversal del elemento rugoso.

ψ, factor de forma de los elementos rugosos.

S45_P00_0.20b, Canal con 100% de pendiente y pantallas deflectoras con un ángulo de 00° respecto al eje longitudinal de la rápida.

S45_P30_0.20b, Canal con 100% de pendiente y pantallas deflectoras con un ángulo de 30° respecto al eje longitudinal de la rápida.

S45_P45_0.20b, Canal con 100% de pendiente y pantallas deflectoras con un ángulo de 45° respecto al eje longitudinal de la rápida.

S45_P60_0.20b, Canal con 100% de pendiente y pantallas deflectoras con un ángulo de 60° respecto al eje longitudinal de la rápida.

S45_P75_0.20b, Canal con 100% de pendiente y pantallas deflectoras con un ángulo de 75° respecto al eje longitudinal de la rápida.

S.L 0+0.000, Sección Longitudinal en el eje central (ver Figura 56)

S.L 0+0.060, Sección Longitudinal en el eje derecho (ver Figura 56)

S.L 0-0.060, Sección Longitudinal en el eje izquierdo (ver Figura 56)

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Modelo hidráulico del Canal de Pantallas Deflectoras (CPD) y de la transición con el Canal de Rápida con Tapa y Columpio (CRTC).....10
Figura 2. Bases rugosas conformadas por las pantallas deflectoras, de izquierda a derecha los ángulos de deflexión con respecto a la dirección longitudinal del canal son: 75°, 60°, 45°, 30° y 15°.....11
Figura 3. Flujo Permanente y No Permanente.....13
Figura 4. Flujo No Permanente y Uniforme.....13
Figura 5. Perfiles de Flujo Variado.....14
Figura 6. Relación profundidad-velocidad para cuatro regímenes de flujo en canales abiertos.....19
Figura 7. Canal natural, Rio Santa-Mancos.....20
Figura 8. Canal artificial no revestido (Canal Cumbemayo, Cajamarca-Perú).21
Figura 9. Elementos Geométricos de canales.....24
Figura 10. Curvas comunes de igual velocidad en diferentes secciones de canal 24
Figura 11. Energía de un flujo gradualmente variado en canales abiertos...27
Figura 12. Energía específica para un canal prismático.....30
Figura 13. Curva de energía específica.....30
Figura 14. Desarrollo de la capa limite en un canal abierto con una condición de entrada ideal.....34
Figura 15. Naturaleza de la rugosidad superficial. (a)Superficie lisa, (b) Superficie Ondulada, (c) Superficie rugosa.....35
Figura 16. Superficie hidráulicamente lisa. Donde e, es la rugosidad absoluta. 35
Figura 17. Esquemas que muestran el concepto de los tres tipos de flujo sobre superficie rugosa.....42
Figura 18. Disposición de los elementos rugosos en el canal.....46
Figura 19. Configuración de elementos rugosos por F.I Pikalov.....48
Figura 20. Formación del flujo uniforme en un canal largo.....50
Figura 21. Representación esquemática del flujo en una rápida con admisión de aire.....52
Figura 22. Relación entre los coeficientes de resistencia para flujo totalmente autoareado (λc) y para flujo sin aire al inicio de la autoaeración (λa) como función de la concentración media de aire c. 54
Figura 23. Distribución de la concentración de aire normal en el fondo del canal para flujo uniforme.....55
Figura 24. Esquema de definiciones para calcular por intervalos la superficie libre del agua.....56
Figura 25. Longitud La hasta el inicio de la autoaeración en una rápida con un Angulo de inclinación de fondo de θ, y rugosidad de fondo k, con un perfil en la sección de entrada libre de presión.....57
Figura 26. a) Distribución de la concentración de aire (los valores entre paréntesis corresponden a $\delta cos\theta$ y k); b) profundidad local de agua clara yw como función de la concentración local media de aire c para flujo no uniforme autoareado, en una rápida con pendiente $\theta = 45°$. 58
Figura 27. Coeficiente de correlación $\alpha*$ según las ecuaciones (114) como función de la concentración media de aire c.....58
Figura 28. Relación entre el Número de Vedernikov y el Número de Montouri.60
Figura 29. Criterio de inestabilidad, por el factor de forma y la línea de pendiente de energía.....61
Figura 30. Característica de las ondas de Froude.....63
Figura 31. Rápida con elementos rugosos (pantallas deflectoras).....68
Figura 32. Diseño optimizado del Canal de pantallas deflectoras (vista en planta).....70
Figura 33. Diseño optimizado del Canal de pantallas deflectoras (vista en perfil longitudinal).....70

Figura 34. Diseño optimizado del Canal de pantallas deflectoras, (vista en perfil transversal).....71
Figura 35. Diseño optimizado del Canal de pantallas deflectoras.....71
Figura 36. Sección típica de los canales de 100% de pendiente con un caudal de 25.00 l/s. (unidades: cm).....73
Figura 37. Tirante critico de los canales de 100% de pendiente con un caudal de 25.00 l/s. (unidades: cm).....74
Figura 38. Vista en planta del canal de transición aguas arriba del canal de 100% de pendiente (rápida).....74
Figura 39. Vista en perfil (corte A-A) del canal de transición aguas arriba del canal de 100% de pendiente (rápida). (unidades: cm).....75
Figura 40. Tirantes en el canal de transición, corte A-A. (unidades: cm)..76
Figura 41. Cálculo de los tirantes en las secciones 0; 1 y 2 con el software Hcanales V 3.0.....77
Figura 42. Curva de remanso entre las secciones 2 y 3 del canal de transición. 78
Figura 43. Dimensiones en planta del canal de transición aguas arriba del canal de 100% de pendiente (rápida). (unidades: cm).....78
Figura 44. Dimensiones en perfil del canal de transición aguas arriba del canal de 100% de pendiente (rápida). (unidades: cm).....79
Figura 45. Cálculo del tirante normal y velocidad máxima para el canal de 100% de pendiente sin elementos rugosos.....80
Figura 46. Curva de remanso en el canal de 100% de pendiente sin elementos rugosos.....81
Figura 47. Tirante normal en el canal de entrega de s=0.005m/m.....81
Figura 48. Resalto hidráulico en el canal de entrega.....82
Figura 49. Sección típica de los canales de 100% de pendiente con un caudal de 25 l/s, vista planta en la gráfico superior y vista perfil en el gráfico inferior (unidades: cm).....83
Figura 50. Vista isométrica de las coordenadas globales para la estructura hidráulica.....84
Figura 51. Vista en planta de las coordenadas globales para la estructura hidráulica.....85
Figura 52. Vista perfil de las coordenadas globales para la estructura hidráulica.....86
Figura 53. Vista isometrica de las progresivas en la estructura hidraulica de estudio.....87
Figura 54. Vista en planta de las progresivas en la estructura hidraulica de estudio.....88
Figura 55. Secciones longitudinales a lo largo de la rápida, sección central:0+0.000m; sección izquierda: 0-0.060m; sección derecha: 0+0.060m..88
Figura 56. Denotación de las secciones longitudinales y transversales de la rápida.....89
Figura 57. Perfil de la solera a lo largo del eje de la rápida del S45_P00_0.20b_0+0.000.....91
Figura 58. Cota topográfica de la solera en el paso 0 (t=0s) del S45_P00_0.20b_0+0.000.....92
Figura 59. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P00_0.20b_0+0.000.....93
Figura 60. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P00_0.20b_0+0.000. 93
Figura 61. Perfil de la energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P00_0.20b_0+0.000.....94
Figura 62. Energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del S45_P00_0.20b_0+0.000.....95
Figura 63. Cota topográfica de la solera en el paso 0 (t=0s) del S45_P30_0.20b_0+0.000.....96
Figura 64. Perfil de la energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P30_0.20b_0+0.000.....97
Figura 65. Perfil del Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P30_0.20b_0+0.000.....98
Figura 66. Perfil de la energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P30_0.20b_0+0.000.....99

Figura 67. Energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal del S45_P30_0.20b_0+0.000.....99
Figura 69. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P30_0.20b_0+0.060.....101
Figura 70. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P30_0.20b_0+0.060.....101
Figura 71. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P30_0.20b_0+0.060.....102
Figura 73. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P30_0.20b_0-0.060.....103
Figura 74. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P30_0.20b_0-0.060.....104
Figura 75. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P30_0.20b_0-0.060.....105
Figura 76. Cota topográfica de la solera en el paso 0 (t=0s) del S45_P45_0.20b_0+0.000.....106
Figura 77. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P45_0.20b_0+0.000.....107
Figura 78. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P45_0.20b_0+0.000.....108
Figura 79. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P45_0.20b_0+0.000.....109
Figura 80. Energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del S45_P45_0.20b_0+0.000.....109
Figura 82. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P45_0.20b_0+0.060.....111
Figura 83. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P45_0.20b_0+0.060.....111
Figura 84. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P45_0.20b_0+0.060.....112
Figura 86. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P45_0.20b_0-0.060.....113
Figura 87. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P45_0.20b_0-0.060.....114
Figura 88. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P45_0.20b_0-0.060.....115
Figura 89. Cota topográfica de la solera en el paso 0 (t=0s) del S45_P60_0.20b_0+0.000.....116
Figura 90. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P60_0.20b_0+0.000.....117
Figura 91. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P60_0.20b_0+0.000.....118
Figura 92. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P60_0.20b_0+0.000.....119
Figura 93. Energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del S45_P60_0.20b_0+0.000.....119
Figura 95. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P60_0.20b_0+0.060.....121
Figura 96. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P60_0.20b_0+0.060.....121
Figura 97. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P60_0.20b_0+0.060.....122
Figura 99. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P60_0.20b_0-0.060.....123
Figura 100. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P60_0.20b_0-0.060.....124
Figura 101. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P60_0.20b_0-0.060.....125
Figura 102. Cota topográfica de la solera en el paso (t=0s) del S45_P75_0.20b_0+0.000.....126
Figura 103. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P75_0.20b_0+0.000.....127

Figura 104. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P75_0.20b_0+0.000. 128
Figura 105. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P75_0.20b_0+0.000.....129
Figura 106. Energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del S45_P75_0.20b_0+0.000.....129
Figura 108. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P75_0.20b_0+0.060.....131
Figura 109. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P75_0.20b_0+0.060. 131
Figura 110. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P75_0.20b_0+0.060.....132
Figura 112. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P75_0.20b_0-0.060.....133
Figura 113. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P75_0.20b_0-0.060.....134
Figura 114. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P75_0.20b_0-0.060.....135
Figura 115. Distribución del Tirante en el S45_P00_0.20b.....136
Figura 116. Distribución de velocidades en el S45_P00_0.20b.....137
Figura 117. Distribución de la energía específica en el S45_P00_0.20b....137
Figura 118. Distribución de la energía en el S45_P00_0.20b.....138
Figura 119. Distribución del Tirante en el S45_P30_0.20b.....139
Figura 120. Distribución de velocidades en el S45_P30_0.20b.....139
Figura 121. Distribución de la energía específica en el S45_P30_0.20b....140
Figura 122. Distribución de la energía en el S45_P30_0.20b.....140
Figura 123. Distribución del Tirante en el S45_P45_0.20b.....141
Figura 124. Distribución de velocidades en el S45_P45_0.20b.....142
Figura 125. Distribución de la energía específica en el S45_P45_0.20b....142
Figura 126. Distribución de la energía en el S45_P45_0.20b.....143
Figura 127. Distribución del Tirante en el S45_P60_0.20b.....144
Figura 128. Distribución de velocidades en el S45_P60_0.20b.....144
Figura 129. Distribución de la energía específica en el S45_P60_0.20b....145
Figura 130. Distribución de la energía en el S45_P60_0.20b.....145
Figura 131. Distribución del Tirante en el S45_P75_0.20b.....146
Figura 132. Distribución de velocidades en el S45_P75_0.20b.....147
Figura 133. Distribución de la energía específica en el S45_P75_0.20b....147
Figura 134. Distribución de la energía en el S45_P75_0.20b.....148
Figura 135. Energía específica del flujo de los diferentes canales.....151
Figura 136. Eficiencia en la disipacion de energía específica de los diferentes canales.....151
Figura 137. Relación Lineal entre el coeficiente de Chézy y el Radio hidráulico y el factor de forma.....152
Figura 138. Relación Logarítmica entre el factor de forma y el ángulo de deflexión de las pantallas.....153
Figura 139. Vista aguas arriba y aguas debajo del canal de 10.00m de longitud, pendidente de 100%, ancho de 0.20m.....155
Figura 140. Vertedero triangular de pared delgad con $\theta = 90°$, con un coeficiente de descarga $Cd = 1.4$, valido para cargas mayores a 0.14m. 156
Figura 141. Eclimetro modelo Berger para la medida de la pendiente del canal. 157
Figura 142. Nivel de burbuja, regla y cemento-pegamento.....157
Figura 143. Ensamblaje de la regla numerada y el nivel de burbuja con cemento-pegamento.....158
Figura 144. Marcas en las superficies de la base y pared del canal, a cada 0.10m a lo largo del canal desde la progresiva 0+0.00 a 10+0.00m.....158
Figura 145. Moldes de yeso para la fabricación de las pantallas deflectoras de concreto simple.....159
Figura 146. Prefabricación de las pantallas deflectoras (vaceado del concreto preparado en los moldes de yeso-figura izquierda y desencofrado de las pantallas deflectoras-figura derecho).....159
Figura 147. Pantallas deflectoras prefabricadas colocadas en la superficie de la base del canal.....160

Figura 148. Uso del epóxico (Sika dur 32gel) para el pegado resistente entre la base del canal y las pantallas deflectoras.....160
Figura 149. Estructura hidráulica (vertedero, canal de transición) al canal de 10.00m de longitud y pendiente de 100%.....161
Figura 150. Canal de 10.00 m de longitud, con pendiente de 100%. A la izquierda el canal de sin pantallas y a la derecha el canal con pantallas deflectora. 162
Figura 151. Medición de caudal por el método de vertedero.....163
Figura 152. Medición de los tirantes del flujo.....165
Figura 153. Medicion de los tirantes del flujo.....166
Figura 154. Medicion de la pendiente del canal en intervalos de 1.00 m a lo largo del eje longitudinal del canal, con un eclimetro.....167
Figura 155. Detalles de la colocacion y medidas de las pantallas deflectoras a lo largo de la base del canal de 100% de pendiente.....168
Figura 156. Medicion de la temperatura del agua al incio y antes de terminar el ensayo.....169
Figura 157. Recorrido de flujo de agua en el canal con pantallas deflectoras en el modelo físico.....173
Figura 158. Recorrido de flujo de agua en el canal con pantallas deflectoras en el modelo numérico.....173
Figura 159. Tirantes medidos en el modelo físico y calculados en el modelo numérico (Iber) en el canal de tipo S45_P00_0.20b (canal sin pantallas deflectoras).....174
Figura 160. Velocidades calculadas en el modelo físico y numérico (Iber) en el canal de tipo S45_P00_0.20b (canal sin pantallas deflectoras).....175
Figura 161. Número de Froude en el modelo físico y numérico (Iber) en el canal de tipo S45_P00_0.20b (canal sin pantallas deflectoras).....176
Figura 162. Tirantes medidos en el modelo físico y calculados en el modelo numérico (Iber) en el canal de tipo S45_P45_0.20b (canal con pantallas deflectoras).....177
Figura 163. Velocidad calculada en el modelo físico y numérico (Iber) en el canal de tipo S45_P45_0.20b (canal con pantallas deflectoras).....178
Figura 164. Número de Froude en el modelo físico y numérico (Iber) en el canal de tipo S45_P45_0.20b (canal con pantallas deflectoras).....179
Figura 165. Energía Específica: Donde E.E (2) es la energía específica del flujo sin la presencia de pantallas deflectoras y la EE (3) es la energía específica del flujo con pantallas deflectoras.....180
Figura 166. Zona de aceptación y rechazo de la hipótesis Nula. Dónde: $-Z_{\alpha/2}$= -1.96 y $Z_{\alpha/2}$= 1.96, para un α=0.05 y α=0.025. Prueba de hipótesis con contraste bilateral.....182
Figura 167. Diagrama del cálculo de la energía específica y calculo la eficiencia con el uso de pantallas deflectoras (Ver Figura 168).....183
Figura 168. Energía Específica del flujo de agua a lo largo del canal de concreto de 100% de pendiente y pantallas deflectoras de 45° (S45_P45_0.20b). 184
Figura 169. Distribución de la Energía Específica en el canal S45_P00_0.20b 186
Figura 170. Distribución de la Energía Específica en el canal S45_P45_0.20b 186
Figura 171. Energía específica máxima y mínima con un intervalo de confianza de 95.00% del flujo de agua en el canal con pantallas deflectoras y canal sin pantallas deflectoras (Ver también Figura 165).....192
Figura 172. Tirante máxima y mínima con un intervalo de confianza de 95.00% del flujo de agua en el canal con pantallas deflectoras y canal sin pantallas deflectoras (Ver también Figura 159 y Figura 162).....194
Figura 173. Velocidad máxima y mínima con un intervalo de confianza de 95.00% del flujo de agua en el canal con pantallas deflectoras y canal sin pantallas deflectoras (Ver también Figura 160 y Figura 163).....195
Figura 174. Número de Froude máxima y mínima con un intervalo de confianza de 95.00% del flujo de agua en el canal con pantallas deflectoras y canal sin pantallas deflectoras (Ver también Figura 161 y Figura 164).....195
Figura 175. Ondas estacionarias en el canal con pantallas deflectoras....196
Figura 176. Tirante del flujo en el canal sin pantallas deflectoras.....197

Figura 177. Aireación del flujo de agua a lo largo del canal con pantallas deflectoras.....198
Figura 178. Presencia de burbujas de aire a lo largo del canal con pantallas deflectoras.....200

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1:Coeficientes A_1 y B_1 para el cálculo de la resistencia en base a la rugosidad relativa para la ecuación (87) y (88).....45
Tabla 2: Coeficientes "m" y "n" para el cálculo de la resistencia en base a la rugosidad relativa para la ecuación (91).....46
Tabla 3: Velocidad máxima de erosión.....69
Tabla 4: Datos Generales del Canal de Concreto de 100% de Pendiente.....90
Tabla 5: Análisis estadístico descriptivo de la energía específica y estado de flujo de los canales.....149
Tabla 6: Estimación del coeficiente de Coriolis.....154
Tabla 7: Método de análisis de los parámetros.....164
Tabla 8:Confiabilidad de los tirantes.....171
Tabla 9: Validez de los tirantes.....172
Tabla 10: Pruebas de normalidad.....185
Tabla 11: Características descriptivas estadísticas de la energía específica. 187
Tabla 12: Prueba de hipótesis de la diferencia significativa de la energía específica.....188
Tabla 13: Prueba de hipótesis: $H1: \mu 1 - \mu 2 > 0$ 189
Tabla 14: Pruebas de hipótesis para determinar los máximos y mínimos valores de la energía específica.....193
Tabla 15: Distribución de la concentración media de aire.....199

LISTA DE ANEXOS.

Anexo 1: Planos del modelo hidráulico.....209
Anexo 2: Gráfico del modelo numérico.....218
Anexo 3: Registro de datos y análisis estadístico del tirante del flujo..250

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

1.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA.

El problema del control de la velocidad de las corrientes de agua está presente en muchos proyectos de obras hidráulicas, en especial los canales, teniendo en cuenta que en los canales cercanos al 100% de pendiente es frecuente tener pérdidas de agua en su trayectoria o punto de entrega y velocidades mayores a las recomendadas, los cuales se han observado en algunas obras hidráulicas de canales en pendientes de la región.

La disipación de la energía cinética del agua en los cauces naturales o artificiales(canales) de gran pendiente a fin de que estos conductos no presenten erosión, socavación (lateral y de fondo), cavitación, pérdidas de agua, es uno de los mayores retos de la ingeniería hidráulica que ha afrontado desde que el hombre hace uso del recurso hídrico en territorios de relieve variable, como es el caso de las zonas alto andinas del Perú.

Para disipar la energía en una conducción por gravedad (canal) se han planteado dos tipos de estructuras hidráulicas según su ubicación.

A) Estructura Hidráulica para disipar la energía al finalizar la rápida:

Las principales investigaciones que se pueden mencionar son las desarrolladas por el USBR (United States Bureau Reclamation, 1978), su manual para diseño de pequeñas presas y su manual para diseño de pequeños canales, entre

los principales tipos de estructuras investigadas por el USBR tenemos:

- Los saltos lisos y estriados.
- Disipadores con pilares deflectores.
- Tanque amortiguador Tipo I.
- Tanque amortiguador Tipo II.
- Tanque amortiguador Tipo III.
- Caídas en Tubo.
- Disipador de Rejillas.

B) Estructura Hidráulica para disipar la energía a lo largo de la rápida.

Las investigaciones de modelos de disipación de energía en rápidas han sido desarrolladas en diversas universidades e institutos, ya sea de forma secuencial o de forma paralela, podemos nombrar los siguientes modelos de estructuras:

- Rápidas escalonadas.
- Rápidas escalonadas con azudes.
- ***Rápidas con pantallas deflectoras.***
- Rápidas con tapa y Columpio.
- Disipadores por rugosidad (piedra pegada al concreto u otros elementos pre-fabricados).

La presente investigación se enfocará en el estudio de la disipación de las energías cinéticas del agua usando rápidas con pantallas deflectoras como solución frente a la erosión que puede ocasionar el desprendimiento y transporte de partículas del material que forma el canal [concreto] apoyado por la velocidad del agua.

1.2. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.

El control de la velocidad de las corrientes de agua mediante la disipación de energía y la pérdida de agua en la trayectoria o puntos de entrega en canales de gran pendiente es un problema frecuente en las obras

hidráulicas de canales en las regiones alto andinas del Perú, como es el caso de la Región Ancash, donde el relieve del suelo por donde pasan los canales, posee pendientes de hasta 45°(100%), empleando pozas disipadoras para contrarrestar esos inconvenientes, dichas pozas disipadoras resultan ser en algunos casos poco efectivas técnicamente.

Los efectos de los fenómenos hidráulicos acompañados con corrientes con velocidades mayores a los recomendados pueden ser destructivos, debido a la erosión fluvial es un proceso por el cual los canales [de concreto] en donde se destacan la pendiente y la velocidad del agua, presentan socavación lateral y de fondo de su estructura, siendo un gran problema en la ingeniería hidráulica la destrucción progresiva de los canales de concreto por socavación lateral y de fondo ocasionados por la velocidad del agua.

Debido a que la presente investigación pretende determinar la eficiencia de la disipación de energía en rápidas tipo canal de concreto de 100% de pendiente, con pantallas deflectoras, se realizó una investigación experimental con un modelo a escala físico en campo, usando el concreto como material.

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.

El problema está formulado mediante el siguiente enunciado:

¿Cuál es la influencia del uso de pantallas deflectoras en la disipación de energía de las corrientes de agua en canales de concreto con 100% de pendiente?

1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.

La sierra del Perú, se caracteriza por el predominio de un paisaje montañoso, un relieve variado y laderas empinadas por los cuales se requiere construir diferentes

tipos de canales que conduzcan agua, entre ellos los canales de concreto para optimizar el transporte tanto en distancia y pérdida del agua a grandes distancias para ser aprovechadas en la agricultura, ganadería y otros usos (agua potable), los cuales a su vez debido a la topografía variada e intensas lluvias en los periodos de noviembre a abril los canales de concreto debido a la erosión fluvial hacen que sus estructuras laterales y de fondo por debajo del agua presenten socavaciones, el cual con el paso del tiempo y el poco mantenimiento que se les hace (canales de concreto) son destruidos de manera gradual.

En algunos casos es necesario canalizar las escorrentías (aguas superficiales) de las precipitaciones ya que estas al escurrir sobre el suelo o al infiltrarse pueden producir deslizamientos, avalanchas, daños en la infraestructura, sedimentación en los sistemas de drenaje, pérdidas económicas y hasta la pérdida de vidas humanas.

Para mejorar la vida útil de los canales de concreto usados en un relieve tan variado como es la sierra del Perú se debe tener en cuenta el poder erosivo de las aguas alimentadas por la pendiente del canal que generalmente depende de la pendiente del relieve y las precipitaciones, se debe reducir la velocidad (disipar la energía específica) de los flujos en canales de gran pendiente.

Teniendo en cuenta que uno de los materiales usado en la construcción de canales es el concreto y que las investigaciones realizadas con pantallas deflectoras han sido realizadas con otros materiales donde según el tesista Pachas Javier (2015) el uso de las pantallas deflectoras resulta ser más efectivo al estar distribuidos con un ángulo de 60° respecto al eje del

canal y el ángulo de deflexión de las pantallas deflectoras usadas por Mejía Fernando (2003) es de 45°, la presente investigación pretende demostrar la eficiencia de la disipación de energía en canales de concreto de 100% de pendiente empleando pantallas deflectoras como elementos rugosos.

1.5 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

1.5.1 HIPÓTESIS.

Se ha plantea la siguiente hipótesis:

a) Hipótesis nula (H_0).

   H_0=No hay una diferencia significativa en la disipación de energía en los canales de concreto de 100% de pendiente con pantallas deflectoras y sin pantallas deflectoras.

b) Hipótesis alterna (H_1).

   H_1=Existe una diferencia significativa en la disipación de energía en los canales de concreto de 100% de pendiente con pantallas deflectoras y sin pantallas deflectoras.

1.5.2 VARIABLES Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.

-Se identificó como variable independiente:

- Disipación de energía en canales de concreto de 100% de pendiente.

-Se identificó como variable dependiente:

- Energía total hidráulica.

-Condiciones:

Canal con pantallas deflectoras y sin pantallas deflectoras.
Se mantendrán constantes los siguientes valores:

- El caudal en la rápida.
- El ancho del canal.
- Pendiente de la rápida.
- Geometría de las pantallas deflectoras (largo, ancho y altura).

- El ángulo de deflexión de las pantallas deflectoras.

1.5.3 OBJETIVOS.

1.5.3.1 OBJETIVO GENERAL.

Determinar experimentalmente la diferencia significativa en la disipación de energía en los canales de concreto de 100% de pendiente con pantallas deflectoras y sin pantallas deflectoras.

1.5.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Determinar experimentalmente el grado de disipación de energía de las corrientes de agua en los canales de concreto de 100% de pendiente empleando pantallas deflectoras en un modelo físico.

- Realizar un ensayo en un modelo físico a escala de un canal de concreto de 100% de pendiente con un caudal constante máximo de 25.00 l/s para conocer el tirante y la velocidad al inicio y final del canal revestido.

- Describir la posible aparición de fenómenos hidráulicos.

1.6 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

1.6.1 PERSPECTIVA METODOLOGICA Y TIPO DE INVESTIGACIÓN.

Por la intervención del investigador, en el diseño del CPD y la manipulación de variables, comparación de los datos obtenidos y debido a que son controlados, el tipo de investigación es descriptivo con perspectiva cuantitativa.

1.6.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.

Por su metodología y los límites, la investigación es de diseño experimental, porque se simuló y optimizó el diseño con el software Iber 2.4.2, que posteriormente se tomó mediciones en un modelo físico, en el cual se determinó la influencia real de las variables en la disipación de la energía, así como también se describió

las características que presenta el flujo (aireación, cavitación, ondas).

1.6.3 LÍMITES DE LA INVESTIGACIÓN.

El estudio se limitó a la investigación de la influencia de pantallas deflectoras en un canal, en la disipación de energía cinética hidráulica con un caudal constante de 25.00 l/s contralada por un vertedero triangular en una rápida tipo canal de 100 % de pendiente de concreto y desarrollado a una altura referencia de 3,2800.00 msnm y con una ubicación UTM de N: 8’982,269.5651m, E: 207 659.2808m y Zona 18L.

1.6.4 CONTEXTO.

Debido a que la investigación es para la elaboración de una tesis para obtener el grado académico de ingeniero civil, el contexto es aplicativo como una alternativa de diseño de canales de pendiente de 100% y los usuarios en primera instancia son los miembros del jurado, posteriormente los estudiantes de ingeniería civil y los que cursan otras escuelas profesionales, los ingenieros civiles y profesionales afines.

1.6.5 UNIDAD DE ANÁLISIS: POBLACIÓN Y MUESTRA.

POBLACIÓN Y MUESTRA.

La población y muestra se encuentra conformada por los canales de concreto de 100% de pendiente con pantallas deflectoras de 45° con respecto al eje longitudinal, asentada a una altura de 2800.00 msnm.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.

ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.

La presente investigación se enfocó en el estudio comparativo de la disipación de energía a lo largo de la rápida tipo canal de concreto con pantallas deflectoras y sin pantallas deflectoras. En ese sentido, Pachas Javier (2015) señala que los estudios que anteceden la presente investigación son:

a) A mediados del siglo XX M. L. Albertson y W. W. Sayre realizaron experimentos con elementos deflectores estableciendo un parámetro "χ" dependiente de la altura de los elementos deflectores y de la relación entre el área total de estos y el área del canal.
b) En 1968 José D. Salas, en el Laboratorio Nacional de Hidráulica (Lima-Perú) midió la influencia de macro-rugosidades discretas en distintas ubicaciones, estableciendo relaciones para hallar el coeficiente de Chézy (C) en base al Número de Froude (F), Rugosidad Relativa (R/h) y la base del canal con el radio hidráulico (B/R).
c) En el año de 1978, el Ingeniero José Ramírez Giraldo, de Nacionalidad Colombiana, diseñó el denominado "Canal de Pantallas Deflectoras (CPD)", a partir de estudios sobre modelos físicos realizados en Manizales en un improvisado laboratorio de hidráulica en las instalaciones de una industria licorera.

   Los ensayos fueron realizados usando pequeñas estructuras hechas de madera usando un rango de pendientes que van del 10% al 50% y con distintos caudales, debido a las limitaciones del laboratorio no se pudieron obtener las condiciones deseadas para

realizar los modelos a una escala adecuada en la que se pudiera apreciar mejor los fenómenos hidráulicos producidos (el ángulo de deflexión con respecto al eje del canal de las pantallas deflectoras usado en la investigación fue de 45°).

d) En 1980, en la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, se realizó otra investigación en modelos físicos hidráulicos del denominado: "Canal de Rápidas con Tapa y Columpio (CRTC)" el cual representa un complemento del CPD, en esta investigación tampoco se contó con las condiciones que permitan realizar los modelos a una escala adecuada. El rango de pendientes en los que se ensayó a estructura fue de 50% al 173% (el ángulo de deflexión con respecto al eje del canal de las pantallas deflectoras usado en la investigación fue de 45°).

e) Entre los años 2001 y 2002 en la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Eduardo Brand Ruiz y Robinsón Ramírez Hernández construyeron 3 modelos del CRTC en los que se determinó la influencia de la distancia del fondo del canal, la separación de las paredes y la tapa del columpio, los ensayos se realizaron en la escala adecuada por lo que los resultados obtenidos son confiables (el ángulo de deflexión con respecto al eje del canal de las pantallas deflectoras usado en la investigación fue de 45°).

f) En el año 2002 en la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Jackelline González Blandón y Claudia Marcela González Blandón optimizaron los resultados de los 3 Modelos de CRTC obteniendo una relación más confiable de la relación entre el caudal y la geometría del canal (el ángulo de deflexión con

respecto al eje del canal de las pantallas deflectoras usado en la investigación fue de 45°).

g) En el año 2003 en la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, J. Riascos Delgado y Ana María Lucero Carvajal determinaron la transición más óptima entre un CRTC y un CPD.

   El diseño del CRTC se realizó en base a las conclusiones obtenidas de las investigaciones anteriores de este modelo, mientras el CPD se diseñó respetando las relaciones geométricas establecidas en el año 1978 ajustando únicamente la ecuación que relaciona el caudal a ancho del canal a fin de que el CRTC y el CPD cuenten con el mismo ancho.

   En esta investigación se concluyó que la mejor transición se consigue usando una tapa (el ángulo de deflexión con respecto al eje del canal de las pantallas deflectoras usado en la investigación fue de 45°).

Figura 1. Modelo hidráulico del Canal de Pantallas Deflectoras (CPD) y de la transición con el Canal de Rápida con Tapa y Columpio (CRTC).
Fuente: Mejía Fernández (2003).

h) En el año 2015 en la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Pachas Norabuena Javier Josef en su investigación concluye que "el acomodo de pantallas a 60° de deflexión con respecto al eje del canal resulto más efectivo, debido a que el flujo es más uniforme, presentando ondas estacionarias muy poco pronunciadas y por ende menores velocidades locales, este hecho también se ve respaldado por la menor aireación que presenta este acomodo de pantallas.", con lo que hace notar la necesidad de comparar la eficiencia que tienen las rápidas tipo canal en la disipación de energía hidráulica con pantallas deflectoras de 45° y 60° de deflexión con respecto al eje del canal.

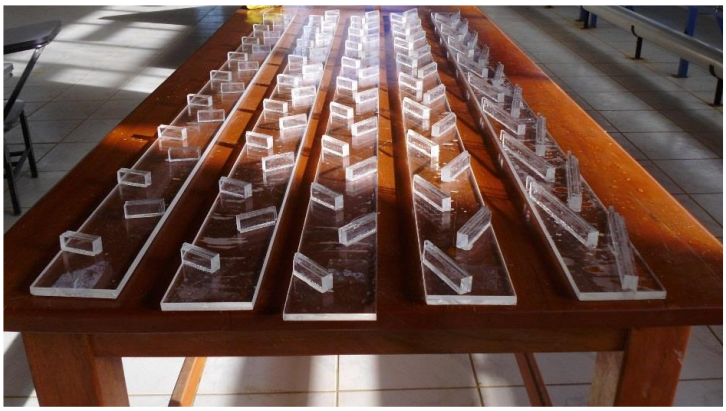


Figura 2. Bases rugosas conformadas por las pantallas deflectoras, de izquierda a derecha los ángulos de deflexión con respecto a la dirección longitudinal del canal son: 75°, 60°, 45°, 30° y 15°.
Fuente: Pachas Norabuena (2015).

2.1 TIPOS DE FLUJO.

El caudal Q, para cualquier tipo de flujo en una sección del canal se expresa por:

$$Q = VA \qquad (1)$$

Donde V es la velocidad media y A es el área de la sección transversal de flujo perpendicular a la dirección de este, debido a que la velocidad media está definida como el caudal dividido por el área de la sección transversal.

Los flujos en canales abiertos pueden clasificarse de acuerdo con el cambio en la profundidad de flujo con respecto al tiempo y al espacio.

A. FLUJO PERMANENTE Y NO PERMANENTE: El criterio usado para la clasificación es el cambio en la profundidad de flujo con respecto al tiempo.

   Según Ven Te Chow (1998, 5), el flujo en un canal abierto es permanente si la profundidad de flujo no cambia o puede suponerse constante durante el intervalo de tiempo en consideración.

   Según Chereque Moran (s.f., 2), cuando el flujo es de tipo permanente, en una sección del canal permanece constante con respecto al tiempo las características hidráulicas del flujo (caudal, velocidad media, tirante, etc.). *Ver* Figura 3.

   Los flujos permanentes o estacionarios (Machuca, 2014) son continuos, donde el caudal es constante a través del tramo de canal en consideración, de la ecuación (1) se tiene la ecuación (2):

$$Q = V_1A_1 = V_2A_2 = \ldots = V_nA_n \qquad (2)$$

   Los subíndices hacen referencia a diferentes secciones del canal en consideración.

   Para Rocha Felices (2007) el flujo no permanente o inpermanente sucede si la profundidad del flujo cambia con el tiempo, en este tipo de flujo las ecuaciones de continuidad (1) y (2) no son válidas, debido a que parte del agua sale y/o entra a lo largo del curso del flujo. Ver Figura 3.

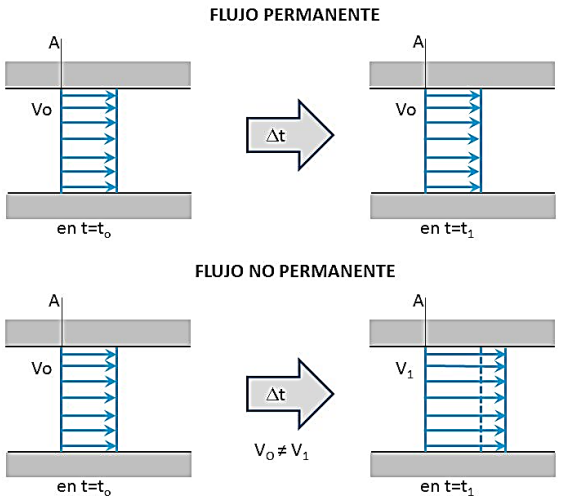


Figura 3. Flujo Permanente y No Permanente.
Fuente: Alvarado Córdova (s.f)

B. FLUJO UNIFORME Y FLUJO VARIADO: El criterio usado para la clasificación es el cambio en la profundidad de flujo con respecto al espacio longitudinal del canal. Un flujo es uniforme si la profundidad de flujo es la misma en cada sección (tomado en el espacio longitudinal) del canal. Depaz Blácido (2008, 7).

Un flujo uniforme puede ser permanente (Ver Figura 2) o no permanente (Ver Figura 3) según cambie o no cambie la profundidad con respecto al tiempo. Ven Te Chow (1998, 6).

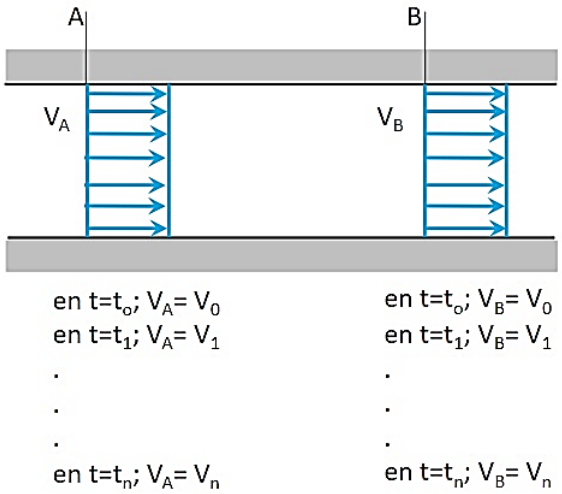


Figura 4. Flujo No Permanente y Uniforme.
Fuente: Alvarado Córdova (S.F)

Un flujo es variado cuando la profundidad de flujo cambia a lo largo del canal. Ver Figura 4.

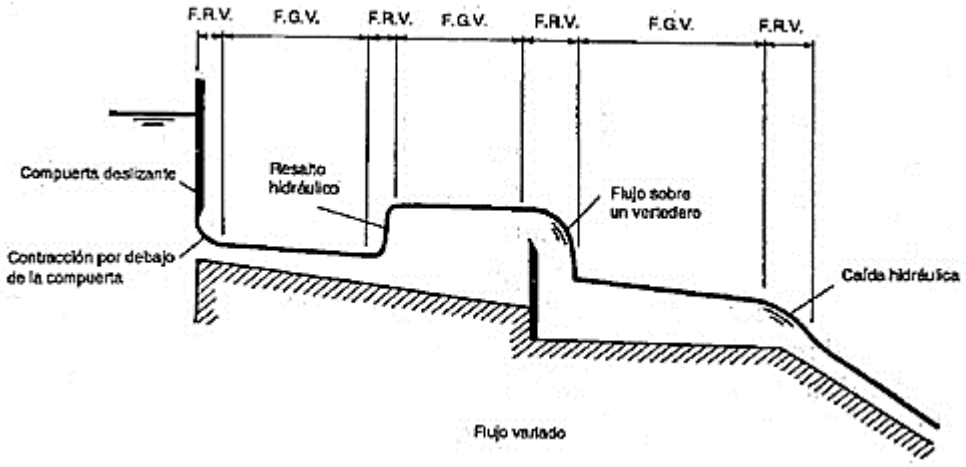


Figura 5. Perfiles de Flujo Variado.
Fuente: *Ven Te Chow (1998, 7)*

El flujo variado (no permanente) puede clasificarse a su vez en flujo rápidamente variado (F.R.V) o Flujo Gradualmente variado (F.G.V); en el primero de los casos, la profundidad del flujo cambia abruptamente en distancias comparativas cortas, de otro modo es gradualmente variado. Depaz Blácido (2008, 7)

El Flujo en canales abiertos se resume (Ven Te Chow, 1998, pág. 6) en:

A. Flujo Permanente.
    1. Flujo Uniforme.
    2. Flujo Variado.
        a. Flujo Gradualmente Variado.
        b. Flujo Rápidamente Variado.

B. Flujo No Permanente.
    1. Flujo Uniforme No Permanente (raro).
    2. Flujo Variado No Permanente.
        a. Flujo Gradualmente Variado No Permanente.
        b. Flujo Rápidamente Variado No Permanente.

2.2 ESTADO DE FLUJO.

Ven Te Chow (1998, 6) también denomina al estado de flujo como comportamiento de flujo.

El flujo en canales abiertos está básicamente gobernado por los efectos de viscosidad y gravedad en relación con las fuerzas inerciales del flujo.

Según Canizales Casillas (1988, 17) existen otros efectos como la presión (condición de Euler), velocidad del sonido dentro del fluido (condición de Mach), Tensión Superficial (condición de Weber), Compresibilidad (condición de Cauchy), periocidad (condición de Strouhal), esfuerzo cortante sobre el fondo (condición de Shields) y transporte de sedimentos (condición de Einstein) que por su tipología pueden ser despreciables en el flujo en canales abiertos.

A. EFECTOS DE VISCOSIDAD:

Estos efectos pueden ser medidos indirectamente con el Número de Reynolds, el cual es la relación de las fuerzas inerciales existentes y las fuerzas de viscosidad (Ven Te Chow, 1998), como se ve en la ecuación (3).

El Número de Reynolds es adimensional independientemente del Sistema de unidades.

$$R_* = \frac{VL}{\upsilon} \qquad (3)$$

Donde:

R_*, es el Número de Reynolds.

V, Velocidad Media.

L, Longitud característica.

υ, viscosidad cinemática del agua.

Según los valores numéricos que tome R_*, el flujo puede ser laminar, turbulento o transitorio.

El flujo en canales abiertos es laminar (las partículas de agua describen trayectorias paralelas entre sí) cuando las fuerzas viscosas predominan sobre las inerciales y el Número de Reynolds es pequeño.

El flujo es turbulento cuando las fuerzas viscosas son débiles en relación con las fuerzas inerciales y las partículas de agua se mueven en trayectorias irregulares.

Entre el flujo laminar y turbulento existe un estado mixto o transitorio.

Referencialmente para canales abiertos si el valor de R_* es menor a 500 el flujo es laminar (Naudascher, 2002, pág. 240), si el valor de R_* se encuentra entre 500 y 1000 el flujo es transitoria, y si el valor de R_* resulta ser mayor 1000 el flujo es turbulento (Chereque Moran, p. 4).El valor de R_* depende de la rugosidad, forma y velocidad de flujo del canal.

Para otro autor el flujo en transición en canales abiertos el valor de R_* puede suponerse desde 500 hasta 2000[el valor superior es arbitrario]. (Ven Te Chow, 1998, p. 10).

B. EFECTOS DE LA GRAVEDAD: Los efectos de la gravedad en el estado de flujo está representado por la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales, esta relación está representado por el Número de Froude (Ven Te Chow, 1998), el cual se expresa en (4):

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gL}} \qquad (4)$$

Donde:

F_r, Número de Froude.

V, Velocidad media.

L, Longitud característica.

g, Aceleración de la gravedad.

La Longitud característica en canales abiertos es igual a la profundidad hidráulica D, el cual este

último es la relación de del área de la sección trasversal del agua perpendicular a la dirección del flujo en el canal dividido por el ancho de la superficie libre, como se expresa en (5).

$$D = \frac{A}{T} \tag{5}$$

Al reemplazar (5) en (4) se tiene (6).

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gD}} \tag{6}$$

O también (7):

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g\frac{A}{T}}} \tag{7}$$

Si el valor de F_r es menor a la unidad, se dice que el flujo es subcrítico, en este caso las fuerzas gravitacionales predominan sobre las fuerzas inerciales, el flujo tiene velocidad baja, es tranquilo y con corriente lenta, como se expresa en (8), (9) o (10).

$$F_r < 1 \tag{8}$$

$$V < \sqrt{gD} \tag{9}$$

$$V < \sqrt{g\frac{A}{T}} \tag{10}$$

Si el valor de F_r es igual a la unidad se dice que el flujo es crítico, como se expresa en (11),(12) o (13).

$$F_r = 1 \tag{11}$$

$$V = \sqrt{gD} \tag{12}$$

$$V = \sqrt{g\frac{A}{T}} \qquad (13)$$

Si el valor de F_r es mayor a la unidad el flujo es supercrítico, en este caso las fuerzas inerciales predominan sobre las fuerzas gravitacionales, el flujo tiene velocidad alta, es ultrarrápida y torrencial, como se expresa en (14),(15) o (16).

$$F_r > 1 \qquad (14)$$

$$V > \sqrt{gD} \qquad (15)$$

$$V = \sqrt{g\frac{A}{T}} \qquad (16)$$

2.3 REGÍMENES DE FLUJO.

Para Ven Te Chow (1998,14) el efecto combinado de la viscosidad y gravedad puede producir cualquiera de los cuatro regímenes de flujo siguientes:

1. Subcrítico-laminar: F_r <1 y R_* pertenece al rango laminar.
2. Supercrítico-laminar: F_r >1 y R_* pertenece al rango laminar.
3. Supercrítico-turbulento: F_r >1 y R_* pertenece al rango turbulento.
4. Subcrítico-laminar: F_r <1 y R_* pertenece al rango turbulento.

La relación profundidad-velocidad para los cuatro regímenes de flujo en un canal abierto ancho se puede ilustrar mediante una gráfica logarítmica (Ver Figura 6).

2.4 CANALES ABIERTOS Y SUS PROPIEDADES.

Un canal abierto es un conducto en el cual el agua fluye con la superficie libre. Según su origen un canal puede ser artificial o natural.

Los canales naturales incluyen todos los cursos de agua que existen de manera natural en la Tierra, los cuales varían en tamaño desde pequeños arroyuelos en zonas montañosas, hasta quebradas, arroyos, ríos pequeños y grandes, y estuarios de mareas. Las corrientes subterráneas que transportan agua con una superficie libre también son consideradas como canales abiertos naturales (Ven Te Chow, 1998, pág. 19).

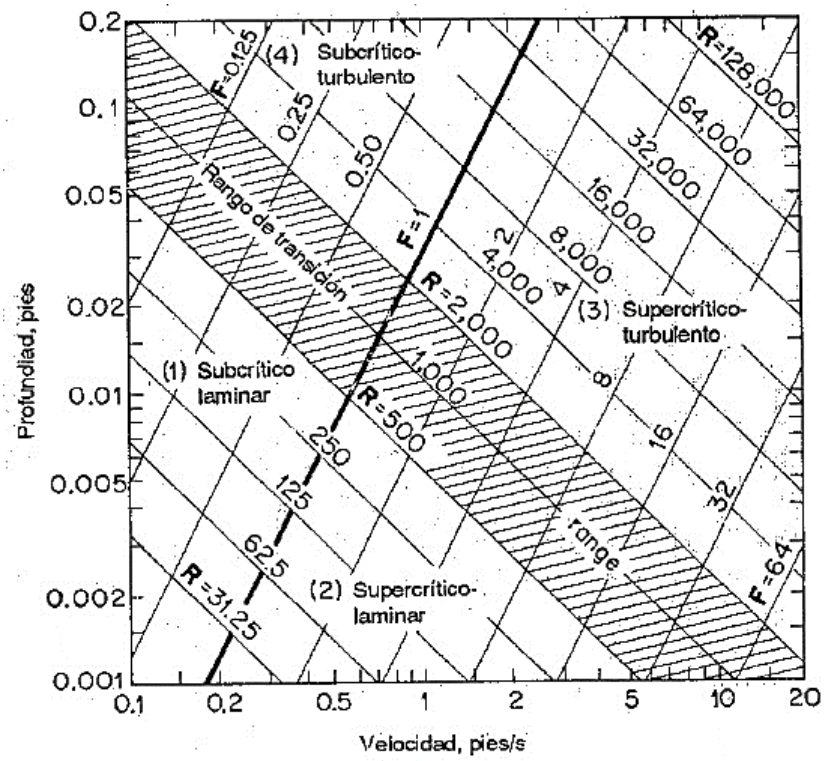


Figura 6. Relación profundidad-velocidad para cuatro regímenes de flujo en canales abiertos.

La línea gruesa F=1 y la banda sombreada para el rango transicional laminar-turbulento y supercrítico laminar se interceptan en la gráfica y dividen el área total en cuatro regiones, cada una de las cuales representa un régimen de flujo. Los dos primeros regímenes, subcrítico-laminar y supercrítico-laminar no son frecuentes en la hidráulica aplicada.

Fuente: *Ven Te Chow (1998, 14).*

El estudio de las propiedades hidráulicas de los canales naturales es muy complejo debido a su irregularidad, por lo que para hacer un estudio completo de sus propiedades se requiere recurrir a la hidrología, geomorfología, transporte de sedimentos, etc. (Ver Figura 7).

Figura 7. Canal natural, Rio Santa-Mancos.
Fuente: Leon Cashpa (2014)

Los canales artificiales son construidos por el hombre, sus propiedades hidráulicas pueden ser contralados hasta un nivel deseado debido a que son diseñados con ciertos requisitos.

Los canales artificiales debido a sus propiedades geométricas o su uso pueden ser:

- Canal artificial: Por lo general es un canal largo con pendiente suave construido sobre el suelo, que pueden ser no revestidos o revestidos (Ver Figura 8).
- Canaleta: Es un canal de madera, de metal, de concreto o mampostería a menudo soportado en o sobre la superficie del terreno para conducir el agua a través de una depresión.

- Rápida: Es un canal que tiene altas pendientes en tramos largos.
- Caída: Es similar a una rápida, pero el cambio en elevación se efectúa en una distancia corta.
- Alcantarilla: Es un canal cubierto con una longitud comparativa corta instalada para drenar agua a través de terraplenes de carretera, de vías férreas, canal a canal, etc. El flujo fluye parcialmente lleno.
- Túnel con flujo a superficie libre: Es una canal cubierta comparativamente larga, utilizado para conducir agua a través de una colina o cualquier obstrucción de terreno.

Figura 8. Canal artificial no revestido (Canal Cumbemayo, Cajamarca-Perú).
Fuente: Hidráulica Inca (2017)

2.5 GEOMETRÍA Y ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE UNA CANAL.

Nuestro interés se centrará en canales artificiales, los cuales según su sección trasversal se clasifican en canales prismáticos y no prismáticos.

Los canales primaticos tienen una sección transversal invariable y pendiente de fondo constante, de otra manera son canales no prismáticos como por ejemplo los vertederos de ancho variable y alineamiento curvo.

El termino sección de canal está referido a la sección transversal de una canal tomada en forma perpendicular la dirección del flujo y se denota con la letra "**A**".

Los elementos geométricos de una sección de canal se definen a continuación, Ver Figura 9. (Ingenieria Civil , 2012)

- Profundidad de flujo vertical(y): Es la distancia vertical, medido desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre y se denota con la letra "y".
- Profundidad de flujo de la sección o profundidad de flujo (d): Es la distancia perpendicular a la dirección de flujo, medido desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre y se denota con la letra "d".

  Cuando un canal tiene un pendiente longitudinal denotado por θ (theta) la profundidad de flujo es iguala a la profundidad de flujo de la sección dividido por $\cos(\theta)$, como se expresa en (17):

$$d = y\cos(\theta) \qquad (17)$$

  Donde:

  d, profundidad de flujo de la sección.

  y, profundidad de flujo vertical.

  θ, ángulo de la pendiente longitudinal del canal.

La ecuación (17) es solo aplicable a un flujo uniforme.

- Ancho superficial (T): También llamado espejo de agua, es la longitud de la superficie libre del flujo en la sección del canal y se denota con la letra "T".
- Área mojada (A): Es el área de la sección del canal y se denota con la letra "A".
- Perímetro mojado (P): Es la longitud del perímetro de la sección del canal que está en contacto con el flujo.
- Radio hidráulico (R): Es la relación entre el área mojado y el perímetro mojado, como se expresa en (18):

$$R = \frac{A}{P} \qquad (18)$$

- Profundidad hidráulica (D): Es la relación entre el área mojado y el ancho superficial, como se expresa en (19):

$$D = \frac{A}{T} \qquad (19)$$

- Nivel: Es la elevación o distancia vertical desde un nivel de referencia o datum hasta la superficie libre.

2.6 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN UNA SECCIÓN DE CANAL.

Debido a la presencia de la superficie libre y a la fricciona lo largo del canal, las velocidades en un canal no están uniformemente distribuidos en su sección.

Generalmente la máxima velocidad media en canales normales se encuentra a 0.05 a 0.25 de la profundidad, ubicado por debajo de la superficie libre (Ver Figura 10).

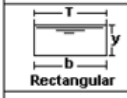
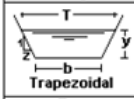
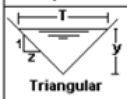
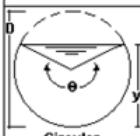
Sección	Area hidráulica A	Perímetro mojado P	Radio hidráulico R	Espejo de agua T
 Rectangular	by	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	b
 Trapezoidal	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$
 Triangular	zy^2	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$
 Circular	$\frac{(\theta-\text{sen}\theta)D^2}{8}$	$\frac{\theta D}{2}$	$(1-\frac{\text{sen}\,\theta}{\theta})\frac{D}{4}$	$(\text{sen}\frac{\theta}{2})D$ ó $2\sqrt{y(D-y)}$
Parabólica	$2/3\ Ty$	$T+\frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T+8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$

Figura 9. Elementos Geométricos de canales.
Fuente: Ingenieria Civil, Mini-Curso de Diseño de Canales con Régimen Uniforme-Parte IV: Calculo de Altura Normal(2012)

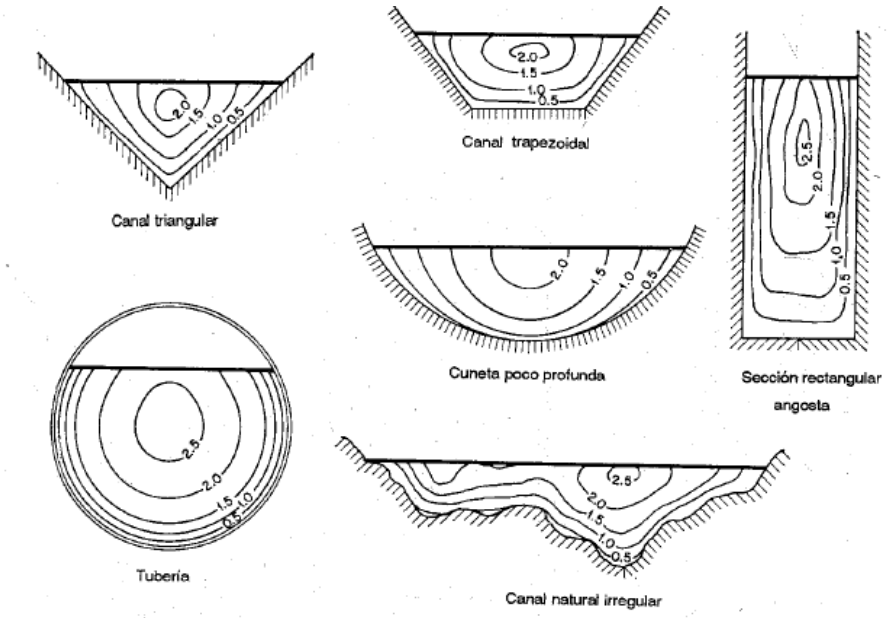


Figura 10. Curvas comunes de igual velocidad en diferentes secciones de canal.
Fuente: *Ven Te Chow (1998, 25)*

Como resultado de una distribución no uniforme de velocidades en una sección de canal, la altura de velocidad de un flujo (energía cinética del flujo) en canales abiertos es por lo general mayor que el valor

calculado de acuerdo con la expresión $V^2/2g$ [V, velocidad media] (Ven Te Chow, 1998, p. 27).

La altura de velocidad real es $\alpha V^2/2g$, donde α(alfa) es el coeficiente de energía o coeficiente de Coriolis en honor a G. Coriolis, el cual según datos experimentales varía desde 1.03 a 1.36 para canales primaticos aproximadamente rectos.

El valor de α es alto para canales pequeños y para corrientes grandes con profundidad considerable (Ven Te Chow, 1998, pág. 27).

Para canales con secciones transversales complejas el valor de α puede ser de hasta 1.6 y en aguas arriba de vertederos por la vecindad de obstrucciones se ha observado valores de α mayores a 2.

Para calcular el valor α se toma un ΔA un area elemental en el area mojado completa A, y w el peso unitario del agua; entonces el peso de agua que pasa a través de ΔA por unidad de tiempo con una velocidad v es $wv\Delta A$. La energía cinética del agua que pasa a través de ΔA por unidad de tiempo es $wv^3\Delta A/2g$. Esto es equivalente al producto del peso $wv\Delta A$ y la altura de velocidad $v^2/2g$. La energía cinética total para el área mojada completa es igual a $\Sigma wv^3\Delta A/2g$ (Ven Te Chow, 1998, pp. 28-29).

Al tomar el área completa como A, la velocidad media V, y la altura de velocidad corregida para el área completo como $\alpha V^2/2g$, la energía cinética total es $\alpha wV^3A/2g$. Al igualar esta cantidad con $\Sigma wv^3\Delta A/2g$ y al reducir se tiene la expresión (20):

$$\alpha = \frac{\int v^3 dA}{V^3 A} \approx \frac{\sum v^3 \Delta A}{V^3 A} \quad (20)$$

Donde:

v, velocidad real.

V, Velocidad media.

A, Área mojada.

dA, Diferencial de área.

ΔA, Incremento de área por v.

Algunas aproximaciones usadas para calcular el valor de α son: Para Ven Te (1998) se expresa en (21) y Para Rocha Felices (2007) se expresa en (23):

$$\alpha = 1 + 3\epsilon^2 - 2\epsilon^3 \quad (21)$$

Donde el valor de ϵ es:

$$\epsilon = \frac{V_M}{V} - 1 \quad (22)$$

Donde:

V_M, Velocidad máxima.

V, Velocidad media.

Para otros estudios realizados en ríos se llegó a aproximar α como se expone en (23):

$$\alpha = 1 + 0.056\left(\frac{V_M}{V}\right)^{4.97} \quad (23)$$

2.7 ENERGÍA DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS.

En hidráulica elemental se sabe que la energía total de cualquier línea de corriente que pasa a través de una sección de canal puede expresarse como la altura total [unidades de longitud] de agua, que es igual a la suma de la elevación por encima del nivel de referencia, la altura de presión y la altura de velocidad (Ven Te Chow, 1998, p. 39).Ver Figura 11.

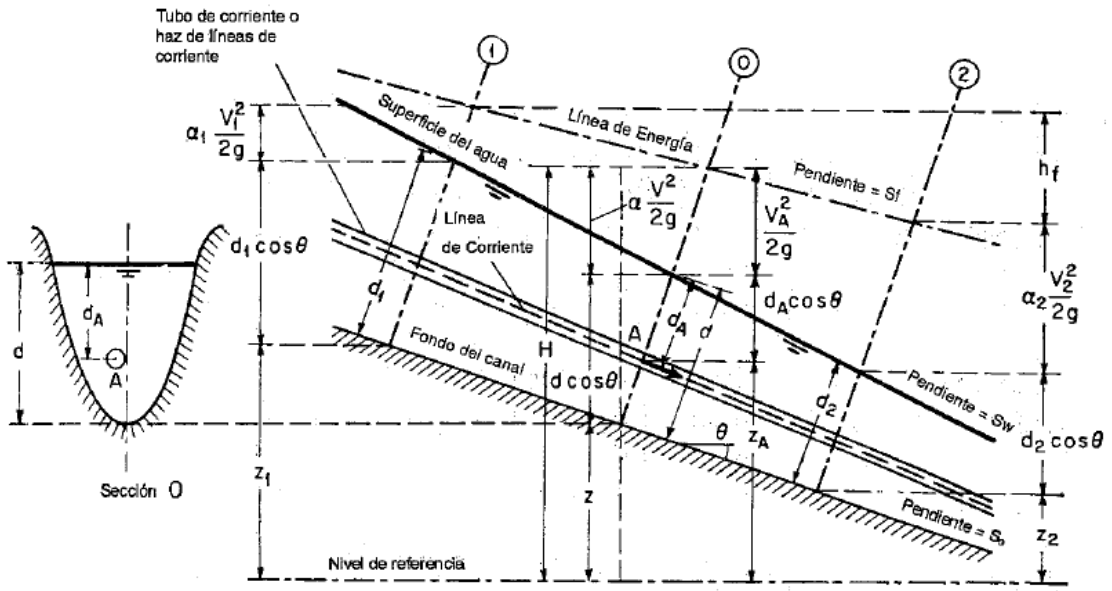


Figura 11. Energía de un flujo gradualmente variado en canales abiertos.
Fuente: *Ven Te Chow (1998, 39).*

En la Figura 11, se observa que, con respecto al plano de referencia, la altura total H de una sección 0 que contiene el punto A en una línea de corriente del flujo de un canal de pendiente puede escribirse como en (24):

$$H = z_A + d_A cos\theta + \frac{V_A^2}{2g} \qquad (24)$$

Donde:

H, altura total.

z_A, es la elevación del punto A por encima del plano de referencia(datum).

d_A, es la profundidad del punto A por debajo de la superficie del agua medido a lo largo de la sección del canal.

θ, es el ángulo de la pendiente del fondo del canal.

$\frac{V_A^2}{2g}$, es la altura de la velocidad del flujo en la línea de corriente que pasa a través de A.

Sin embargo, debido a que las líneas de corriente que pasa a través de una sección de canal tendrán una altura de velocidad diferente, debido a la distribución no

uniforme de velocidades en flujos reales la ecuación (24) es expresado como en la ecuación (25):

$$H = z_A + d_A cos\theta + \alpha \frac{V_A^2}{2g} \quad (25)$$

Con el principio de conservación de energía, a la altura de la energía total en la sección "1" localizada agua arriba debe ser igual a la altura de energía total en la sección 2 (Figura 11) localizado aguas abajo más la perdida de energía h_f entre las dos secciones es:

$$z_1 + d_1 cos\theta + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + d_2 cos\theta + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_{f_{1-2}} \quad (26)$$

$$z_1 + d_1 cos\theta + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + d_2 cos\theta + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (27)$$

Donde:

$h_f = h_{f_{1-2}}$, es la perdida de energía o disipación de energía entre las secciones 1 y 2 (Rocha Felices, 2007, p. 9).

La ecuación (26) es aplicable para flujos paralelos o gradualmente variados, cuando $h_{f_{1-2}}$=0 la ecuación es conocida como la ecuación de Bernoulli.

2.7.1 PÉRDIDA O DISIPACIÓN DE ENERGÍA.

La disipación de energía es la diferencia de energía total entre dos secciones considerados de un mismo canal y con caudal estacionario.

De la Figura 11 la disipación de energía entre la sección 1 y la sección 2, se puede determinar a partir de (25), y será denotado como $h_{f_{1-2}}$.

$$H_1 = H_2 - h_{f_{1-2}} \quad (28)$$

$$h_{f_{1-2}} = H_1 - H_2 \quad (29)$$

$$h_{f_{1-2}} = (z_1 + d_1 cos\theta + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g}) - (z_2 + d_2 cos\theta + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g}) \quad (30)$$

El porcentaje o grado de disipación energía entre las secciones 1 y la sección 2 en consideración será (Espinosa García & Mera Tobar, 2007, p. 63):

$$\Delta E = \frac{H_1 - H_2}{H_1} x100\% \quad (31)$$

O expresado de una manera más desarrollada, reemplazando (29) y (30) en (31) se tiene:

$$\Delta E = \frac{h_{f_{1-2}}}{H_1} = \frac{(z_1 + d_1 cos\theta + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g}) - (z_2 + d_2 cos\theta + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g})}{(z_1 + d_1 cos\theta + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g})} x100\% \quad (32)$$

2.7.2 ENERGÍA ESPECÍFICA.

La energía específica en una sección de canal se define como la energía de agua en cualquier sección de un canal medido con respecto al fondo de este (Ven Te Chow, 1998, pág. 41). Haciendo que el valor de z=0 de la ecuación (25), la energía específica es:

$$E = dcos\theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (33)$$

Ver Figura 12.

La ecuación (33) indica que la energía específica es igual a la suma de la profundidad del agua más la altura de velocidad.

De la ecuación (1) se tiene (34):

$$V = \frac{Q}{A} \quad (34)$$

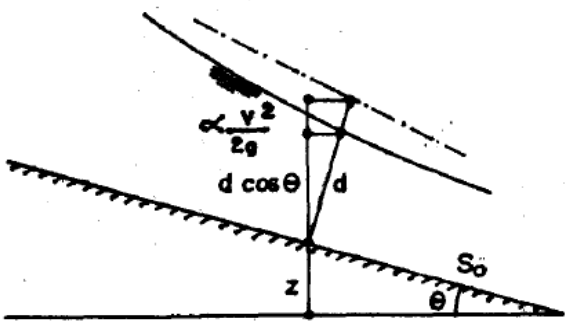


Figura 12. Energía específica para un canal prismático.
Fuente: Chereque Moran (S.F, 39)

Entonces la ecuación (33) se puede escribir como:

$$E = d\cos\theta + \alpha\frac{(\frac{Q}{A})^2}{2g} \qquad (35)$$

Para un canal de pendiente pequeña y α=1, de (34) se tiene la siguiente ecuación:

$$E = y + \frac{V^2}{2g} \qquad (36)$$

La grafica de la ecuación (36) se ve en la Figura 13.

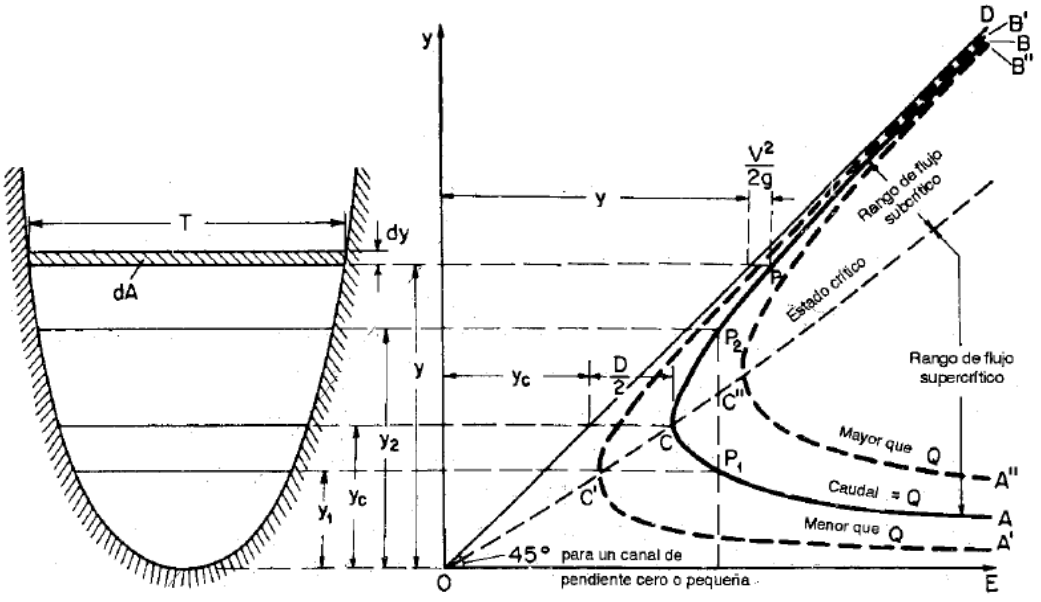


Figura 13. Curva de energía específica.
Fuente: *Ven Te Chow (1998, 42)*

De la Figura 13 se puede deducir el tirante crítico (y_c) del flujo, el cual se expresa en la ecuación (37).

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{g b^2}} \tag{37}$$

Para calcular el estado crítico de flujo la energía específica es mínima, se partida a partir de la ecuación (36).

Reemplazando la ecuación (34) en la ecuación (36),se tiene:

$$E = y + \alpha \frac{(\frac{Q}{A})^2}{2g} \tag{38}$$

$$E = y + \alpha \frac{Q^2}{2gA^2} \tag{39}$$

Al derivar (39) con respecto a y. (considerar Q constante)

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{Q^2}{gA^3}\frac{dA}{dy} \tag{40}$$

Al reemplazar (1) en (40), se tiene:

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{V^2}{gA}\frac{dA}{dy} \tag{41}$$

De la Figura 13, se nota que:

$$dA = T dy \tag{42}$$

De la ecuación (42) se tiene,

$$\frac{dA}{dy} = T \tag{43}$$

Al reemplazar (43) en (41) se obtiene,

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{V^2 T}{gA} = 1 - \frac{V^2}{g\frac{A}{T}} \tag{44}$$

Al reemplazar (19) en (44) se tiene,

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{V^2}{gD} \tag{45}$$

Para calcular el estado crítico de flujo de la energía específica se iguala la ecuación (45) a cero.

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{V^2}{gD} = 0 \tag{46}$$

De (46) se tiene:

$$\frac{V^2}{g} = D \tag{47}$$

Al dividir cada extremo de la ecuación (47) entre 2 [dos].

$$\frac{V^2}{2g} = \frac{D}{2} \tag{48}$$

La ecuación (48) indica que en el estado crítico del flujo la altura de velocidad es igual a la mitad de la profundidad hidráulica.

La ecuación (48) también se pude escribir como,

$$\frac{V}{\sqrt{gD}} = 1 \tag{49}$$

Lo cual significa que $F_r = 1$, como se indica en (12).

En el caso de que coeficiente de energía (α) no sea igual a la unidad [1], la ecuación (48) será como se indica a continuación:

$$\alpha \frac{V^2}{2g} = \frac{D}{2} \tag{50}$$

Para un canal con un ángulo de pendiente θ grande y un coeficiente de energía el criterio de flujo critico es,

$$\alpha \frac{V^2}{2g} = \frac{D\ cos\theta}{2} \tag{51}$$

De (51) el Número de Froude (F_r) puede expresarse como,

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{\frac{gD\ cos\theta}{\alpha}}} \tag{52}$$

Para determinar la energía minina en la sección de un flujo se reemplaza la ecuación (48) en la ecuación (36).

$$E_{min} = y_c + \frac{D}{2} \tag{53}$$

$$E_{min} = y_c + \frac{A/T}{2} \tag{54}$$

Para una sección rectangular del canal.

$$E_{min} = y_c + \frac{b\ y_c}{2b} \tag{55}$$

$$E_{min} = y_c + \frac{y_c}{2} \tag{56}$$

$$E_{min} = \frac{3y_c}{2} \quad (57)$$

2.7.3 ECUACIÓN DE ENERGÍA PARA NO UNIFORME CON AUTOAERACIÓN.

La energía específica E en términos de la concentración de aire desarrollado por Wood (1987), se expresa como:

$$E = y_w \cos(\theta) + \frac{\alpha^* V_n^2}{2g} \quad (58)$$

Con:

$$\alpha^* = (\frac{V_{90}}{V_w})^2 \frac{\int_0^\infty (1-c)\left(\frac{V_w}{V_{90}}\right)^3 d(\frac{y}{y_{90}})}{\int_0^\infty (1-c)(\frac{V_w}{V_{90}})\, d(\frac{y}{y_{90}})} \quad (59)$$

Donde:

α^*, Coeficiente de correlación de la altura de velocidad. α^*, se puede contar con un valor entre 1.05 y 1.06, independientemente de la concentración media de aire $\bar{c}$.

2.8 RUGOSIDAD HIDRÁULICA EN CANALES DE FUERTE PENDIENTE.

2.8.1 CAPA LÍMITE.

Cuando el agua entra a un canal, la distancia de velocidades a través de la sección de canal, debido a la presencia de la rugosidad de contorno, variará con la distancia a lo largo de la cual el agua se mueve en éste. (Ven Te Chow, 1998, pág. 189)

Si el canal es fuertemente inclinado (rápida), se puede originar una mezcla de agua y aire. Independientemente de si el canal está controlado a la entrada por medio de una estructura de cierre o por el desborde sobre un vertedero, se presentara en cualquier caso un flujo supercrítico no uniforme que en una cierta longitud se caracteriza por formar la capa limite (Naudascher, 2002, págs. 305-306).

La viscosidad del fluido es la causa para la formación de la capa limite (Naudascher, 2002, p. 305). La viscosidad impide el movimiento de las partículas de agua cercanas al contorno solido (condición de no deslizamiento), dando lugar a un cambio drástico de la velocidad dentro de una capa delgada de líquido muy cercana a la pared (capa límite).

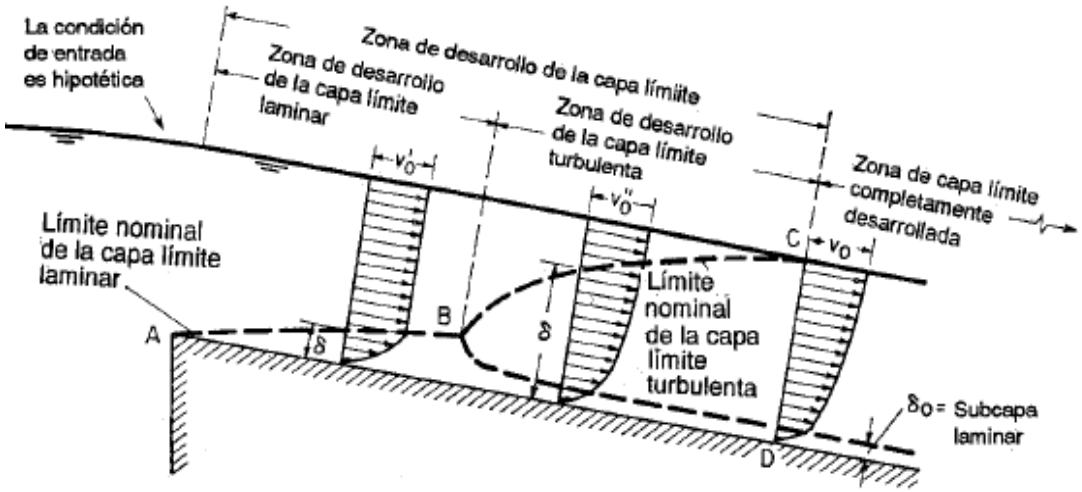


Figura 14. Desarrollo de la capa limite en un canal abierto con una condición de entrada ideal.
Fuente: *Ven Te Chow (1998, 190)*

El espesor de la capa limite δ es la distancia desde la pared hasta el punto en el cual la velocidad alcanza un valor igual al 99% de la velocidad en el flujo exterior no perturbado (en la Figura 14 el valor de δ se mide desde la superficie fija hasta alcanzar el $0.99v_o$).

En una rápida, la turbulencia aparecerá en la superficie libre de agua, cuando el borde superior de la capa limite turbulento alcance la superficie libre. Solo a partir del punto C (Ver Figura 14) el flujo es completamente turbulento.

2.8.2 RUGOSIDAD SUPERFICIAL.

La rugosidad es medida de la dimensión lineal de los elementos las irregularidades superficiales denominadas

rugosidad. El perfil de la superficie de los canales vistos a detalle presenta picos y valles (ver Figura 15).

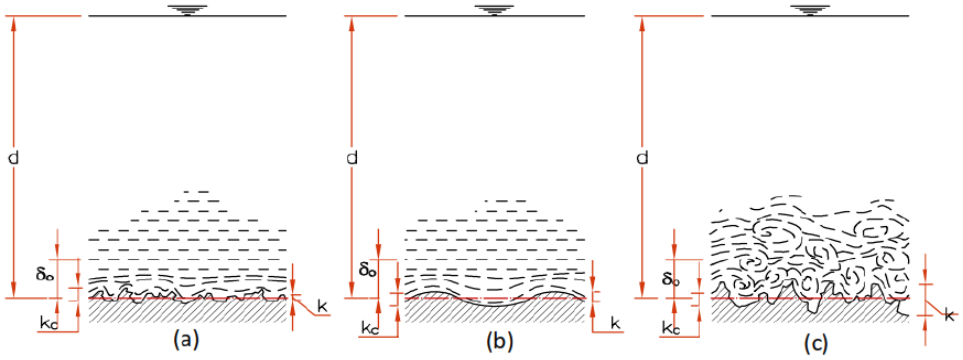


Figura 15. Naturaleza de la rugosidad superficial. (a) Superficie lisa, (b) Superficie Ondulada, (c) Superficie rugosa.
Fuente: Pachas Norabuena (2015, 11)

Para categorizar la naturaleza de las superficies de los canales en función de sus irregularidades superficiales, se determina en función de la Rugosidad Critica denotada por k_c, el cual establece lo siguiente:

- Si el valor de la rugosidad absoluta es menor que la rugosidad critica, entonces la superficie es hidráulicamente lisa (ver Figura 15 (a) y Figura 16).

$$k < k_c \qquad (60)$$

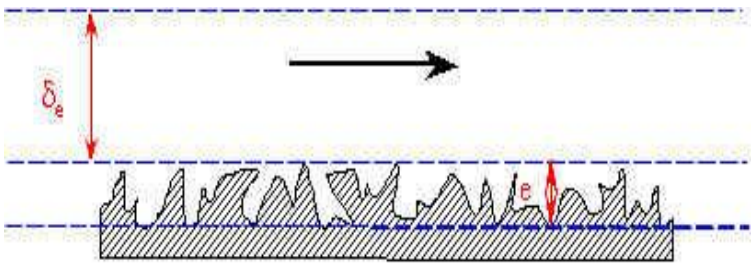


Figura 16. Superficie hidráulicamente lisa. Donde e, es la rugosidad absoluta.
Fuente: Escuela de Ingeniería de Antioquia (2009)

- Si el valor de la rugosidad absoluta es mayor que la rugosidad critica, entonces la superficie es hidráulicamente rugosa (Ver Figura 15 (c)).
  Sus efectos se extienden por fuera de la subcapa laminar y por consiguiente perturbara el flujo en el canal. La distribución de velocidades dependerá de la forma y tamaño de las proyecciones de rugosidad y no podrá formase una subcapa laminar estable.

$$k > k_c \qquad (61)$$

- Si la superficie es lisa tiene un perfil superficial curvo, entonces se denomina como rugosidad ondulada (Ver Figura 15(b)).

El valor de k_c, se puede estimar por medio de la ecuación (62):

$$k_c = \frac{5\,C\,v}{\sqrt{g}\,V} \qquad (62)$$

Donde:

k_c, rugosidad critica.

C, coeficiente de Chezy.

g, constante de la gravedad.

V, velocidad media del flujo.

v, viscosidad cinemática del agua.

2.8.3 ECUACIÓN DE RESISTENCIA AL FLUJO.

La ley general de la resistencia al flujo (Jiménez Medina, 2015), debido a la fricción es:

$$h_f = C_R \frac{L}{R}\frac{V^2}{2g} \qquad (63)$$

Donde:

h_f, Pérdida de energía o disipación en el tramo de longitud L.

L, Longitud del tramo.

R, Radio hidráulico.

V, Velocidad Media.

g, Aceleración de la gravedad.

C_R, Coeficiente de resistencia al flujo (Manning).

La ecuación (63) es el fundamento de las fórmulas de Chézy, Manning y Darcy-Weisbach para la evaluación de las pérdidas de carga (energía) que son las más empleadas para dicho fin; las dos primeras para canales y la tercera para tuberías.

Para Chézy, la ecuación para canales es (64) y tuberías es (65), respectivamente, es la siguiente:

$$h_f = \frac{1}{C^2}\frac{L}{R}V^2 \tag{64}$$

$$h_f = \frac{4}{C^2}\frac{L}{D_i}V^2 \tag{65}$$

Donde:

C, coeficiente de Chezy.

Comparando la ecuación (64) y (65) con la ecuación (63), se puede deducir el coeficiente de Chézy.

$$C = \sqrt{\frac{2g}{C_R}} \tag{66}$$

Para Manning, la ecuación para canales es (67) y tuberías es (68), respectivamente, es la siguiente:

$$h_f = n^2 \frac{L}{R^{4/3}}V^2 \tag{67}$$

$$h_f = 6.35\, n^2 \frac{L}{Di^{4/3}}V^2 \tag{68}$$

Donde:

n, Coeficiente de Manning.

Comparando la ecuación (67) y (68) con la ecuación (63), se puede deducir el Coeficiente de Manning.

$$n = \sqrt{\frac{C_R}{2}}\, R^{1/6} \tag{69}$$

Para Darcy-Weisbach, la ecuación para tuberías es (70):

$$h_f = f_{D-W}\frac{L}{Di}\frac{V^2}{2g} \tag{70}$$

y,

$$f_{D-W} = 4C_R \tag{71}$$

Donde:

f_{D-W}, Coeficiente de Darcy-Weisbach o coeficiente de fricción.

El Coeficiente de la Resistencia (C_R) al flujo es:

$$C_R = \frac{0.0625}{[\log\left(\frac{k}{14.8R} + \frac{5.74}{R_*^{0.9}}\right)]^2} \tag{72}$$

Para obtener las fórmulas generales para los Coeficientes de Chézy (C) y Coeficiente de Manning (n), se reemplaza la ecuación (72) en (66) y (69) respectivamente.

$$C = -17.718\log\left(\frac{k}{14.8R} + \frac{5.74}{R_*^{0.9}}\right) \tag{73}$$

$$n = \frac{0.05644}{\log\left(\frac{k}{14.8R} + \frac{5.74}{R_*^{0.9}}\right)} R^{1/6} \tag{74}$$

Las ecuaciones (73) y (74) son generales pues están en función del Número de Reynolds y la rugosidad, como se infiere de su origen a partir del coeficiente de la resistencia al flujo en la ecuación (63).

Los resultados del Coeficientes de Chézy (C) y Coeficiente de Manning (n), son más confiables a partir de las ecuaciones (73) y (74) respectivamente, y no es necesario conocer la categoría del flujo turbulento que está ocurriendo, Jiménez Medina (2015).

Según Ven Te Chow (1998,109), para el concreto terminado con llana de madera el coeficiente de Manning normalmente es de 0.015 (n=0.015)

Además de las fórmulas generales para determinar el Coeficientes de Chézy (C) y Coeficiente de Manning (n), existen fórmulas empíricas y experimentales, como se presenta a continuación:

- Formulas empíricas:

-Formula de Colebrook-White (Coeficiente de Chézy, C).

$$C_{C-W} = C = 18\log\left(\frac{12R}{k}\right) \quad (75)$$

-Formula de HEC-RAS (Coeficiente de Manning, n).

$$n = \frac{R^{1/6}}{\log\left(\frac{12.2R}{k}\right)} \quad (76)$$

- Formulas experimentales:

-Para calcular el Coeficiente de Chézy, (C).

$$C = \frac{V}{R^{1/2}S^{1/2}} \quad (77)$$

-Para calcular Coeficiente de Manning, (n).

$$n = \frac{R^{2/3}S^{1/2}}{V} \quad (78)$$

Según Jiménez Medina (2015), las fórmulas generales para calcular el Coeficiente de Chézy y Coeficiente de Manning son más veraces y precisas que las fórmulas empíricas y experimentales.

Se puede calcular expresar el Coeficiente de Chézy en función del coeficiente de Manning reemplazando la ecuación (78) en (77), y se tiene la siguiente ecuación:

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} \quad (79)$$

En 1925, Pavlovski presento la siguiente expresión:

$$C = \frac{R^{x}}{n} \quad (80)$$

Siendo:

$$x = 2.5\sqrt{n} - 0.13 - 0.75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0.10) \quad (81)$$

La ecuación (80) y (81) en unidades métricas, son válidas para:

$$0.1 \leq R \leq 3 \quad (82)$$

$$0.011 \leq n \leq 0.040 \quad (83)$$

Para canales anchos donde $b/d > 5$ el Coeficiente de Darcy-Weisbach se obtiene de las siguientes relaciones. Naudascher (2002, 275-276):

- Para canales hidráulicamente lisos:

$$\frac{1}{\sqrt{f_{D-W}}} \cong 2log \frac{\left(\frac{R_*}{k\, f_{D-W}}\right)}{\left[\frac{F_r}{F_{r\,cr}}\right]^{\frac{2}{3}}} - 0.23\,;\ \forall \frac{F_r}{F_{r\,cr}} > 1 \qquad (84)$$

- Para canales hidráulicamente rugosos:

$$\frac{1}{\sqrt{f_{D-W}}} \cong 2log \frac{\left(\frac{R_*}{k\, f_{D-W}}\right)}{\left[\frac{F_r}{F_{r\,cr}}\right]^{\frac{2}{3}}} - 0.82\,;\ \forall \frac{F_r}{F_{r\,cr}} > 1 \qquad (85)$$

Donde:

$F_{r\,cr}$, Valor crítico del Número de Froude.

2.8.4 ESTUDIO ACERCA DE LAS MACRORUGOSIDADES EN LOS CONDUCTOS A GRAVEDAD.

Las macrorugosidades o elementos rugosos (Ver Figura 17) participan en la perdida de energía en un flujo turbulento debido sobre todo a la formación de estelas por detrás de cada elemento de rugosidad.

Los elementos rugosos consisten en salientes de forma geométrica regular introducidos en la sección del canal, con alturas iguales o mayores a la profundidad media del flujo (flujo sumergido y no sumergido). Estos elementos producen resistencias locales que equivalen a un aumento de rugosidad y disminuyen por lo tanto la velocidad. Los elementos pueden colocarse en el fondo y/o en las paredes del canal, pero por lo general se los coloca solo en el fondo ya que muchas veces los otros producen un flujo demasiado inestable (Depaz Blácido, 2008, p. 111).

La intensidad de tales fuentes de vorticidad [provocado por los elementos rugosos] en la dirección del flujo determinan, en gran medida, el carácter de la

turbulencia y los fenómenos de disipación de energía en el flujo. Por consiguiente, el espaciamiento longitudinal λ de los elementos de rugosidad es la dimensión de rugosidad de mayor importancia del flujo en conductos rugosos. Bajo este concepto el flujo en elementos rugosos puede clasificarse en tres tipos básicos: flujo con rugosidad aislada, flujo con interferencia de remolinos y flujo cuasi liso (o flujo suavizado), Ven Te Chow (1998, 192-194).

TIPOS DE FLUJO CON SUPERFICIES RUGOSAS SEGÚN SU DISPOSICION:

Según Ven Te (1998) los tipos de flujo con superficies rugosas según su disposición son:

- FLUJO CON RUGOSIDAD AISLADA.
  Resulta cuando los elementos de rugosidad están muy apartados uno del otro de tal modo que la estela y la vorticidad de cada elemento está completamente desarrollada y disipa antes de que se alcance el siguiente elemento. La rugosidad aparente, por consiguiente, resultara de la fuerza de arrastre de los elementos de rugosidad, representada principalmente por la altura de la proyección k del elemento, en adición al arrastre por fricción sobre la superficie de la pared entre los elementos, la cual depende del espaciamiento de estos. En este tipo de flujo, la relación k/λ puede tomarse como un parámetro de correlación significativo que influye en el factor de fricción aparente en el flujo.
- FLUJO CON INTERFERENCIA DE REMOLINOS.
  Resulta cuando los elementos de rugosidad están colocados tan cerca unos de otros que las estelas y la vorticidad de cada elemento interfieren con aquellos desarrollados en el siguiente elemento,

dando como resultado una vorticidad intensa, compleja y una mezcla turbulenta. En tal flujo, la altura del elemento es poco importante, pero espaciamiento es obviamente de gran importancia.

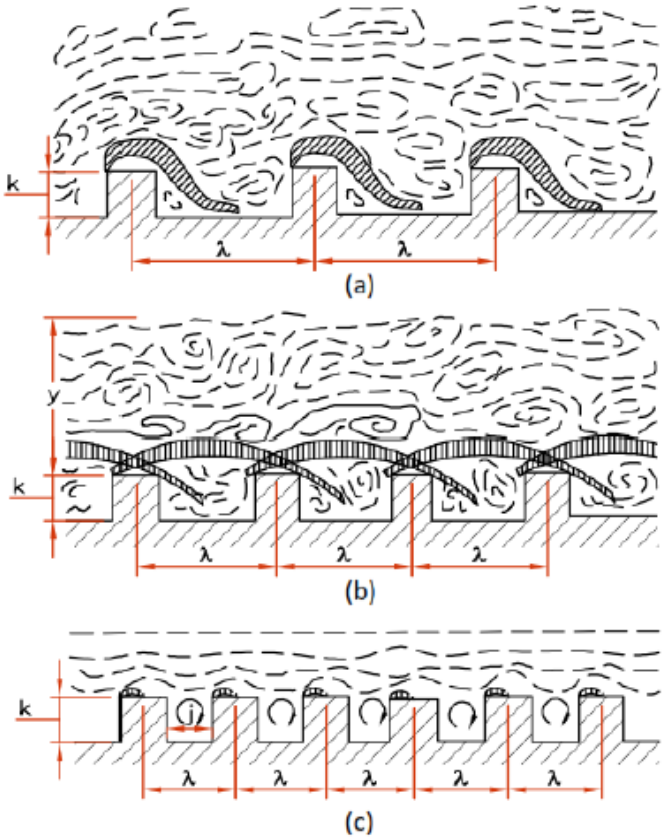


Figura 17. Esquemas que muestran el concepto de los tres tipos de flujo sobre superficie rugosa. (a) Flujo con rugosidad aislada; (b) Flujo con interferencia de remolinos; (c) Flujo cuasi liso. Fuente: *Ven Te Chow (1998, 193)*

La profundidad promedio "y" del flujo por encima de las cretas de los elementos también controlará en parte la extensión vertical de la región superficial de turbulencia anormal. En tal flujo, por consiguiente, la relación y/λ será un parámetro de correlación importante.

- FLUJO CUASI LISO.

Resulta cuando los elementos de rugosidad están tan cerca uno del otro que el flujo esencialmente se desliza por encima de la cresta de los elementos. Las ranuras entre los elementos se llenarán con agua muerta, la cual contiene remolinos estables, cuando una seudopared. Proyecciones grandes de la rugosidad no existen en esta seudopared y la superficie actúa como hidráulicamente lisa. En tal flujo, la relación k/λ (o j/λ, donde j es el ancho de la ranura) de nuevo será un parámetro significativo.

El flujo cuasi liso tiene un factor de fricción más grande que el flujo sobre una superficie realmente lisa, debido a que los remolinos en las ranuras consumen cierta cantidad de energía.

Los conceptos de flujo con rugosidad aislada, flujo con interferencia de remolinos y flujo cuasi liso (o flujo suavizado) también pueden extenderse a superficies con rugosidad variable utilizando valores promedio de las dimensiones de la rugosidad que varía o combinando los factores de fricción para cada tipo de flujo con el fin de obtener un factor de fricción global aparente para cada flujo.

La distancia entre los elementos rugosos (Depaz Blácido, 2008, p. 113) debe ser de $\lambda = 8k$, aunque otros autores recomiendan $\lambda = 7k$. Si la distancia relativa entre los elementos es muy grande el flujo entre ellos puede acelerarse y el siguiente elemento rugoso actúa como un deflector.

Se recomienda que los elementos rugosos vayan aumentando gradualmente su tamaño desde el valor cero hasta el valor de diseño, esto permitirá reducir los efectos de salpicadura del agua.

2.8.4.1 ENFOQUE DE LA MACRORUGOSIDAD SEGÚN JOSÉ D. SALAS.

El Ingeniero José D. Salas (2003) realizo estudios experimentales en un canal rectangular de 0.60 m de ancho, 0.35 m de alto y 8.00 m de largo con una pendiente constante de 0.01, realizo un análisis dimensional y aplicando el teorema de $\pi\, de\, Buckingham$ determino la influencia en el coeficiente de Chézy de las algunas relaciones adimensionales como se muestra en (86).

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = f\left(\frac{b}{R}, \frac{R}{\chi}, R_*, F_r\right) \qquad (86)$$

Donde $\frac{C}{\sqrt{g}}$, es el coeficiente de Chézy dividido entre la raíz cuadrada del valor de la aceleración de la gravedad, que en adelante se denominara Coeficiente de Resistencia, depende de:

1) La relación del ancho del canal y el Radio hidráulico $\left(\frac{b}{R}\right)$.
2) La relación del Radio Hidráulico y la macro rugosidad del canal (R/χ).
3) El Número de Froude (F_r).
4) El Número de Reynolds (R_*).

-El Coeficiente de Resistencia y la rugosidad relativa, están relacionados en forma logarítmica por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = A_1 \log\left(\frac{R}{k_r}\right) + B_1 \qquad (87)$$

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = A_2 \log\left(\frac{R}{\chi}\right) + B_2 \qquad (88)$$

$$\chi = \eta k_r \qquad (89)$$

$$\eta = \frac{\sum \text{áreas de los elementos proyectados normalmente al flujo}}{\text{Área del lecho del canal}} \qquad (90)$$

Donde:

k_r, altura del elemento rugoso para flujo sumergido.

Para flujo no sumergido se considera igual a la profundidad de flujo.

χ, Rugosidad del canal en función del factor de forma.

η, Densidad de los elementos rugosos.

Los coeficientes $A_1, B_1, A_2\, y\, B_2$ son parámetros que dependen del tipo de flujo y arreglo de los elementos rugosos y se indican en la Tabla 1.

El Coeficiente de Resistencia en Función del Froude se relación a través de la ecuación (91).

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = mF_r^n \qquad (91)$$

Los coeficientes $m\, y\, n$ son parámetros que dependen del tipo de flujo y arreglo de los elementos rugosos y se indican en la Tabla 2.

Tabla 1: Coeficientes A_1 y B_1 para el cálculo de la resistencia en base a la rugosidad relativa para la ecuación (87) y (88).

Flujo	Arreglo	A_1	B_1	η	Referencia
Sumergido	Arreglo 1	7.10	5.36	0.050	Salas
	Arreglo 2	7.10	3.95	0.083	Salas
	Arreglo 3	7.10	2.91	0.117	Salas
No Sumergido	Arreglo 1	14.90	5.66	0.005d	Salas
	Arreglo 2	14.90	4.25	0.0083d	Salas
	Arreglo 3	14.90	3.25	0.0117d	Salas
Sumergido*	16-19	7.10	0.70	0.695	Sayre-Albertson
	8-11	7.10	0.12	0.96	Sayre-Albertson

Fuente: Salas La Cruz (1968, 7)

*Para los datos de Sayres y Albertson para 8-11 y 16-19 de flujo sumergido, se obtuvo la ecuación:

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 6.78 \log\left(\frac{R}{\chi}\right) - 0.15$$

Tabla 2: Coeficientes "m" y "n" para el cálculo de la resistencia en base a la rugosidad relativa para la ecuación (91).

Flujo	Arreglo	m	n
Sumergido	Arreglo 1	15.50	1.29
	Arreglo 2	17.00	1.29
	Arreglo 3	18.95	1.29
**	Arreglo 1	11.50	1.00
	Arreglo 2	11.50	1.00
	Arreglo 3	11.50	1.00
No Sumergido	Arreglo 1	8.95	0.782
	Arreglo 2	8.95	0.782
	Arreglo 3	7.80	0.782

Fuente: Salas La Cruz (1968, 10)

**Entre flujo sumergido y no sumergido hay una zona de transición que se desvía de la ecuación (91), sin embargo, las proyecciones de las rectas paralelas de cada arreglo se cortan en puntos que se ubican en una misma línea recta definida por $\frac{C}{\sqrt{g}} = 11.50F_r$.

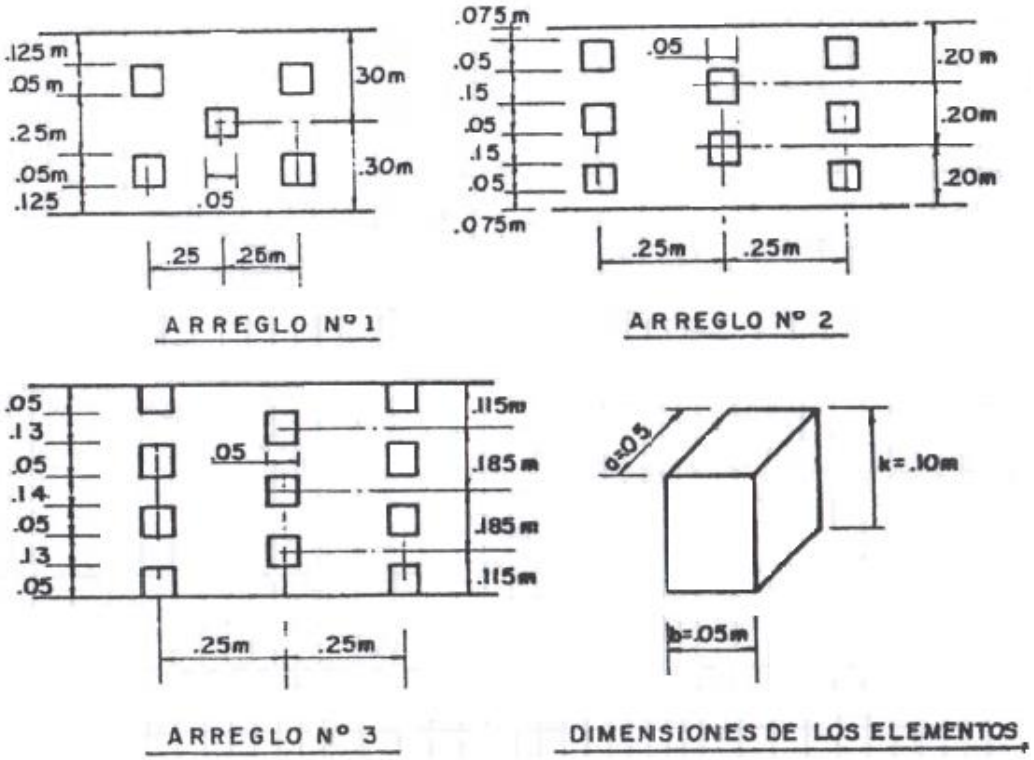


Figura 18. Disposición de los elementos rugosos en el canal.
Fuente: Salas La Cruz (1968)

Para flujos permanente y uniforme en un canal se puede relacionar el Coeficiente de Chézy y el Coeficiente de Darcy-Weisbach, despejando C_R de la ecuación (70) y al reemplazarlo en la ecuación (66), se obtiene:

$$\frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{f_{D-W}}} = \frac{C}{\sqrt{g}} \qquad (92)$$

2.8.4.2 ESTUDIOS DE RÁPIDAS CON ELEMENTOS RUGOSOS REALIZADOS POR F.I PIKALOV.

En estudios experimentales realizados por F.I Pikalov con diferentes configuraciones de elementos rugosos se obtuvo las siguientes relaciones.

- Para la configuración en zigzag de elementos rugosos (ver Figura 19):

$$\frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{f_{D-W}}} = \frac{225.8\sqrt{2}}{116.1 - \frac{6.1d'}{k_s} - \frac{1.2b}{d'}} \qquad (93)$$

- Para la configuración en V invertida de elementos rugosos (ver Figura 19):

$$\frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{f_{D-W}}} = \frac{225.8\sqrt{2}}{85.8 - \frac{3.9d'}{k_s} - \frac{0.8b}{d'}} \qquad (94)$$

- Para la configuración en Barras cortadas de elementos rugosos (ver Figura 19):

$$\frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{f_{D-W}}} = \frac{225.8\sqrt{2}}{54.2 - \frac{2.1d'}{k_s} + \frac{0.33b}{d'}} \qquad (95)$$

- Para la configuración en Dados de elementos rugosos (ver Figura 19):

$$\frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{f_{D-W}}} = \frac{225.8\sqrt{2}}{52 - \frac{5.1d'}{k_s} - \frac{0.8b}{d'}} \qquad (96)$$

- Para la configuración en Barras continuas de elementos rugosos (ver Figura 19):

$$\frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{f_{D-W}}} = \frac{225.8\sqrt{2}}{47.5 - \frac{1.2d'}{k_s} - \frac{0.1b}{d'}} \quad (97)$$

Donde:

k_s, Altura del elemento rugoso.

d', Profundidad de flujo sobre la rugosidad.

2.8.4.3 ESTUDIOS DE MACRO RUGOSIDAD DE LA UNIVERSIDAD DE DELFT-HOLANDA.

En el laboratorio Hidráulico de Delft-Holanda, en los que se experimentaron con arreglo de macro rugosidades distintas a las planteadas por Salas. La ecuación obtenida se consigna en (98):

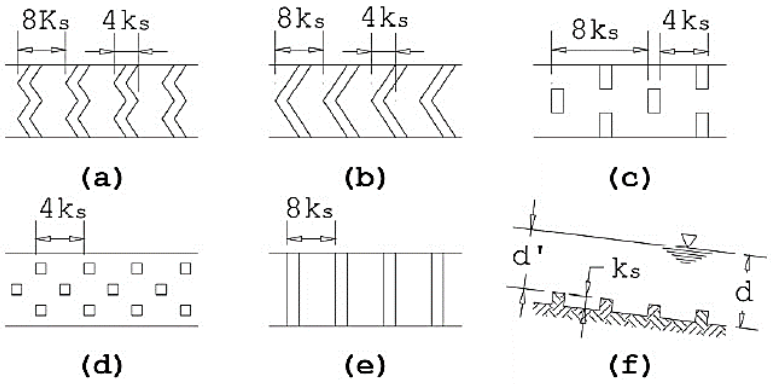


Figura 19. Configuración de elementos rugosos por F.I Pikalov. (a) Doble Zigzag, (b) V invertida, (c) Barras cortadas, (d) Dados, (e) Barras continuas y (f) Vista Perfil.
Fuente: Depaz Blácido (2008, 113)

Las ecuaciones (93), (94), (95), (96) y (97) son válidas para valores $d'/k_s > 3$, para valores menores el flujo pierde su estabilidad; además son válidas para el caudal de diseño y no para caudales menores.

$$C = 18log\frac{12k_p}{k} \quad (98)$$

Donde:

C, Coeficiente de Chézy.

k_p, Profundidad del elemento rugoso (m).

k, Tamaño de la rugosidad (m).

2.9 ANÁLISIS DEL FLUJO UNIFORME.

2.9.1 CONSIDERACIONES PREVIAS.

El flujo en un canal abierto es uniforme (Ver Figura 20) cuando las características de la corriente, como profundidad, velocidad y distribución de velocidades, no cambia a lo largo del canal en dirección del flujo. Rigurosamente esta condición solo se cumple en un canal primatico con rugosidad constante y además únicamente en zonas alejadas lo suficientemente de las estructuras de transición o de perturbaciones de la corriente.

El flujo uniforme, también se denomina flujo normal, se presenta, por ejemplo, aguas debajo de la estructura de entrada un canal luego de una cierta longitud, ya que se requiere, por una parte, que la capa limite este formado hasta cierto punto para que se establezca el perfil de velocidades que corresponde al flujo uniforme; y por otra, parte la adaptación de la profundidad de agua a la profundidad normal y_n, del flujo uniforme, si las condiciones de control en la sección de entrada producen una profundidad $y \neq y_n$, como se puede ver en el caso representado en la Figura 20c.

Estas consideraciones son válidas también cerca del final de un canal, de una pila de puente o de un umbral de fondo. En estos casos también se presentan profundidades de agua, por lo general, diferentes de y_n; el flujo uniforme se alcanzará apenas a una cierta distancia del sitio de perturbación. Un ejemplo de lo anterior se tiene en la Figura 20a.

El flujo uniforme o flujo normal en el sentido riguroso de la definición, no se presenta en la naturaleza, ya que cualquier discontinuidad o falta de uniformidad en la rugosidad del canal, la forma de la sección trasversal o la alineación del canal, así como cualquier no

pertenencia (cambios en el caudal, Q), origina alteraciones de flujo uniforme. Sin embrago, es común considerar el efecto de tales inevitables desviaciones de la uniformidad y de la pertenencia del flujo en forma global, dentro del Coeficiente de Darcy-Weisbach o coeficiente de fricción f_{D-W}.

Esta aproximación es admisible en la mayoría de los casos prácticos, si se es consciente de que f_{D-W} debe tratarse como variable, dependiente de las mismas desviaciones o discrepancias mencionadas, (Naudascher, 2002).

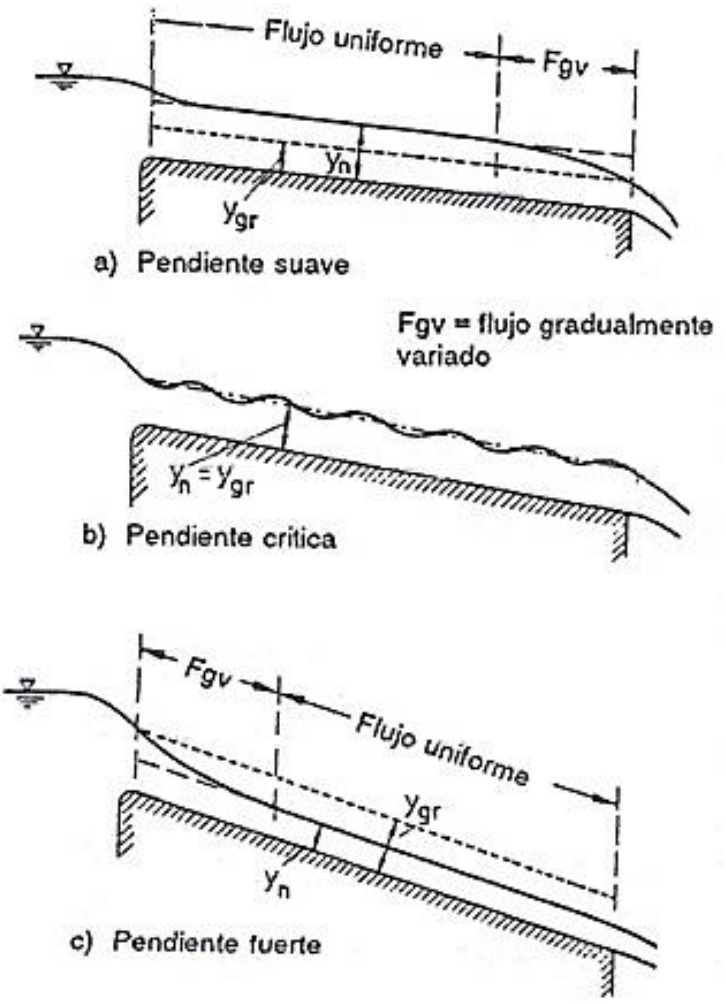


Figura 20. Formación del flujo uniforme en un canal largo.

Donde: $y_{gr} = y_c$ (a) $y_n > y_c$ (b) $y_n = y_c$ (c) $y_n < y_c$

Fuente: Naudascher (2002, 239)

2.9.2 FLUJO CON ADMISIÓN DE AIRE EN CANALES.

2.9.2.1 GENERALIDADES.

En el caso de flujo en canales de pendiente extremadamente fuerte, como por ejemplo en el caso de rápidas, o sobre el perfil de vertedores de desborde (vertedero de excedencias), el flujo puede alcanzar con suma rapidez velocidades tan grandes que se produce una mezcla de aire en la masa de agua, antes de que se formen ondas de Froude, (Naudascher, 2002).

Lo que dificulta el cálculo de este tipo de flujo es, sobre todo, la formación de la capa límite entre las secciones "O" y "C" (Ver Figura 21), y el hecho de que aguas abajo del punto C la superficie libre del agua esta tan fuertemente ondulada por efecto de la turbulencia que permite la admisión de aire en el agua y la formación de una mezcla agua-aire cuyas características de flujo se diferencian de manera notable de aquellas sin introducción de aire. Por tanto, el cálculo de este tipo de flujo no puede realizarse sin considerar la formación de la capa limite y la auto aeración.

2.9.2.2 LA ECUACIÓN DEL CAUDAL.

La mezcla agua-aire originado por la autoaeración en una rápida está constituida por una masa liquida con burbujas de aire en la parte más profunda y, en la parte superior, por aire con gotas de agua.

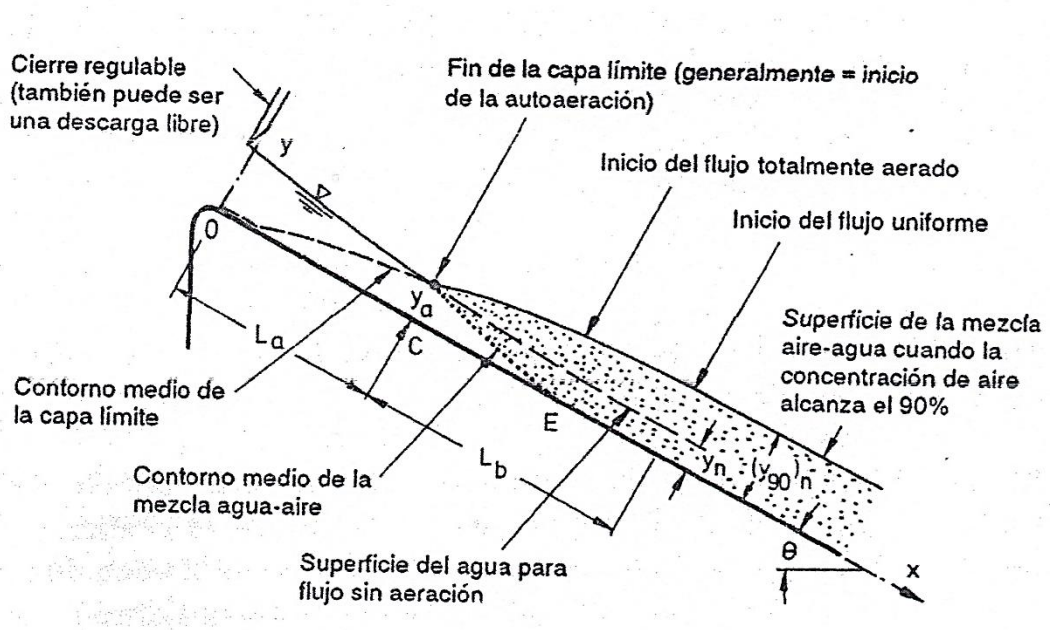


Figura 21. Representación esquemática del flujo en una rápida con admisión de aire.
Donde: L_a, es la longitud requerida para el inicio de la autoaeración; L_b, Longitud del flujo con concentración variable de aire; y_a, es la profundidad del agua en la sección de inicia de la aeración; y_{90}, es la profundidad ficticia del agua con 90% de aire.

Fuente: Naudascher (2002, 277)

Debido a esto, para la definición de la profundidad de esta mezcla agua-aire se requiere, básicamente, introducir dos magnitudes: la distancia perpendicular al fondo del canal ; y_{90} , donde la concentración de aire c es igual a 90%; y la denominada profundidad de agua clara y_w perpendicular al fondo, que multiplicado por la velocidad media de agua clara V_w proporciona el caudal unitario q por unidad de ancho, Ver la ecuación (100).

$$y_w = \int_0^\infty (1 - c)dy \tag{99}$$

$$q = y_w V_w \tag{100}$$

Si se integra la ecuación (99) sólo hasta y_{90} , y se define $\bar{c}$ como la concentración media de aire en la profundidad, se obtiene la relación siguiente:

$$y_w = (1 - \bar{c}\,)\, y_{90} \qquad (101)$$

Debido a que la relación entre la densidad del aire ρ_L y la densidad del agua ρ_w es alrededor de 1/700 y a que la velocidad de ascenso de las burbujas de aire con respecto a V_w es insignificante, se puede suponer que la distribución de la velocidad local V_w del agua es más o menos independiente de la concentración media del aire $\bar{c}$. Wood derivó a partir de diferentes mediciones, la siguiente ley de distribución de velocidades para el flujo uniforme, (Naudascher, 2002, pág. 278):

$$\frac{V_w}{V_{90}} = (\frac{y}{y_{90}})^{0.158} \qquad (102)$$

Donde V_{90} representa la velocidad de la corriente a una distancia y_{90} desde el fondo del canal.

Con respecto a la resistencia al flujo en el fondo, el comportamiento de la mezcla es diferente pues depende de $\bar{c}$. En la Figura 22 se muestra el coeficiente de resistencia al flujo uniforme con autoaeración λ_c, para el caso de flujo uniforme considerar $c = \bar{c}$.

Según los datos experimentales de Straub, Anderson (1960), es igual a:

$$\lambda = 8g\ sen\theta\ \frac{{y_{wn}}^3}{q^2} \qquad (103)$$

Dónde: En la ecuación (103)

λ, Coeficiente de Darcy-Weisbach.

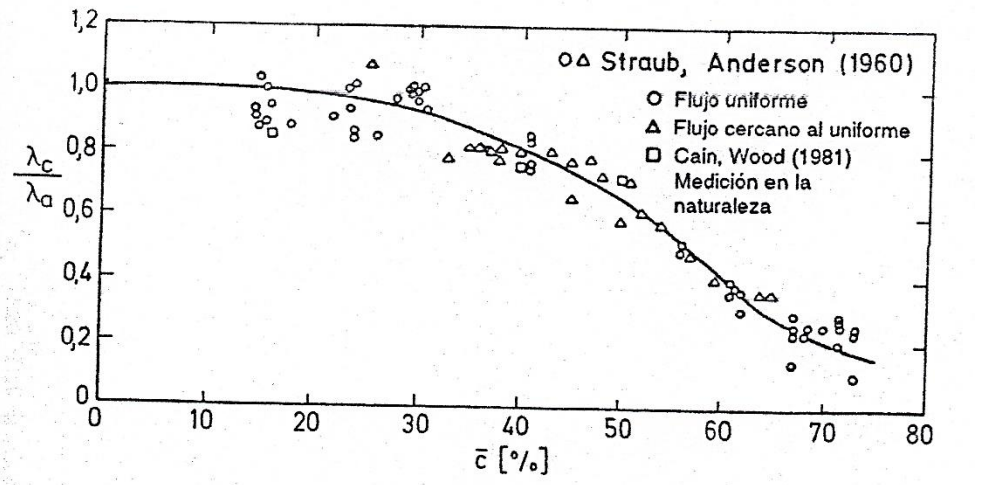


Figura 22. Relación entre los coeficientes de resistencia para flujo totalmente autoareado (λ_c) y para flujo sin aire al inicio de la autoaeración (λ_a) como función de la concentración media de aire $\bar{c}$.
Fuente: Naudascher (2002, 279)

2.9.2.3 LA DISTRIBUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE AIRE.

Los estudios en el teórico y medición de datos han llevado a la expresión (104) para determinar la concentración de aire a lo largo de la profundidad para la zona del flujo uniforme, donde además se graficado la distribución de "c" normal en el fondo del canal (Ver Figura 23).

$$c = \frac{\kappa}{\kappa + e^{-\delta cos\theta (y/y_{90})^2}} \qquad (104)$$

Donde:

κ y δ son magnitudes empíricas que dependen del ángulo de inclinación θ de la rápida, se representa en la Figura 23.

2.10 ANÁLISIS DEL FLUJO VARIADO (NO UNIFORME).

El cálculo de flujo en canales se realiza con la ecuación de Gauckler-Manning-Strickler.

$$Q = VA = \mathrm{k}R^{1/3}I^{1/2}A \qquad (105)$$

O

$$Q = VA = \frac{1}{n}R^{1/3}I^{1/2}A \qquad (106)$$

Donde:
I, Pendiente.
n, Coeficiente de Manning.

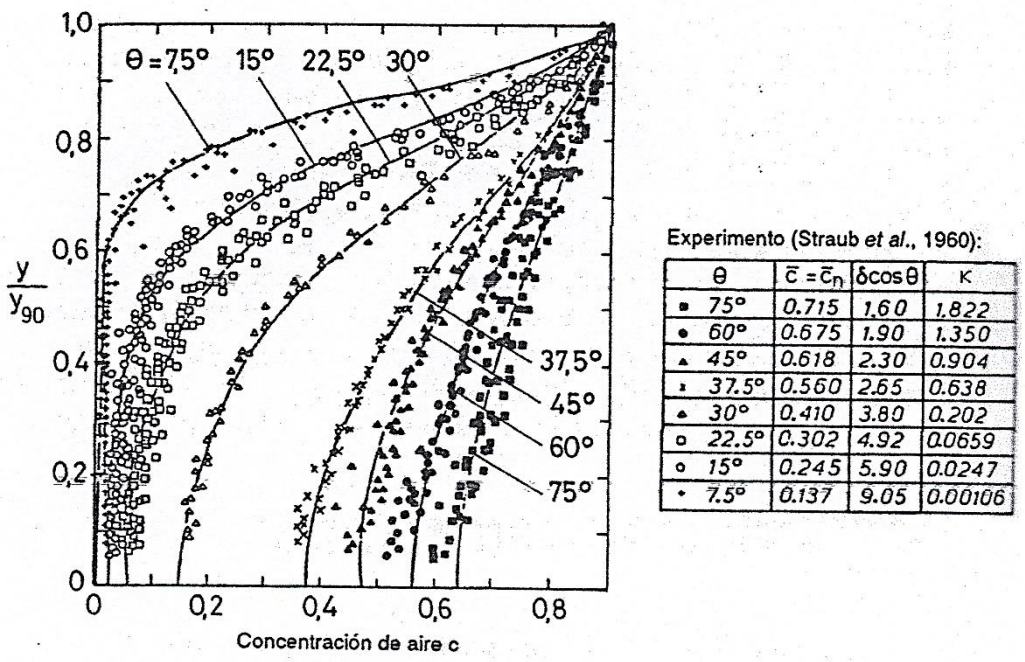


Figura 23. Distribución de la concentración de aire normal en el fondo del canal para flujo uniforme, autoareado en función del ángulo de inclinación θ de la rápida. Grafica de la ecuación *(104)*.
Fuente: Naudascher (2002, 280)

La ecuación (105) se utiliza como base para deducir las ecuaciones fundamentales del flujo gradualmente variado, y se tiene en cuenta, además; a siguiente hipótesis:

Los cambios en la profundidad de agua "y" y la velocidad media del flujo "V" son tan graduales al largo del canal, que en el cálculo de la pendiente de la línea de energía I_e se puede utilizar una fórmula del caudal (por ejemplo, la fórmula de Manning).

La aproximación es tanto mejor cuando más graduado se la variación de "y" y "V", y cuando menor sea la longitud del intervalo Δx seleccionado a lo largo del canal. La fórmula matemática de esta hipótesis se expresa con la ayuda de la ecuación (105), de la siguiente forma:

$$Q \cong A_m V_m = A_m \mathrm{k} R_m^{2/3} I_e^{2/3} \qquad (107)$$

O

$$Q \cong A_m V_m = A_m \frac{1}{n} R_m^{2/3} I_e^{2/3} \qquad (108)$$

Donde:

$$A_m = A_{y_m}$$
$$R_m = R_{y_m}$$

Y,

$$y_m = (y_1 + y_2)/2 \qquad (109)$$

Para Δx suficientemente pequeño. Ver Figura 24.

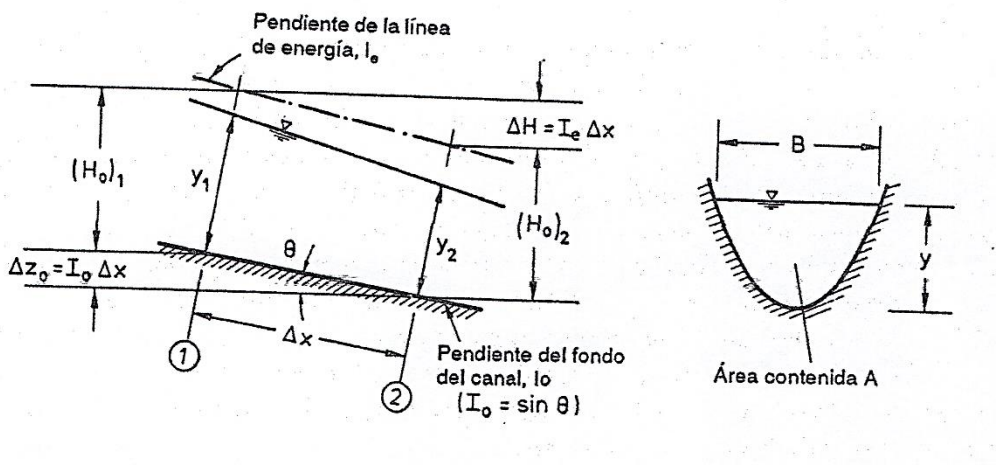


Figura 24. Esquema de definiciones para calcular por intervalos la superficie libre del agua.
Fuente: Naudascher (2002, 284)

2.10.1 FLUJO CON ADMISIÓN DE AIRE EN CANALES.

Según el análisis de regresión hecho por Wood (1986), los resultados de Keller, Rastogi (1977), se presentan en la Figura 25, se pueden representar con una aproximación de $\pm 3.00\%$, mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{L_a}{k} = 13.6\,(sen\theta)^{0.0796} \left(\frac{q}{\sqrt{g(sen\theta)k^3}}\right)^{0.713} \qquad (110)$$

También para la velocidad máxima $(V_M)_a$ y la profundidad de agua "y_a", en la sección donde empieza la autoaeración, se obtiene. Naudascher (2002, 307).

$$\frac{(V_M)_a}{\sqrt{2gk}} = 3.69\,(sen\theta)^{0.54} \left(\frac{q}{\sqrt{g(sen\theta)k^3}}\right)^{0.357} \qquad (111)$$

$$\frac{y_a}{k} = 0.223\ (sen\theta)^{-0.04}\left(\frac{q}{\sqrt{g(sen\theta)k^3}}\right)^{0.0.643} \qquad (112)$$

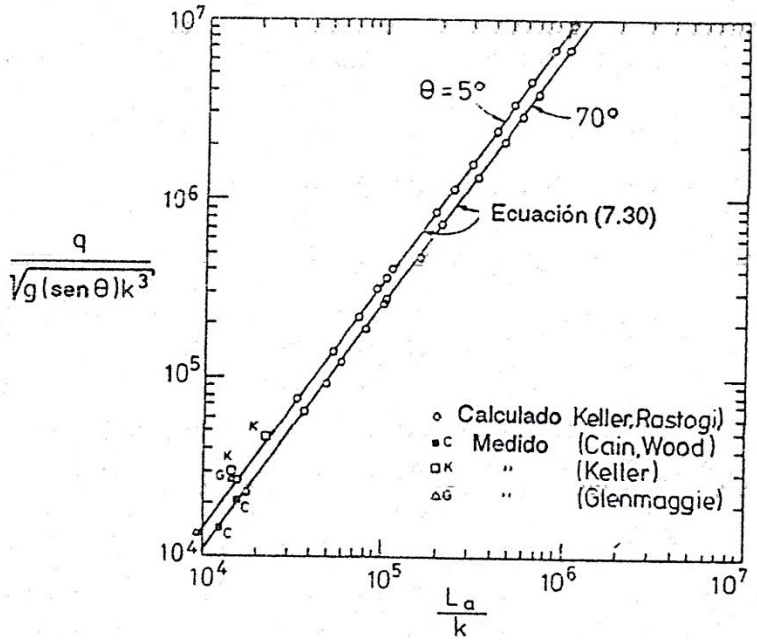


Figura 25. Longitud L_a hasta el inicio de la autoaeración en una rápida con un Angulo de inclinación de fondo de θ, y rugosidad de fondo k, con un perfil en la sección de entrada libre de presión.
Fuente: Naudascher (2002, 307)

2.10.2 ECUACIÓN DE LA ENERGÍA.

La altura de la energía específica H, deben definirse para las distribuciones de concentración de aire son definidos para las distribuciones de concentración de aire mostrados en la Figura 26 y en cada caso particular es válida la expresión:

$$H = y_w \cos\theta + \alpha^* \frac{V^2}{2g} \qquad (113)$$

$$\alpha^* = \left(\frac{v_{90}}{V_w}\right)^2 \frac{\int_0^\infty (1-c)\left(\frac{v_w}{v_{90}}\right)^3 d\left(\frac{y}{y_{90}}\right)}{\int_0^\infty (1-c)\left(\frac{v_w}{v_{90}}\right) d\left(\frac{y}{y_{90}}\right)} \qquad (114)$$

El valor de α^* puede ser tomado entre los valores 1.05 y 1.06, independientemente de la concentración media de aire $\bar{c}$ (ver Figura 27).

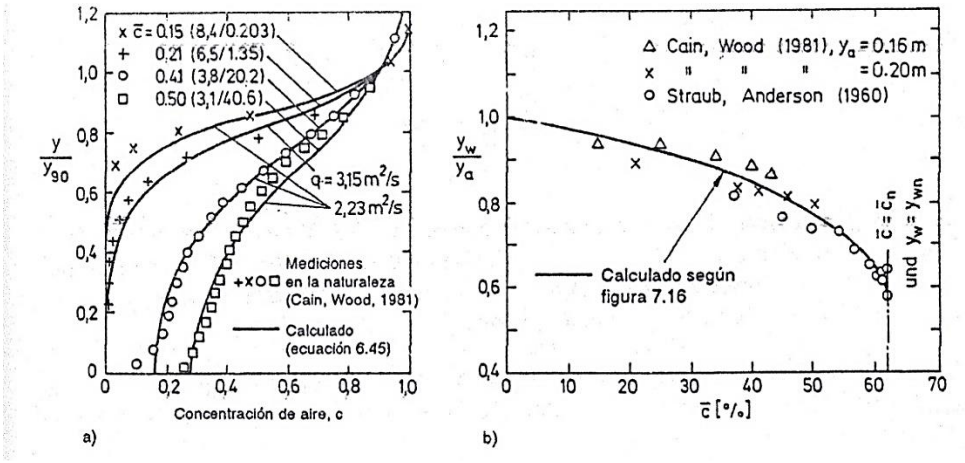


Figura 26. a) Distribución de la concentración de aire (los valores entre paréntesis corresponden a $\delta cos\theta$ y k); b) profundidad local de agua clara y_w como función de la concentración local media de aire $\bar{c}$ para flujo no uniforme autoareado, en una rápida con pendiente $\theta = 45°$.
Fuente: Naudascher (2002, 309)

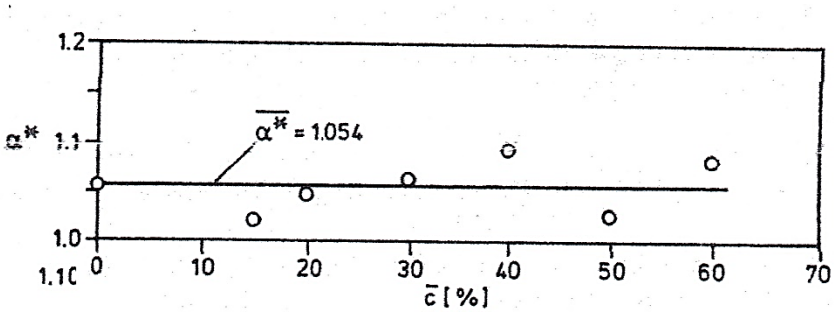


Figura 27. Coeficiente de correlación α^* según las ecuaciones *(114)* como función de la concentración media de aire $\bar{c}$.
Fuente: Naudascher (2002, 311)

2.11 FENÓMENOS HIDRÁULICOS DESARROLLADOS EN EL FLUJO SUPERCRÍTICO.

El comportamiento hidráulico de un flujo supercrítico, está influenciado directamente por la velocidad media del fluido, y la distancia total en la que se este se desplaza en su condición crítica, se hace una breve descripción de algunos de estos fenómenos, los cuales pertenecen principalmente a una rápida lisa.

2.11.1 FORMACIÓN DE ONDAS.

Son comportamientos hidráulicos indeseables debido a que el tirante que puede alcanzar el agua puede acabar por rebalsar las paredes del canal, solo produciendo una pérdida de la masa del flujo, sino también afectando la estabilidad de la fundación del canal.

La USBR (U.S Bureau of Reclamations, n.d.), en su publicación "Desing of Small Canal Structure", analiza la formación de ondas en la operación de rápidas lisas de sección rectangular, identificando las siguientes causas:

- Abrupta transición al ingreso de la rápida.
- Asimetría de la estructura.
- Curvas o ángulos en el alineamiento de la rápida.

La USBR recomienda que la sección de las rápidas que la relación del ancho del canal y el tirante transversal no sea excesivamente alta, esto puede conseguir analizando el Número de Montouri y el Número de Vendernikov, relacionado estos a su vez en la Figura 28, los parámetros en mención se obtienen con las siguientes ecuaciones respectivamente:

$$M^2 = \frac{V^2}{g s_f L cos\theta} \qquad (115)$$

$$\boldsymbol{V} = \frac{2bV}{3P\sqrt{gdcos\theta}} \qquad (116)$$

Donde:

$\boldsymbol{V}$, Número de Vendernikov.

M, Número de Montouri.

b, Ancho del canal.

P, perímetro mojado.

V, Velocidad media.

d, profundidad de flujo de la sección (tirante).

g, Aceleración de la gravedad.

L, Longitud analizada de la rápida.

θ, ángulo de la pendiente longitudinal del canal.

s_f, Pendiente de la gradiente de energía.

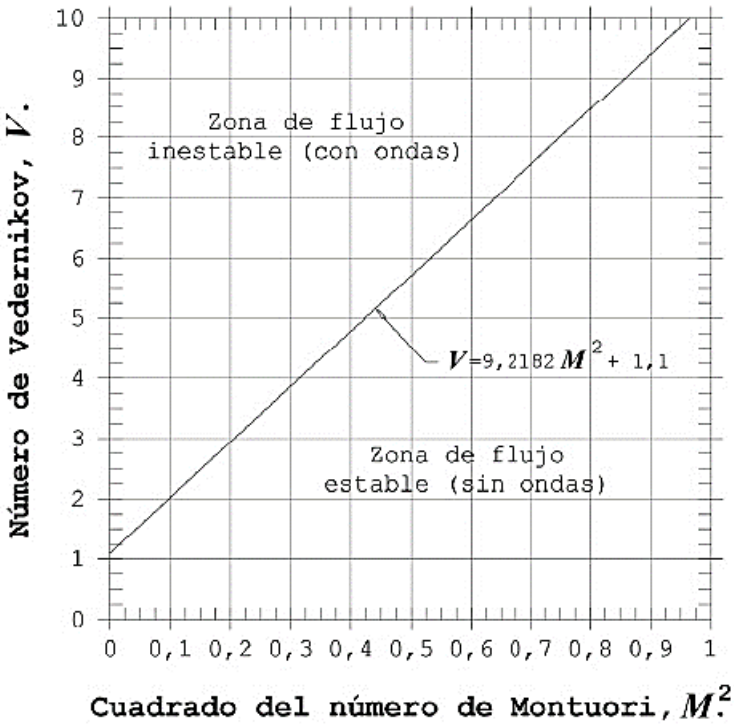


Figura 28. Relación entre el Número de Vedernikov y el Número de Montouri.
Fuente: Depaz Blácido (2008, 63)

Al realizar un análisis de las ecuaciones (115) y (116) se plantean las siguientes alternativas para poder disminuir la formación de ondas.

- Dividir la sección de la rápida por medio de un muro central.
- Cambiar la sección por un más angosta.,
- Reducir la longitud de la rápida.
- Escalonar la rápida (dividir en tramos más cortos).
- Cambiar el canal por una tubería.

El USBR también propone la relación de la Figura 29 para determinar la inestabilidad del flujo:

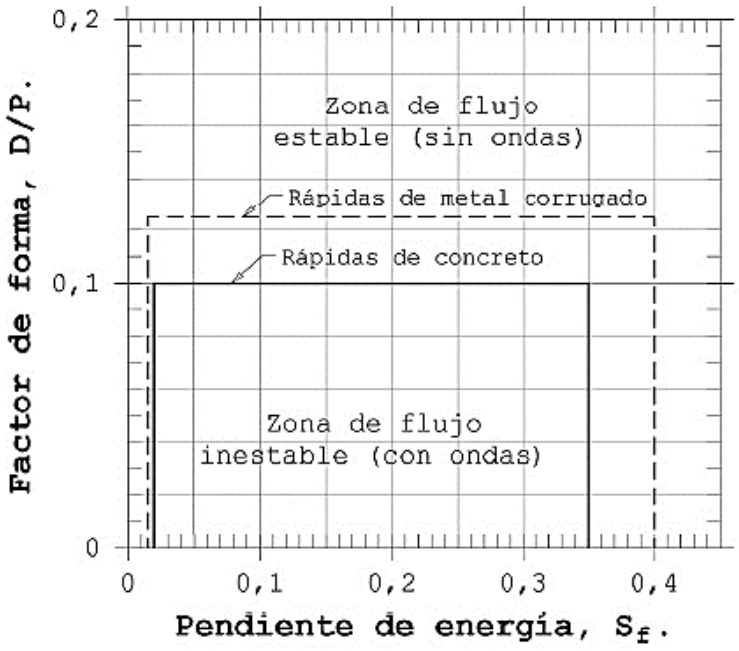


Figura 29. Criterio de inestabilidad, por el factor de forma y la línea de pendiente de energía.
Fuente: Depaz Blácido (2008, 63)

2.11.2 FLUJO PULSANTE.

Es un flujo no permanente que ocurre en diferentes situaciones, como en rápidas con pendiente pronunciada y se debe aumentar la altura del canal por el aumento en la altura del flujo y así prevenir derrames; además de empleo de factores de seguridad estructural que permita prevenir las presiones y velocidades excesivas que se traducen en una menor durabilidad del material.

los estudios realizados para flujos pulsantes, establecen que este flujo consta de dos partes: una sección de altura brusca y turbulenta, y una sección suave. Para un canal rectangular ancho se obtuvo que el flujo pulsante se presenta cuando la pendiente critica o cuando la velocidad de flujo es mayor que dos veces la velocidad critica.

El flujo pulsante puede clasificarse en dos tipos diferentes:

- Flujos de Ondas de remolino.

- Flujos ondulantes.

2.11.2.1 FLUJOS DE ONDAS DE REMOLINO.

Se caracterizan por risos transversales de alta velocidad. Las ondas de remolino se forman dentro del rango del Número de Froude de $1 \leq F_r \leq 2$.

2.11.2.2 FLUJOS ONDULANTES.

Se caracteriza por oleadas de borde turbulentos que tienen crestas separadas por regiones altamente agitadas. Se forman cuando la velocidad superficial es mayor que la velocidad de onda, y cuando el flujo presenta el Número de Froude mayor a 2, $(F_r \geq 2)$.

El flujo ondulatorio en una rápida se debe evitar debido a que puede producir desborde del agua que transporte y causar ondas en la poza, lo que puede generar un salto hidráulico inestable, lo cual reduciría su efectividad.

2.11.3 ONDAS DE FROUDE.

La inestabilidad se manifiesta siempre en la naturaleza por medio de cambios locales de la profundidad(tirante) del agua; específicamente en los casos en que la compone de la fuerza de la gravedad que la excita es mayor que la componente de la fuerza de corte que la amortigua.

Las ondas de Froude conducen a que no pueda formarse un flujo estacionario, las ondas se sobrepone a la superficie libre media calculada, y para determinar la profundidad resultante se debe considera la transformación de energía adicional debida a la formación de ondas.

En la Figura 30, se muestra el perfil de una onda de Froude en una rápida. A pesar de que el caudal es constante se forman ondas por efecto de la inestabilidad de flujo, cuya amplitud crece gradualmente hasta que se

produce la ruptura de dichas ondas en canales suficientemente largas con el tiempo.

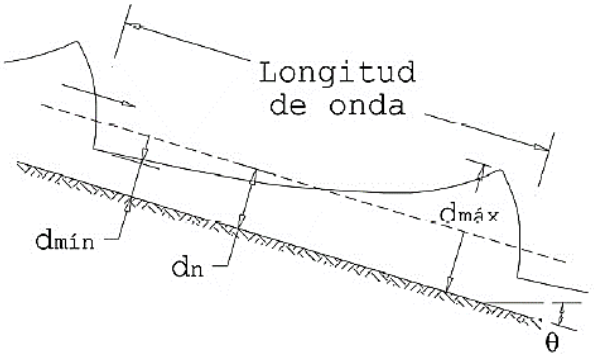


Figura 30. Característica de las ondas de Froude. *Donde:* d_{min}, *es la profundidad mínima;* d_n, *es la profundidad normal;* d_{max}, *es la profundidad máxima y* θ *es el pendiente del canal.*

Fuente: Depaz Blácido (2008, 68)

El flujo es bidimensional debido a que la velocidad de la componente transversal es despreciable con respecto a la componente longitudinal.

2.11.4 CAVITACIÓN.

Es un fenómeno hidrodinámico que se produce cuando el agua o cualquier otro liquido en estado líquido pasa a gran velocidad por una arista afilada produciéndose zona de baja presión que llegan a igualar a la presión de vapor, en estas zonas se llegan a formar burbujas o cavitaciones las cuales al entrar en zonas de mayor presión colapsan por implosión generando ondas de choque que desgastan la superficie con contacto con el flujo.

Si bien este fenómeno se produce principalmente en tuberías, bombas y turbinas hidráulicas también tienen presencia en flujos a gravedad en los cuales se llega a alcanzar altas velocidades, como es el caso de las rápidas en canales o aliviaderos de las presas.

2.12 ANÁLISIS DIMENSIONAL DE CANALES CON ELEMENTOS RUGOSOS.

El análisis del fenómeno de la resistencia en canales con elementos rugosos (macrorugosidades) de dimensiones menores al tirante del flujo (flujo sumergido) se realizará bajo el análisis teórica de las siguientes variables:

1) Variables relacionadas a las características geométricas del canal.
   a) B, ancho del canal.
   b) $\emptyset$, factor de forma del canal.
   c) k_r, altura del elemento rugoso.
   d) b_r, espesor del elemento rugoso.
   e) a_r, ancho del elemento rugoso.
   f) x, espaciamiento longitudinal del elemento rugoso.
   g) z, espaciamiento transversal del elemento rugoso.
   h) ψ, factor de forma de los elementos rugosos.
2) Variables relacionadas a las características del flujo.
   a) V, velocidad media del flujo.
   b) R, radio hidráulico del canal.
   c) τ_0, esfuerzo cortante en el contorno del canal y de los elementos rugosos.
3) Variables relacionas a las características del fluido.
   a) ρ, densidad del fluido.
   b) μ, viscosidad dinámica del fluido.
   c) γ, peso específico del fluido.

De acuerdo al análisis dimensional, todas estas variables pueden relacionarse en una función polinomial de la siguiente manera:

$$f_1(B, \phi, k, b, a, x, z, \psi, V, R, \tau_0, \rho, \mu, \gamma) = 0 \quad (117)$$

Mediante el análisis dimensional y siendo $R, V\ y\ \rho$ las variables que se repiten y al aplicar el Teorema π de Buckingham, las variables del polinomio (117) se puede agrupar de la siguiente manera:

$$f_2(\frac{B}{R}, \phi, \frac{k}{R}, \frac{b}{R}, \frac{a}{R}, \frac{x}{R}, \frac{z}{R}, \psi, \frac{V}{\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}}, \frac{\rho VR}{\mu}, \frac{V}{\sqrt{\frac{\gamma}{\rho}R}}) = 0 \quad (118)$$

Haciendo uso de la ecuación de Chézy, se puede escribir que:

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{V}{\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}} \quad (119)$$

Por lo tanto, la ecuación (118) puede tomar la siguiente forma:

$$f_3(\frac{B}{R}, \phi, \frac{k}{R}, \frac{b}{R}, \frac{a}{R}, \frac{x}{R}, \frac{z}{R}, \psi, \frac{\rho VR}{\mu}, \frac{V}{\sqrt{\frac{\gamma}{\rho}R}}) = \frac{C}{\sqrt{g}} \quad (120)$$

Se puede establecer un parámetro χ que defina la rugosidad del canal en función del factor de forma ψ y de la densidad de η de los elementos rugosos, de la siguiente manera:

$$\frac{\chi}{R} = f_4(\psi, \frac{k}{R}, \frac{b}{R}, \frac{a}{R}, \frac{x}{R}, \frac{z}{R}) \quad (121)$$

$$\chi = \eta k_r \quad (122)$$

$$\eta = \frac{\sum \text{áreas de los elementos proyectados normalmente al flujo}}{\text{Área del lecho del canal}} \quad (123)$$

Donde:

k_r, altura del elemento rugoso para flujo sumergido. Para flujo no sumergido se considera igual a la profundidad de flujo.

χ, Rugosidad del canal en función del factor de forma.

η, Densidad de los elementos rugosos.

La ecuación (120) queda como:

$$f_5\left(\frac{B}{R}, \frac{\chi}{R}, \phi, \frac{\rho V R}{\mu}, \frac{V}{\sqrt{gR}}\right) = \frac{C}{\sqrt{g}} \quad (124)$$

Teniendo en cuenta que $\frac{\rho V R}{\mu}$ es el Número de Reynolds y $\frac{V}{\sqrt{gR}}$ es el Número de Froude la ecuación (124) se puede denotar como:

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = f_6\left(\frac{B}{R}, \frac{R}{\chi}, \phi, R*, F_r\right) \quad (125)$$

La presente investigación se centrará en la manera de cómo influye en el Coeficiente de Chézy la relación $\frac{R}{\chi}$.

Coeficiente de Resistencia en función de la rugosidad relativa.

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = f_7\left(\frac{R}{\chi}\right) \quad (126)$$

La ecuación general de la variación del coeficiente de resistencia $\frac{C}{\sqrt{g}}$ con la rugosidad relativa basado en el parámetro de rugosidad χ, para los flujos sumergidos y no sumergidos es como se denota en la ecuación (127) (Salas La Cruz, 1968).

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = A_2 log\left(\frac{R}{\chi}\right) + B_2 \quad (127)$$

CAPÍTULO III: DISEÑO DE RÁPIDAS.

3.1 DEFINICIÓN DE RÁPIDAS.

Una rápida es una estructura hidráulica que permite enlazar dos tramos de canal cuyo desnivel es grande. Las rápidas son caídas inclinadas, pero denominadas así, solo para diferenciarlas de estructuras con desniveles y longitudes menores de tramo inclinado, por ejemplo, el Bureau of Reclamation define como caída inclinada hasta desniveles de 4.5 m, longitud máxima del tramo inclinado de 13.5 m y una pendiente mayor a 1:3 (18.43°).

Las rápidas pueden ser abiertas o cerradas, es decir, el conducto de transporte está formado y funciona como un canal de sección rectangular, trapezoidal o semicircular en el primer caso y como un canal de sección circular en el segundo caso, las cuales pueden funcionar parcialmente llenas o a presión. Estas secciones son revestidas de concreto, acero, etc.

Las rápidas pueden clasificarse en función de la discontinuidad de la pendiente del fondo del canal, de esta forma el canal de la rápida puede ser escalonada o contener elementos rugosos (macrorugosidades) de fondo continuo; en la investigación se tomará en cuenta solo las rápidas de fondo continuo que contengan elementos rugosos (Ver Figura 31).

Figura 31. Rápida con elementos rugosos (pantallas deflectoras).
Fuente: Mejía Fernández (2003, 27)

3.2 ELECCIÓN DE LA SECCIÓN DEL CANAL DE LA RÁPIDA.

La elección de la sección de las rápidas de fondo continuo (sin elementos macrorugosos) han sido desarrollados en función del caudal, las cuales son:

- Según Dadenkov el ancho del canal puede calcularse con:

$$b = 0.765Q^{2/5} \tag{128}$$

- Otras expresiones usadas para el cálculo del ancho del canal son:

$$b = 0.5Q^{1/2} \tag{129}$$

$$b = 1.0Q^{1/2} \tag{130}$$

$$b = 0.585Qd_1^{-3/2} \tag{131}$$

Donde:

b, ancho de la sección del canal.

Q, caudal del flujo.

d_1, profundidad de flujo uniforme.

Según Arsenishvili, para que no se produzcan ondas en el canal, se debe satisfacer la siguiente relación:

$$\frac{P}{d} < 10 \qquad (132)$$

Otra relación establecida por Fererov es la siguiente:

$$\frac{R}{d} < \frac{5}{7} \qquad (133)$$

3.3 VELOCIDAD MÁXIMA DE EROSIÓN.

La velocidad del agua influye en la conservación de los revestimientos, dado que las velocidades altas posibilitan la abrasión de los revestimientos de las paredes y del fondo de los canales, diferentes investigadores señalan la velocidad máxima de erosión, el cual se resume en la Tabla 3.

Tabla 3: Velocidad máxima de erosión.

MATERIAL	VELOCIDAD (m/s)	REFERENCIA
Concreto f'c=140kg/cm^2	4.40	Cesar Rosell
Concreto f'c=210kg/cm^2	7.40	Cesar Rosell
Planchas de acero	20.00	Cesar Rosell
Concreto	8.00	Vallarino

Fuente: Depaz Blácido (2008, 114-115)

3.4 CANAL CON PANTALLAS DEFLECTORAS (CPD).

Estudios experimentales en los dirigido por Mejía Fernández (2003) dieron como resultado el diseño optimizado del canal con pantallas deflectoras (CPD) para pendientes de 10% (5.71°) a 20% (11.31°).

El diseño optimizado del CPD sugiere usar como ancho del canal la siguiente relación:

$$b = 0.905Q^{0.4} \qquad (134)$$

Y considera una velocidad promedia en función de su pendiente a través de las siguientes relaciones:

- Para pendiente de 10% (5.71°).

$$V = 4.890Q^{0.2} \qquad (135)$$

- Para pendiente de 20% (11.31°).

$$V = 5.328Q^{0.2} \qquad (136)$$

El valor del coeficiente se puede interpolar linealmente para valores de pendientes entre el rango del 10% (5.71°) al 20% (11.31°).

Además la investigación sugiere un diseño geométrico como se indica en la ecuación Figura 32, Figura 33, Figura 34 y Figura 35,Solo para $10\% \leq \theta \leq 20\%$ y $\phi = 45°$

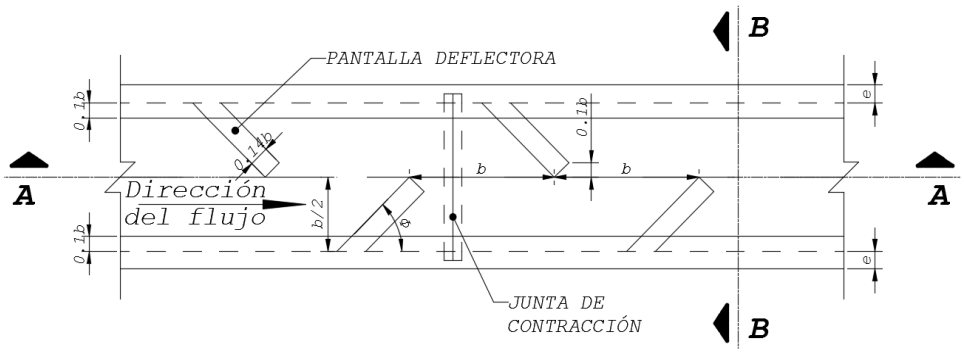


Figura 32. Diseño optimizado del Canal de pantallas deflectoras (vista en planta).
Fuente: Mejía Fernández (2003)

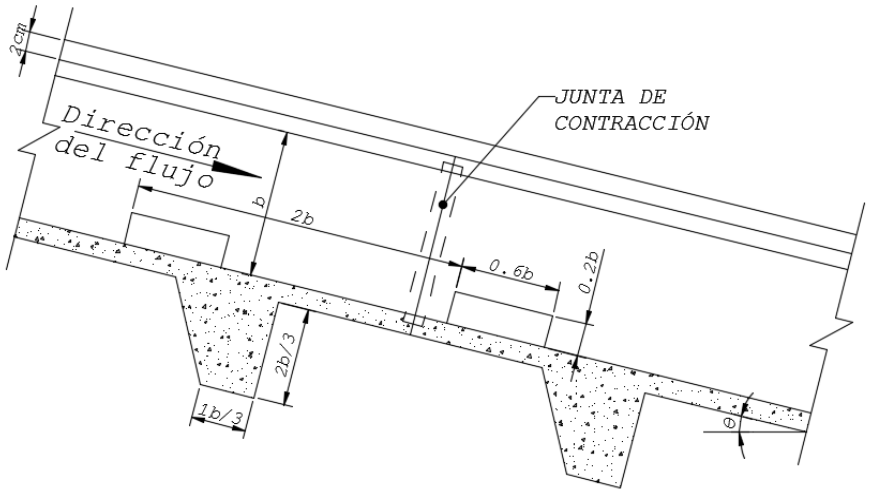


Figura 33. Diseño optimizado del Canal de pantallas deflectoras (vista en planta longitudinal).
Fuente: Mejía Fernández (2003)

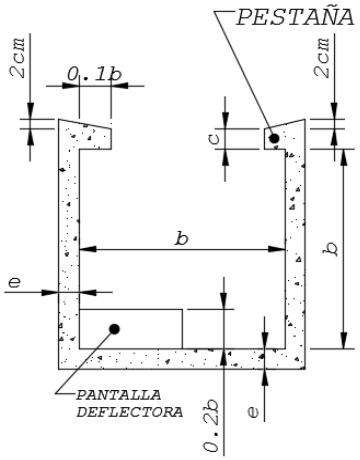
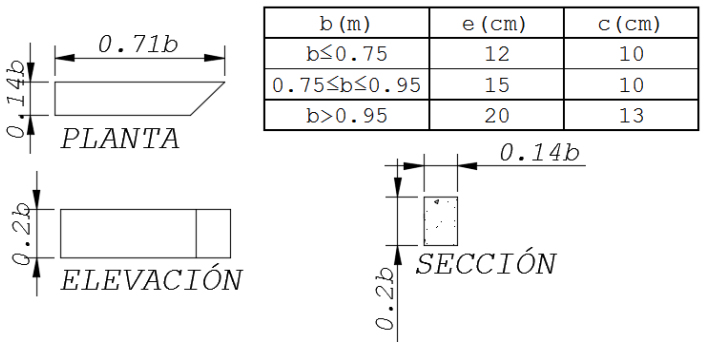


Figura 34. Diseño optimizado del Canal de pantallas deflectoras, (vista en perfil transversal).
Fuente: Mejía Fernández (2003)



b(m)	e(cm)	c(cm)
b≤0.75	12	10
0.75≤b≤0.95	15	10
b>0.95	20	13

Figura 35. Diseño optimizado del Canal de pantallas deflectoras.
Fuente: Mejía Fernández (2003)

CAPÍTULO IV: SIMULACIÓN EN MODELOS NUMÉRICOS Y ENSAYO EN UN MODELO FÍSICO.

Se realizó el modelamiento numérico con el software Iber 2.4.2 y se construyó un modelo físico de concreto simple.

A) SIMULACIÓN NUMÉRICA CON EL SOFTWARE IBER.

El software Iber 2.4.2 en su módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones del flujo en lámina libre para aguas poco profundas (ecuaciones de St. Venant 2D). Además de esto, tanto en el módulo hidrodinámico como en el de turbulencia y el de sedimentos, se resuelven las ecuaciones en forma integral por el método de volúmenes finitos en una malla no-estructurada, con todas las ventajas que ello conlleva.

Iber 2.4.2 realiza modelamientos bidimensionales, los cuales son capaces de simular con mayor ajuste a la realidad, ya sean en régimen variable o en régimen permanente y todas aquellas situaciones en que el flujo no es exclusivamente unidireccional. Siendo el software de uso para flujos bidimensionales, los resultados obtenidos por medio de este modelamiento numérico serán usados de manera referencial para el dimensionamiento del modelo físico de la rápida de 100% de pendiente.

4.1 CÁLCULOS PREVIOS.

El experimento se realizará en un canal de concreto de sección rectangular, con 10.00m de largo y con una pendiente de 100% (45°), con un caudal constante de 25.00 l/s.

1) Dimensionamiento de la rápida y los elementos rugosos:
   Para el pre dimensionamiento de la sección transversal del canal se usará las ecuaciones (128) y (134).
   Datos:

Q=25.00l/s=0.025m^3/s (caudal de diseño)

- Con la ecuación (128):

$$b = 0.765Q^{2/5} = 0.765x0.025^{2/5} = 0.17m = 17.00cm$$

- Con la ecuación (134):

$$b = 0.905Q^{0.4} = 0.905x0.025^{0.4} = 0.21m = 21.00cm$$

De donde se seleccionará $b = 20.00cm$, para efectos de procesos constructivos del modelo físico y ser un valor que se encuentra entre los valores resultantes al reemplazar con Q=25.00l/s a las ecuaciones (128) y (134).

Se tiene la sección detallado en la Figura 36:

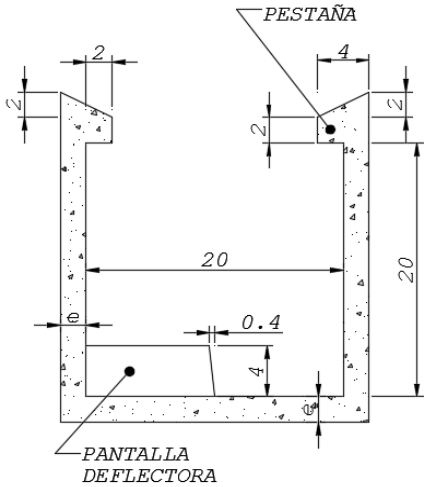


Figura 36. Sección típica de los canales de 100% de pendiente con un caudal de 25.00 l/s. (unidades: cm)

Para el análisis de canales de concreto de 100% de pendiente con pantallas deflectoras, con el software Iber 2.4.2 se estudiará pantallas deflectoras con ángulos de deflexión de las pantallas de 30°, 45°, 60° y 75° con respecto al eje longitudinal del canal. Los detalles de las dimensiones geométricas se detallan en el Anexo 1 (Lamina CSPD, CPD30, CPD45, CPD60, CPD75 y CPD).

2) Tirante Critico (y_c): Para el caudal dado $(Q = 25.00\, l/s)$ y el ancho de la sección hallada se calcula el tirante crítico con la ecuación (37).

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}} = \sqrt[3]{\frac{1.0x0.025^2}{9.81x0.20^2}} = 0.117m = 11.7cm$$

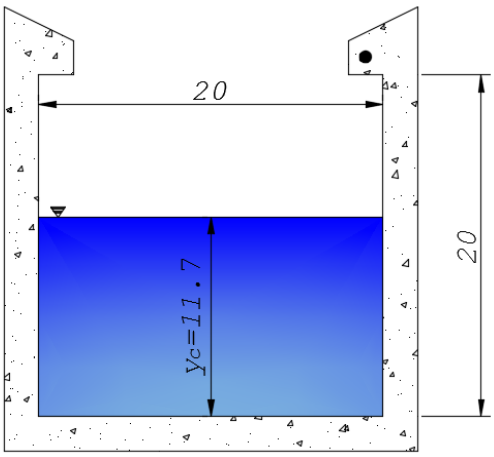


Figura 37. Tirante critico de los canales de 100% de pendiente con un caudal de 25.00 l/s. (unidades: cm)

3) Dimensionamiento del canal de transición a la rápida.

A fin de que el tirante critico se produzca al inicio de la rápida, la velocidad del flujo en el canal de transición debe ser mínima, para lograr ese objetivo el ancho de la base debe ser mayor a la dimensión de ancho de la rápida.

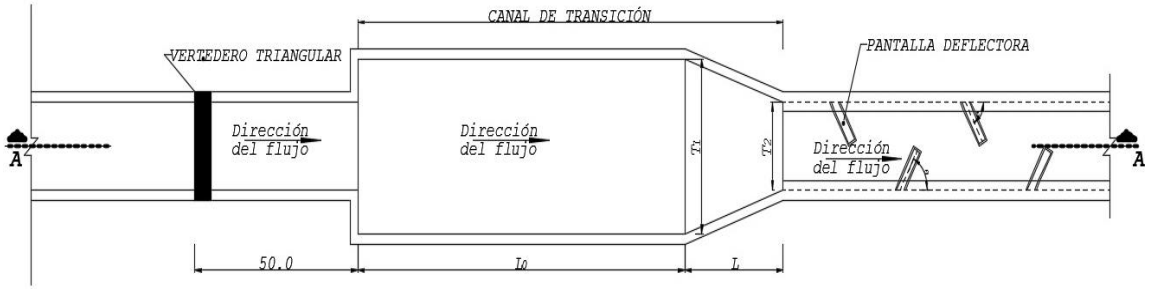


Figura 38. Vista en planta del canal de transición aguas arriba del canal de 100% de pendiente (rápida). *Dónde: T_1, ancho de la solera mayor; T_2, ancho de la solera menor; L, Longitud del canal de transición; L_0, Longitud del canal con ancho mayor.*

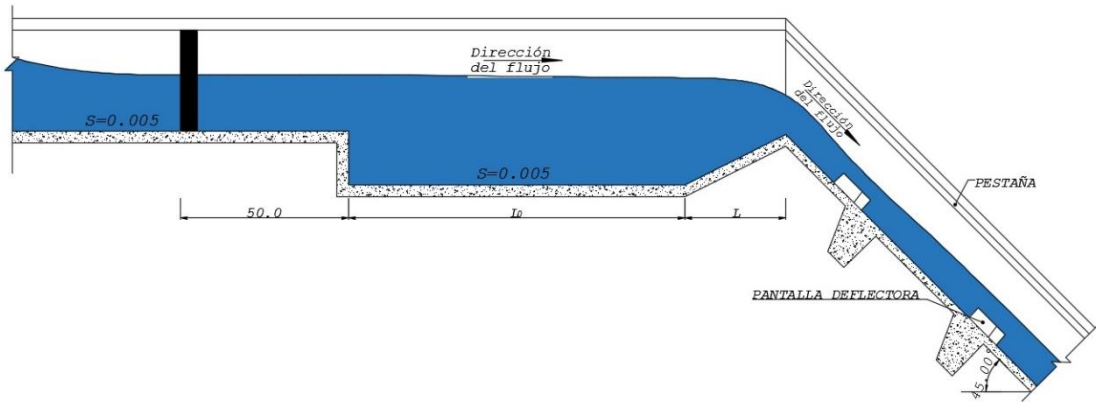


Figura 39. Vista en perfil (corte A-A) del canal de transición aguas arriba del canal de 100% de pendiente (rápida). (unidades: cm).
Donde: L, Longitud del canal de transición; L_0, Longitud del canal con ancho mayor.

Para calcular los tirantes en diferentes secciones del canal de transición asumiremos el valor de T_2, teniendo en cuenta que el valor de T_1 es igual al ancho de la rápida.

$$T_1 = 0.20m \qquad (137)$$

$$T_2 = 2T_1 = 2x0.20m = 0.40m \qquad (138)$$

Y también se tiene los siguientes datos en el canal de transición:

- Pendiente del canal de transición, en la longitud L_0.

$$s = 0.005m/m$$

- Rugosidad del concreto:

$$n = 0.015$$

- Caudal:

$$Q = 0.025m^3/s$$

- Talud:

$$z = 0$$

- Tirante conocido (tirante critico):

$$y_c = y_0 = 0.117m$$

- Coeficiente de perdida en transición por expansión en canales rectos:

$$K = 0.5$$

- Diferencia de cotas (dato asumido según criterio para mantener un flujo subcrítico en el canal de transición):

$$H_Z = z = 0.15m$$

Con estos datos se calculará los tirantes en las secciones 0; 1; 2 y 3 (ver Figura 40) del canal de transición con el software Hcanales V 3.0, cuyos resultados se visualizan en la Figura 41.

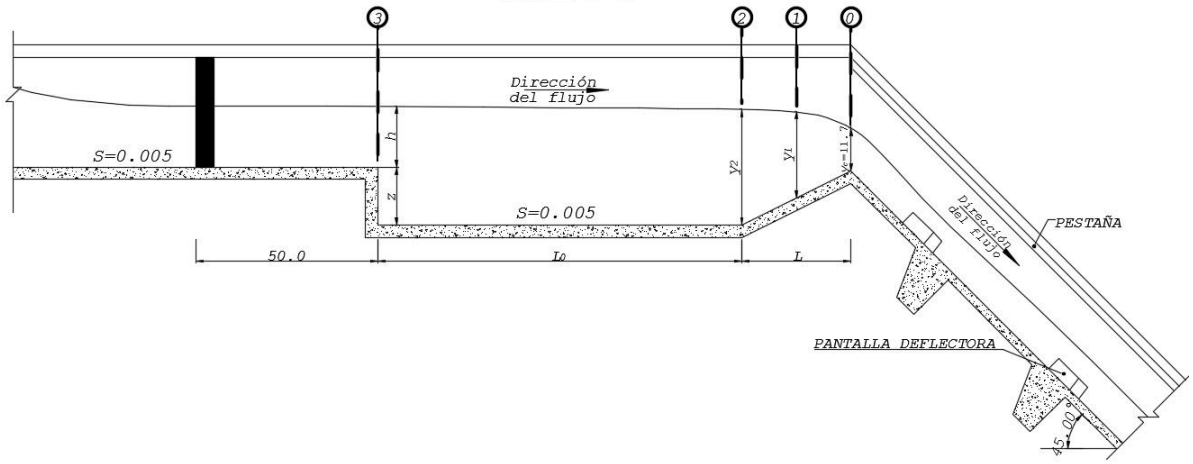


Figura 40. Tirantes en el canal de transición, corte A-A. (unidades: cm)

De los calculo efectuados en Hcanales V 3.0 (Figura 41)se tiene que:

$$y_c = y_0 = 0.117m$$

$$y_1 = 0.2680m$$

$$y_2 = 0.3519m$$

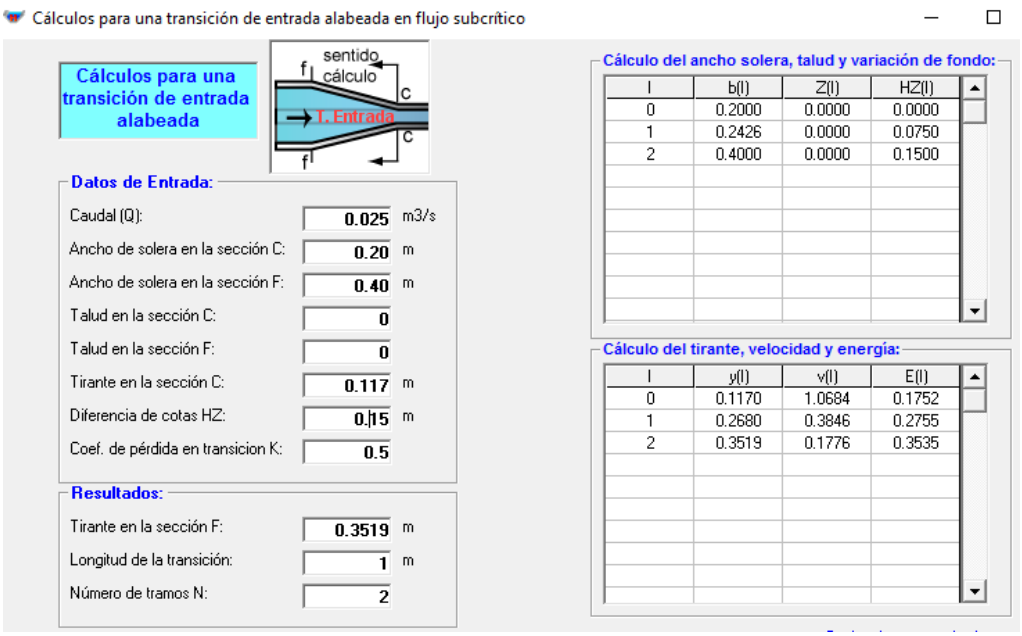


Figura 41. Cálculo de los tirantes en las secciones 0; 1 y 2 con el software Hcanales V 3.0.

Para calcular la longitud de "L" en el canal de transición se aplicará la siguiente formula:

$$L = \frac{T_1 - T_2}{2\tan 22.5\,°} \qquad (139)$$

Usando la ecuación (139) se tiene:

$$L = 0.241m$$

Por proceso constructivo del modelo físico se usará:

$$L = 0.30m$$

Para calcular el tirante en la sección 3 del canal de transición, se calculará la curva de remanso entre las secciones 2 y 3, con el software Hcanales V 3.0., como se observa en la Figura 42.

Se debe tener en cuenta que el tirante en la sección 2 es:

$$y_2 = 0.3519m$$

El tirante en la sección 3 debe ser mayor o igual al tirante de la sección 2, para lo cual se hará la siguiente consideración:

$$y_3 = 0.3565m > y_2$$

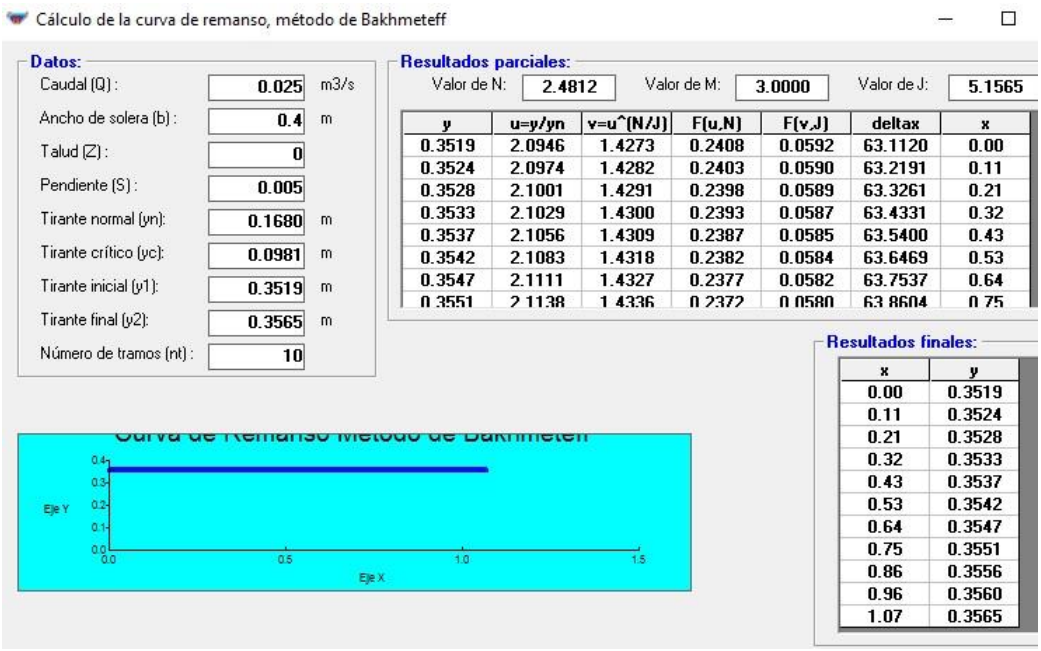


Figura 42. Curva de remanso entre las secciones 2 y 3 del canal de transición.

De la Figura 42 se tiene que el tirante en la sección 3 del canal de transición es:

$$y_3 = h + z = 0.3565m$$

$$h + z = 0.3565m \qquad (140)$$

De la ecuación (140) se determina el valor de h.

$$h = 0.3565 - 0.150 = 0.2065m$$

La curva de remanso entre las secciones 2 y 3 del canal de transición se desarrolla en una longitud de 1.00m. Las dimensiones del canal de transición se detallan en la Figura 43 y Figura 44.

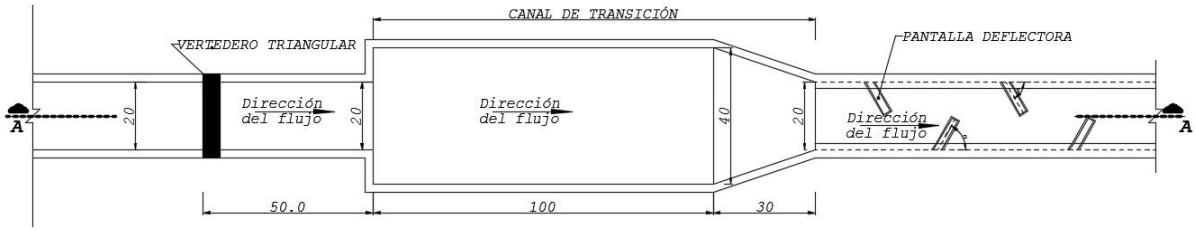


Figura 43. Dimensiones en planta del canal de transición aguas arriba del canal de 100% de pendiente (rápida). (unidades: cm)

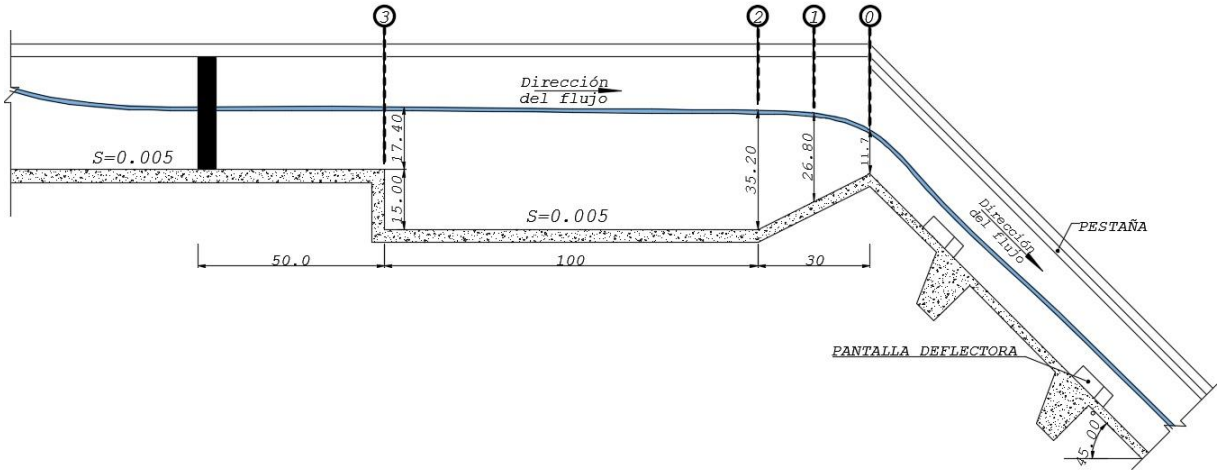


Figura 44. Dimensiones en perfil del canal de transición aguas arriba del canal de 100% de pendiente (rápida). (unidades: cm)

4) Dimensionamiento del canal aguas abajo de la rápida.

Se diseñará el canal aguas abajo a la rápida de 100% de pendiente (canal de entrega), asumiendo que dicho canal a diseñar posee una pendiente de 0.005m/m $(s = 0.005)$.

La longitud del canal de entrega será diseñada para una rápida con un flujo de agua con la máxima energía en un tramo de 10.00 m, el flujo al ingresar a un canal de pendiente de 0.005 m/m experimentará un fenómeno denominado como resalto hidráulico.

Para conseguir la máxima energía del flujo en la rápida se realizará el análisis sin elementos rugosos (macrorugosidades).

- Cálculo del tirante normal en el software Hcanales V 3.0 (ver Figura 45).
  De la Figura 45 se tiene:

$$y_n = 0.0253m = 2.53cm$$

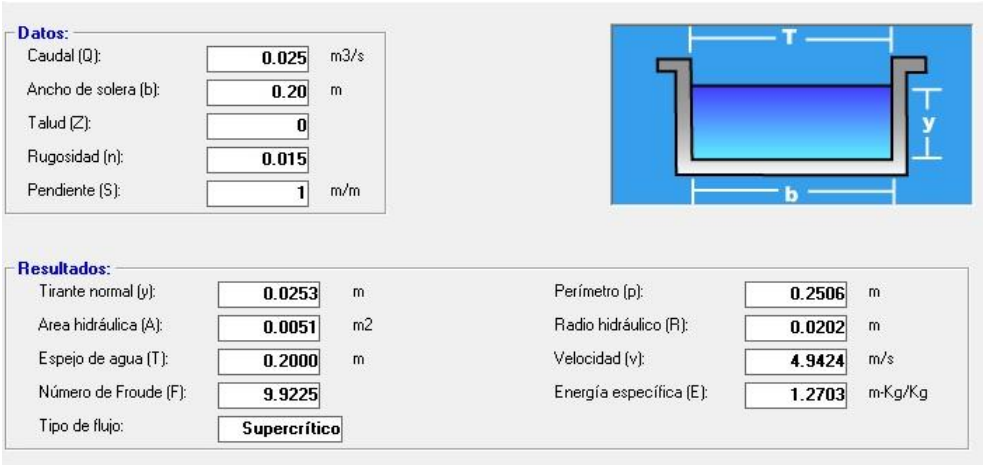


Figura 45. Cálculo del tirante normal y velocidad máxima para el canal de 100% de pendiente sin elementos rugosos.

- Cálculos hidráulicos en la sección de inicio del canal de entrega con el software Hcanales V 3.0, ver Figura 46.

  En la Figura 44 se considera como tirante inicial $y_1 = 0.117m$, teniendo en cuenta que el tirante de ingreso del flujo en la rápida es igual al tirante crítico, cuyo cálculo se ilustra en la Figura 37.

  Como se verifica en la Figura 46 a partir de la sección en una longitud de 4.54m aguas abajo del inicio de la rápida con 100%, el flujo será estabiliza y se hace uniforme (ver Figura 46).

  Por lo tanto, el tirante de ingreso en el canal de entrega será:

$$y_{i,ce} = 0.0253m = 2.53cm$$

  Donde:

  $y_{i,ce}$, tirante de ingreso en el canal de entrega.

  A continuación, se procede al cálculo de la longitud de resalto hidráulico, previo al dimensionamiento de la longitud del canal de entrega.

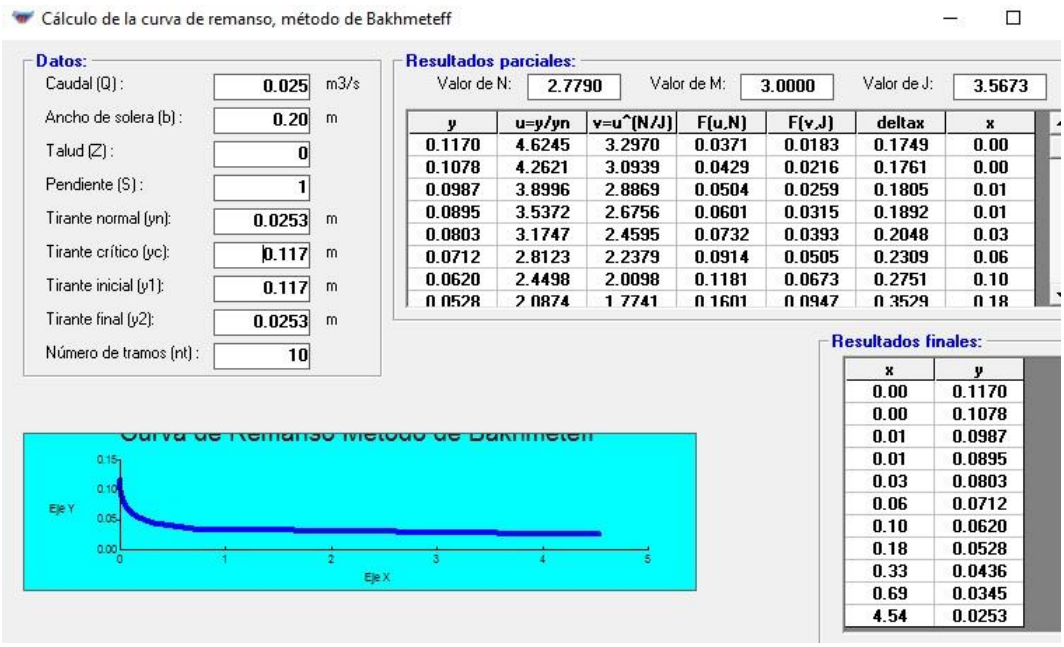


Figura 46. Curva de remanso en el canal de 100% de pendiente sin elementos rugosos.

En la Figura 47 se tiene que el tirante normal para el canal de entrega de s=0.005 m/m es:

$$y_n = 0.1680m = 16.80cm$$

Figura 47. Tirante normal en el canal de entrega de s=0.005m/m

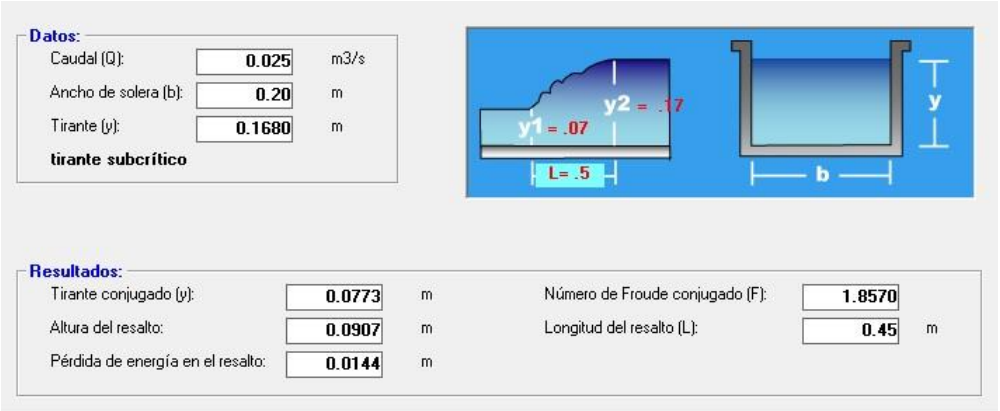


Figura 48. Resalto hidráulico en el canal de entrega.

De la Figura 48 se verifica que la longitud para el desarrollo del resalto hidráulico en el canal de entrega es de 0.45m, en la construcción del modelo físico se considerará una longitud del canal de entrega de 1.50m, como se detalla en la Figura 49.

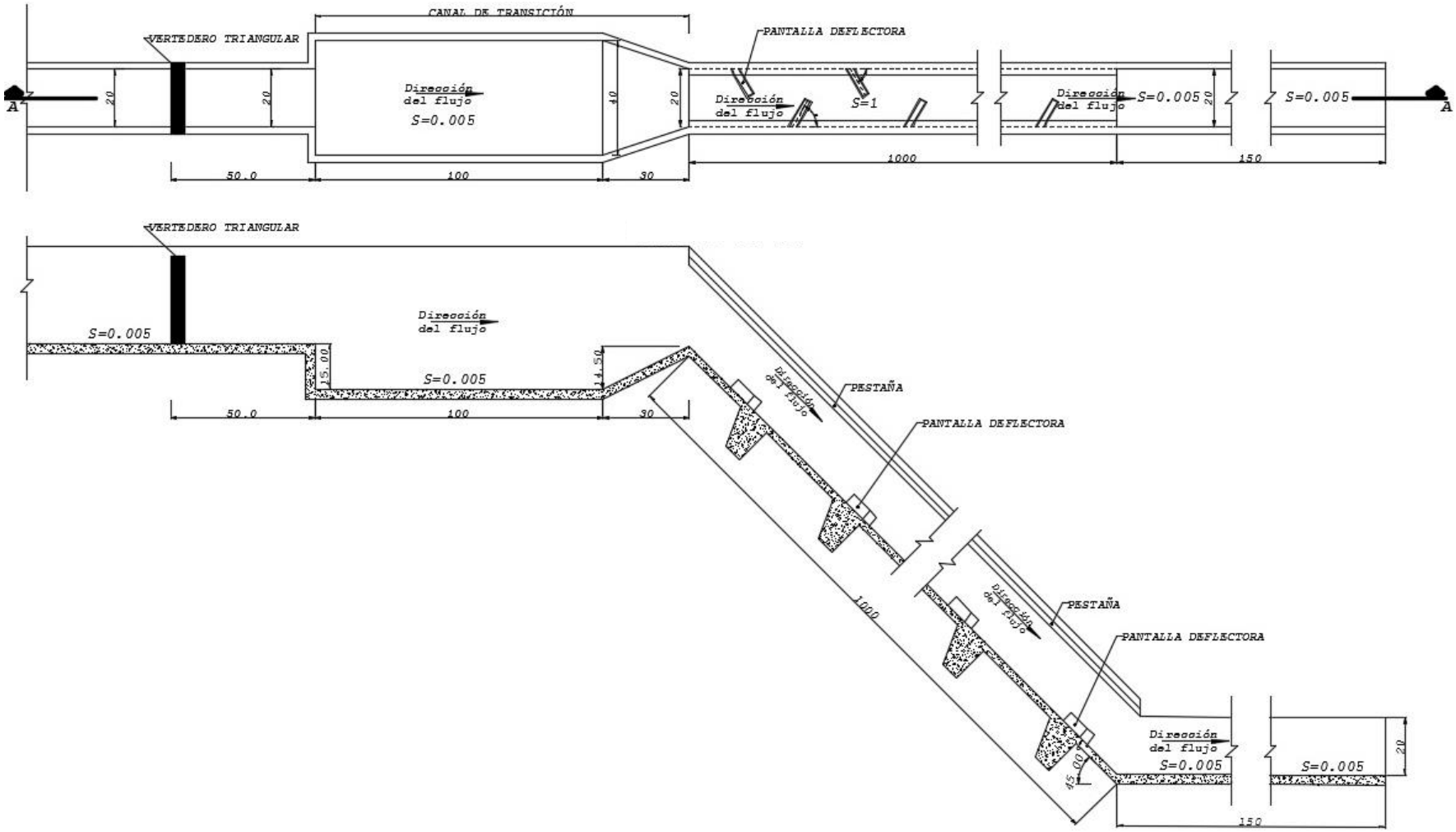


Figura 49. Sección típica de los canales de 100% de pendiente con un caudal de 25 l/s, vista planta en la gráfico superior y vista perfil en el gráfico inferior (unidades: cm).

4.1.1 SISTEMA DE REFERENCIACIÓN.

La estructura hidráulica necesita un sistema de ejes coordenadas para describir la ubicación de los diferentes indicadores de energía (tirante, velocidad, cota de la solera) en el punto y/o sección requerida a lo largo y ancho de la rápida. Las coordenadas globales se aprecian en la Figura 50, Figura 51 y Figura 52.

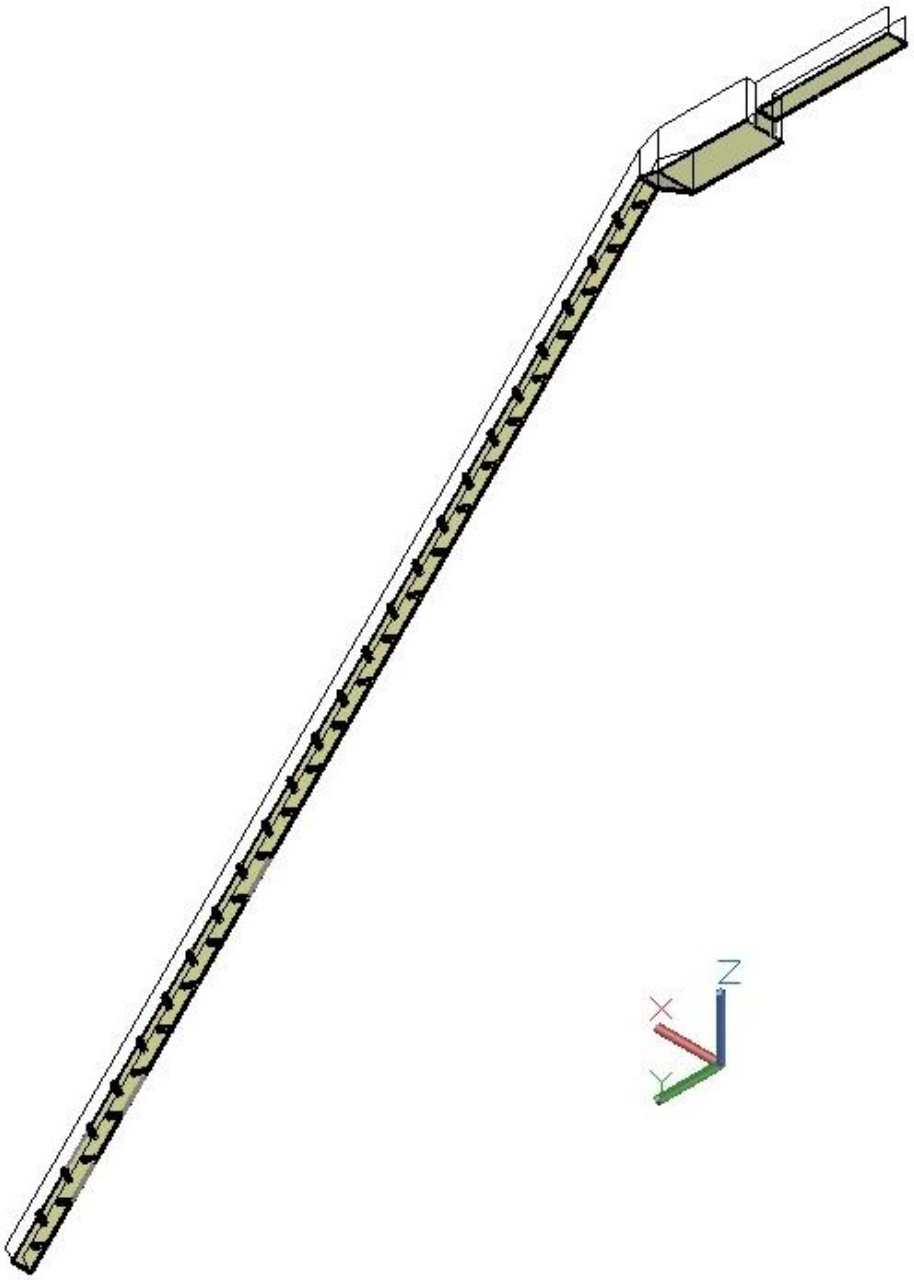


Figura 50. Vista isométrica de las coordenadas globales para la estructura hidráulica.

Figura 51. Vista en planta de las coordenadas globales para la estructura hidráulica.

Las coordenadas globales satisfacen la ley de la mano derecha.

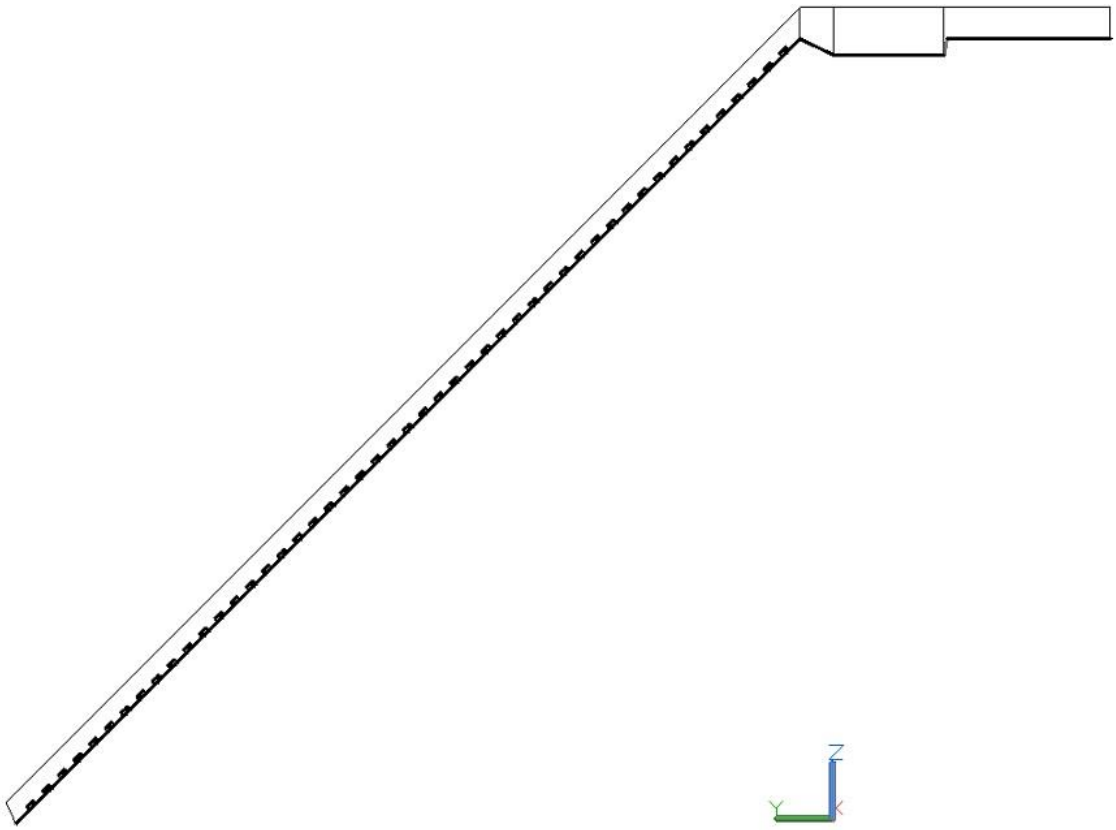


Figura 52. Vista perfil de las coordenadas globales para la estructura hidráulica.

La nomenclatura para la ubicación de las secciones de análisis y control a lo largo de la rápida se realizó mediante progresivas, las cuales estarán ordenadas desde aguas arriba hacia aguas abajo, según como se detalla en la Figura 53 y Figura 54. Es así que la sección de control inicial de la rápida corresponde a la progresiva 0+0.00; Z=7.0711m y la progresiva correspondiente a la sección de control de salida es 10+0.00; z=0.0000m, de esta manera se denotara la ubicación de cualquier punto y/o sección a lo largo de la rápida de 10.00m de longitud.

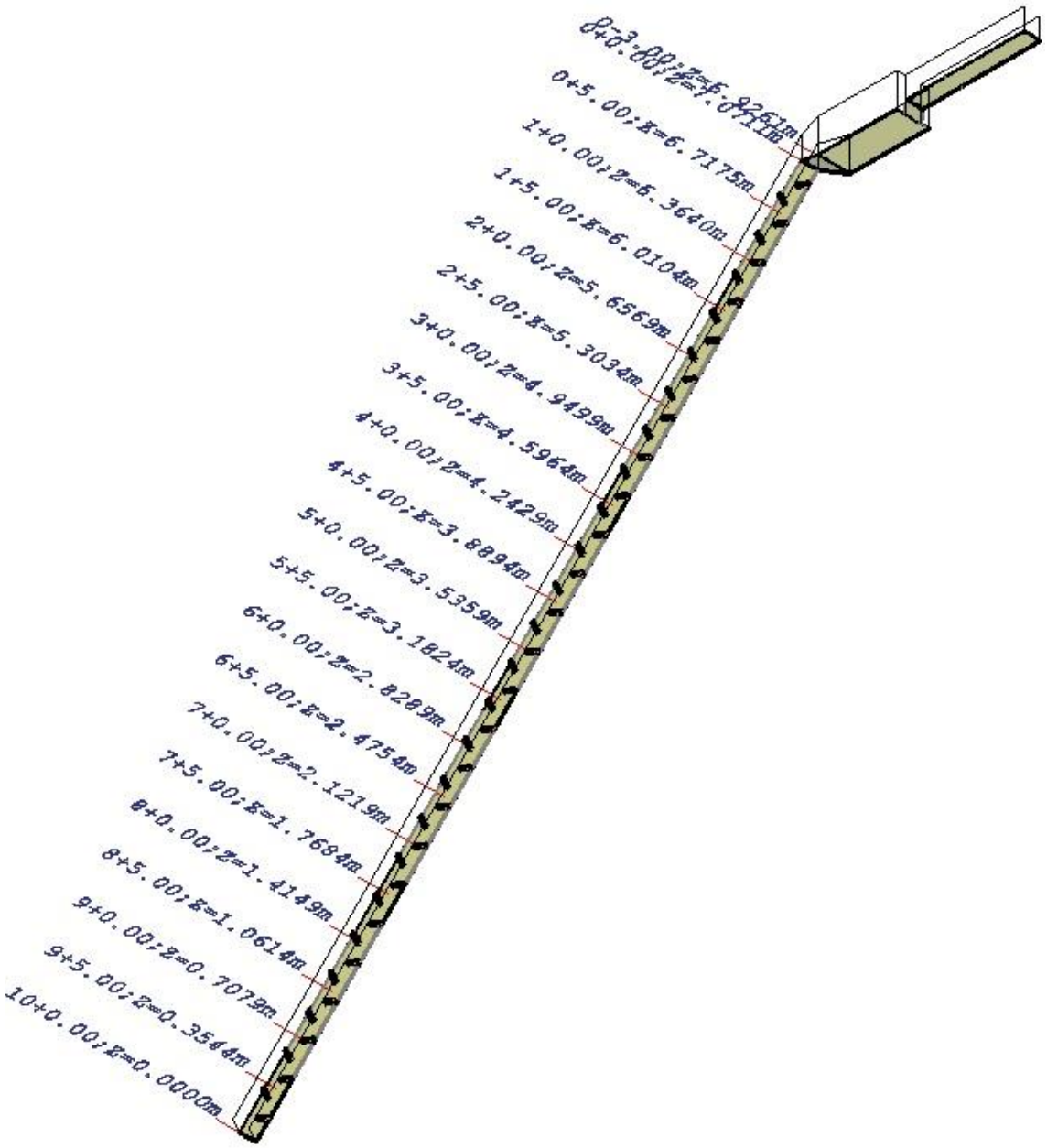


Figura 53. Vista isometrica de las progresivas en la estructura hidraulica de estudio.

En la Figura 53 y Figura 54 la sección donde se produce el tirante crítico corresponde a la progresiva 0+0.00; Z=7.0711m.

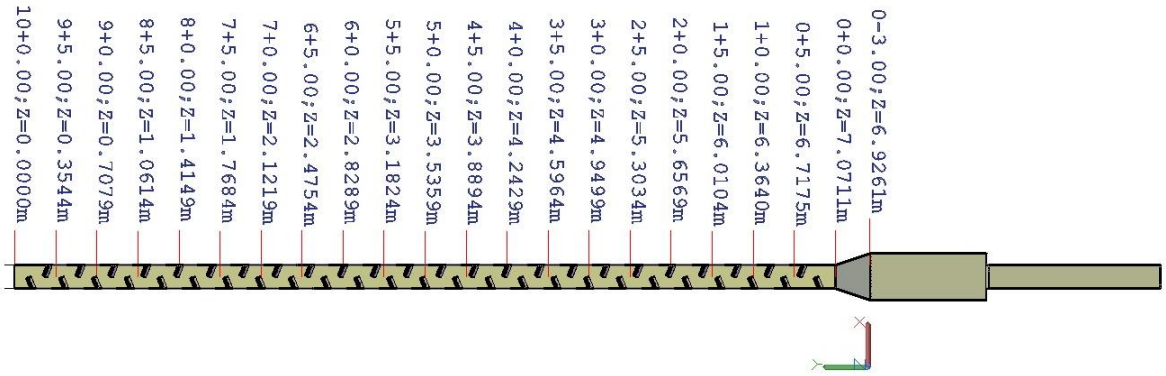


Figura 54. Vista en planta de las progresivas en la estructura hidraulica de estudio.

El análisis en cuanto al eje longitudinal se realizó en tres secciones, el eje longitudinal central a lo largo de la rápida se denota como la sección: 0+0.00m y la sección izquierdo y derecho (vista aguas arriba) respectivamente se denota como: 0-0.06m y 0+0.06m, como se puede ver en la Figura 55.

Figura 55. Secciones longitudinales a lo largo de la rápida, sección central:0+0.000m; sección izquierda: 0-0.060m; sección derecha: 0+0.060m.

La denotación de las secciones longitudinales y transversales a lo largo y ancho del canal respectivamente serán como se detalla en la Figura 56.

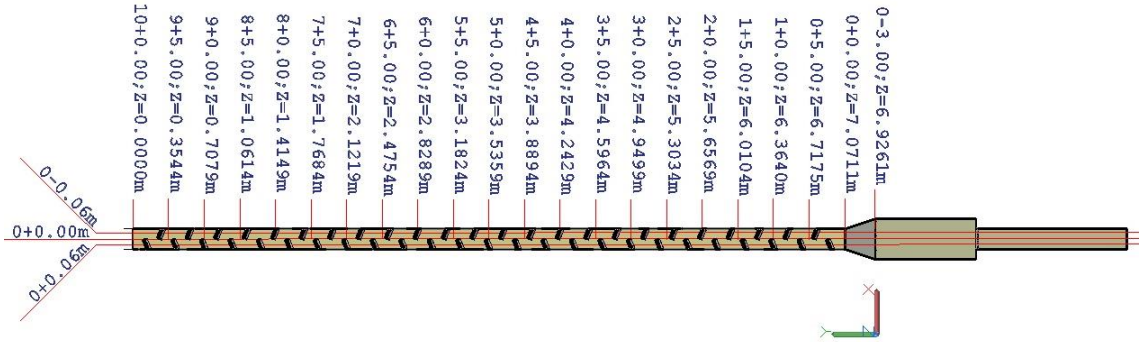


Figura 56. Denotación de las secciones longitudinales y transversales de la rápida.

4.1.2 ANÁLISIS NUMÉRICO CON EL SOFTWARE IBER.

Debido a que el interés del estudio es la disipación de energía en los canales de concreto de 100% de pendiente con el uso de pantallas deflectoras las cuales intervienen en el comportamiento de la energía específica (tirante y velocidad) a lo largo de la rápida y debido a que no es objeto de la presente investigación determinar el comportamiento del flujo en la estructura de las aguas salientes solo se estudió las medidas de tendencia central y de la variabilidad de la energía específica entre las progresivas 0+0.00 m a 9+5.00m del comportamiento del flujo simulado numéricamente con el software Iber 2.4.2.

En la Tabla 4 se presenta los datos hidráulicos, geométricos, propiedades físicas del flujo y datos geodésicos de la ubicación del ensayo de los canales: S45_P00_0.20b, S45_P30_0.20b, S45_P45_0.20b, S45_P60_0.20b y S45_P75_0.20b, respectivamente.

Tabla 4: Datos Generales del Canal de Concreto de 100% de Pendiente.

Denominación	Canal de Concreto de 100% de Pendiente Sin Pantallas Deflectoras.	Canal de Concreto de 100% de Pendiente con Pantallas de 30° de Deflexión.	Canal de Concreto de 100% de Pendiente con Pantallas de 45° de Deflexión.	Canal de Concreto de 100% de Pendiente con Pantallas de 60° de Deflexión.	Canal de Concreto de 100% de Pendiente con Pantallas de 75° de Deflexión.
Sección de corte longitudinal/ Código	0+0.000 m/S45_P00_0.20b_0+0.000.	0+0.000 m/S45_P30_0.20b_0+0.000 0+0.060 m/S45_P30_0.20b_0+0.060 0-0.060 m/S45_P30_0.20b_0-0.060	0+0.000 m/S45_P45_0.20b_0+0.000 0+0.060 m/S45_P45_0.20b_0+0.060 0-0.060 m/S45_P45_0.20b_0-0.060	0+0.000 m/S45_P60_0.20b_0+0.000 0+0.060 m/S45_P60_0.20b_0+0.060 0-0.060 m/S45_P60_0.20b_0-0.060	0+0.000 m/S45_P75_0.20b_0+0.000 0+0.060 m/S45_P75_0.20b_0+0.060 0-0.060 m/S45_P75_0.20b_0-0.060
A) Datos hidráulicos					
- Tipo de flujo	Flujo estacionario	Flujo estacionario	Flujo estacionario	Flujo estacionario	Flujo estacionario
- Caudal del flujo	25.00 l/s	25.00 l/s	25.00 l/s	25.00 l/s	25.00 l/s
B) Datos geométricos (Ver Figura 49)					
- Ancho del canal (b)	0.20 m	0.20 m	0.20 m	0.20 m	0.20 m
- Longitud del canal	10.00 m	10.00 m	10.00 m	10.00 m	10.00 m
- Pendiente de la solera(s)	1.00 m/m	1.00 m/m	1.00 m/m	1.00 m/m	1.00 m/m
- Rugosidad del canal (Manning)	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
- Angulo de deflexión del elemento rugosos(θ)	0.00°	30.00°	45.00°	60.00°	75.00°
- Altura del elemento rugoso(k_r)	0.00 cm	4.00 cm	4.00 cm	4.00 cm	4.00 cm
- Espesor del elemento rugoso inferior(b_{ri})	0.00 cm	2.80 cm	2.80 cm	2.80 cm	2.80 cm
- Espesor del elemento rugoso superior(b_{rs})	0.00 cm	2.00 cm	2.00 cm	2.00 cm	2.00 cm
- Ancho del elemento rugoso(a_r)	0.00 cm	26.49 cm	16.95 cm	11.60 cm	7.62 cm
- Espaciamiento longitudinal de los elementos rugosos(x)	0.00 cm	20.00 cm	20.00 cm	20.00 cm	20.00 cm
- Espaciamiento transversal de los elementos rugosos(z)	0.00 cm	0.00 cm	0.00 cm	0.00 cm	0.00 cm
C) Propiedades físicas del flujo (agua) a T=18°C					
- Densidad(ρ_w)	998.60 kg/m^3	998.60 kg/m^4	998.60 kg/m^4	998.60 kg/m^4	998.60 kg/m^4
- Viscosidad cinemática(υ)	1.061x10^{-6} m^2/s	1.061x10^{-6} m^2/s	1.061x10^{-6} m^2/s	1.061x10^{-6} m^2/s	1.061x10^{-6} m^2/s
D) Datos Geodésicos.					
- Latitud	-77.656607°	-77.656607°	-77.656607°	-77.656607°	-77.656607°

5.1.2.1 CANAL DE CONCRETO DE 100% DE PENDIENTE SIN PANTALLAS DEFLECTORAS.

5.1.2.1.1 Análisis Numérico con el software Iber 2.4.2:

Con los datos de la Tabla 4 y aplicación del software Iber 2.4.2 se determina el tirante (calado), velocidad y energía específica del flujo.

I. ANÁLISIS EN LA SECCIÓN LONGITUDINAL 0+0.00m.

a) Código: S45_P00_0.20b_0+0.000.

b) Perfil de la solera de la rápida.

En la Figura 57 se visualiza el perfil de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

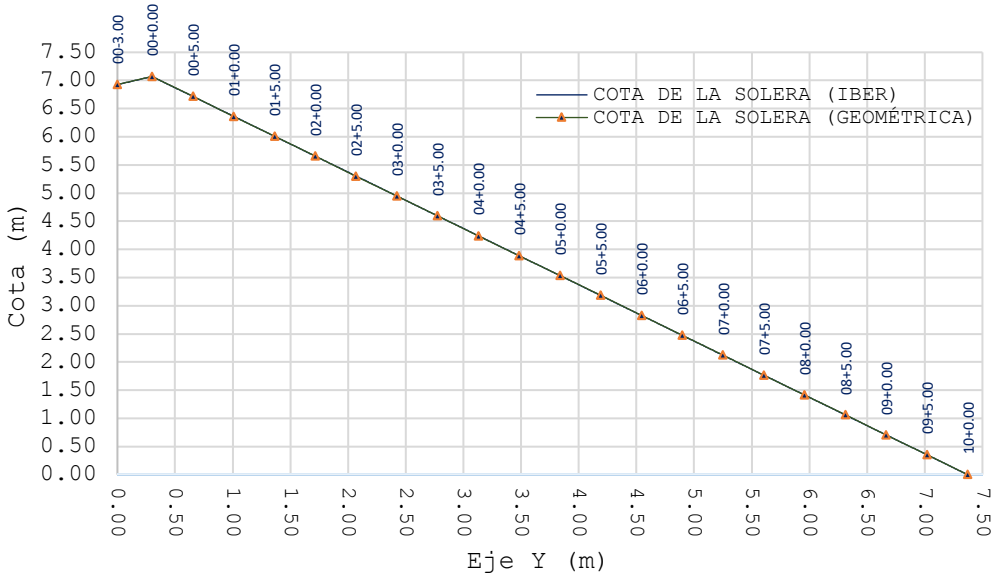


Figura 57. Perfil de la solera a lo largo del eje de la rápida del S45_P00_0.20b_0+0.000.

En la Figura 58 se presenta en rango de colores la cota topográfica de la solera en el paso 0 (t=0s) del canal.

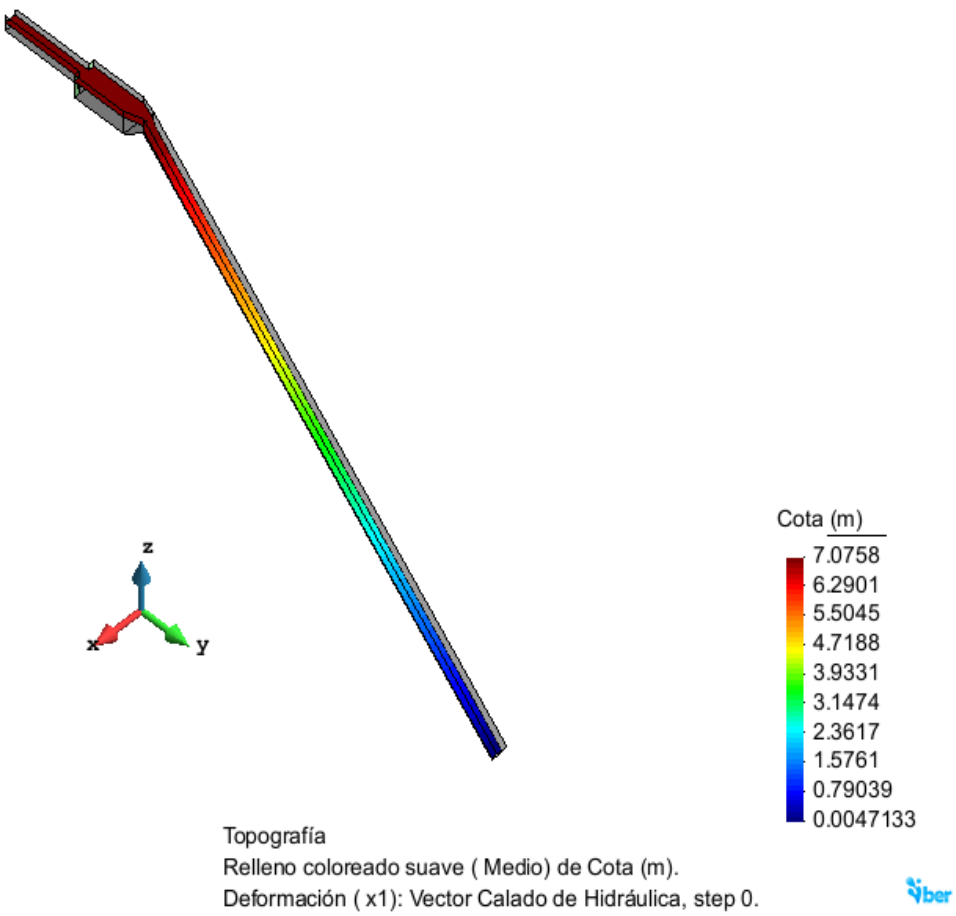


Figura 58. Cota topográfica de la solera en el paso 0 (t=0s) del S45_P00_0.20b_0+0.000.

c) Energía Específica.

La determinación de energía específica del flujo obedece a la Ecuación (33).

En la Figura 59 se visualiza el perfil de la energía específica hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53). Los datos tabulares y gráficos usados para determinar la energía específica del flujo de agua a lo largo de la rápida se detallan en el Anexo 2 (Gráfico 1, Gráfico 2, Gráfico 3, Gráfico 4 y Gráfico 5).

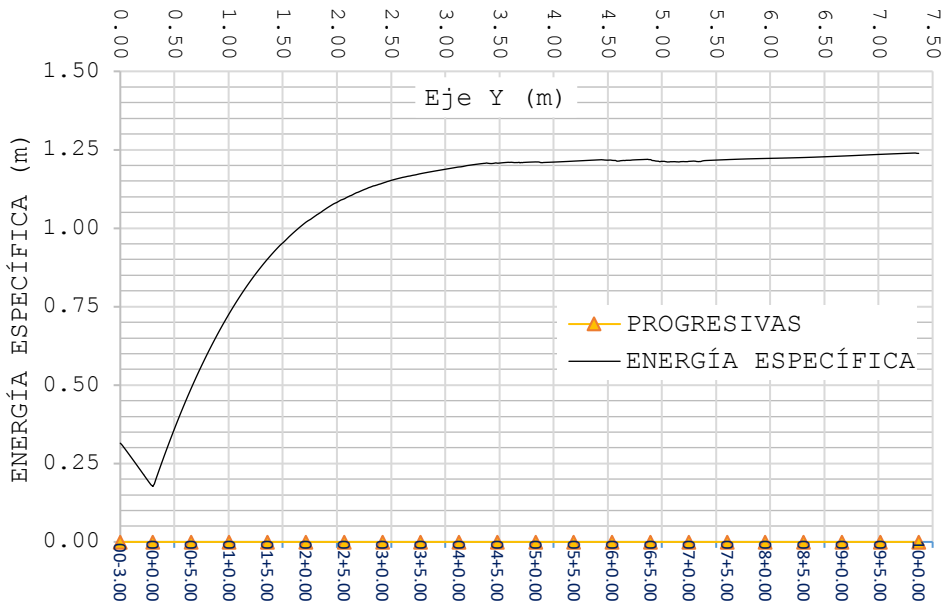


Figura 59. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P00_0.20b_0+0.000.

En la Figura 60 se visualiza la variación del Número de Froude a lo largo de la rápida.

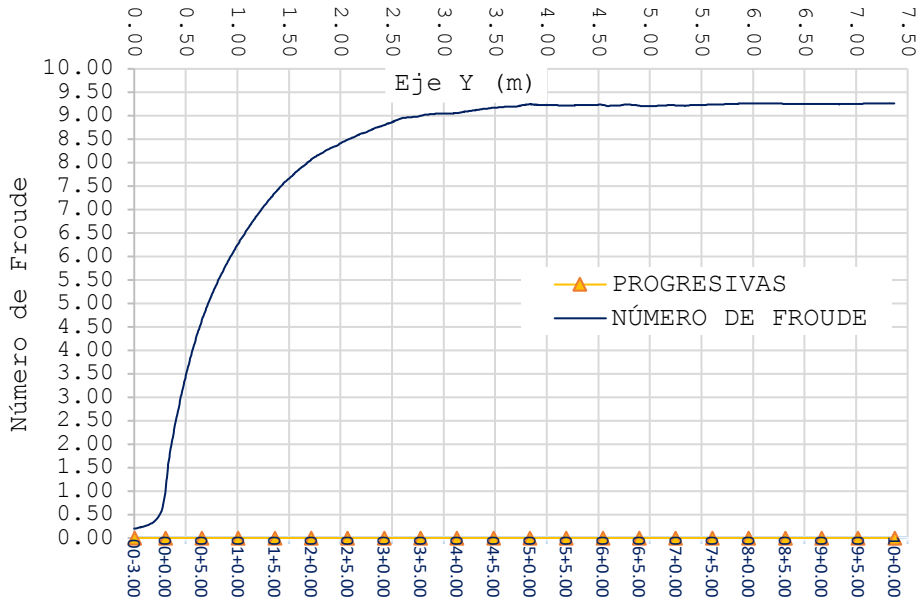


Figura 60. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P00_0.20b_0+0.000.

d) Energía total del flujo de agua.

La determinación de Energía Total del flujo obedece a la Ecuación (24).

En la Figura 61 se visualiza el perfil de la energía total hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

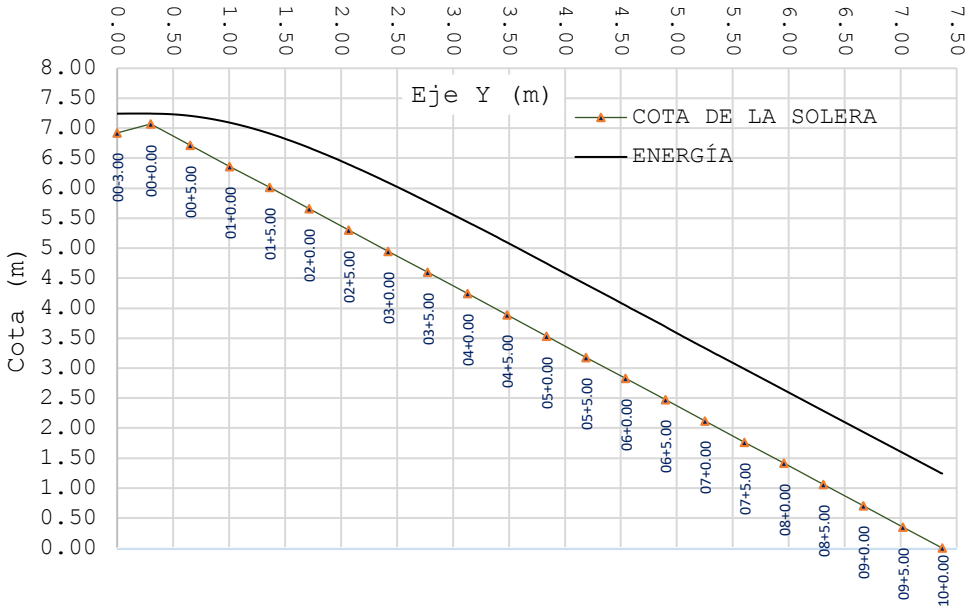


Figura 61. Perfil de la energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P00_0.20b_0+0.000.

En la Figura 62 se presenta en rango de colores de la energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal.

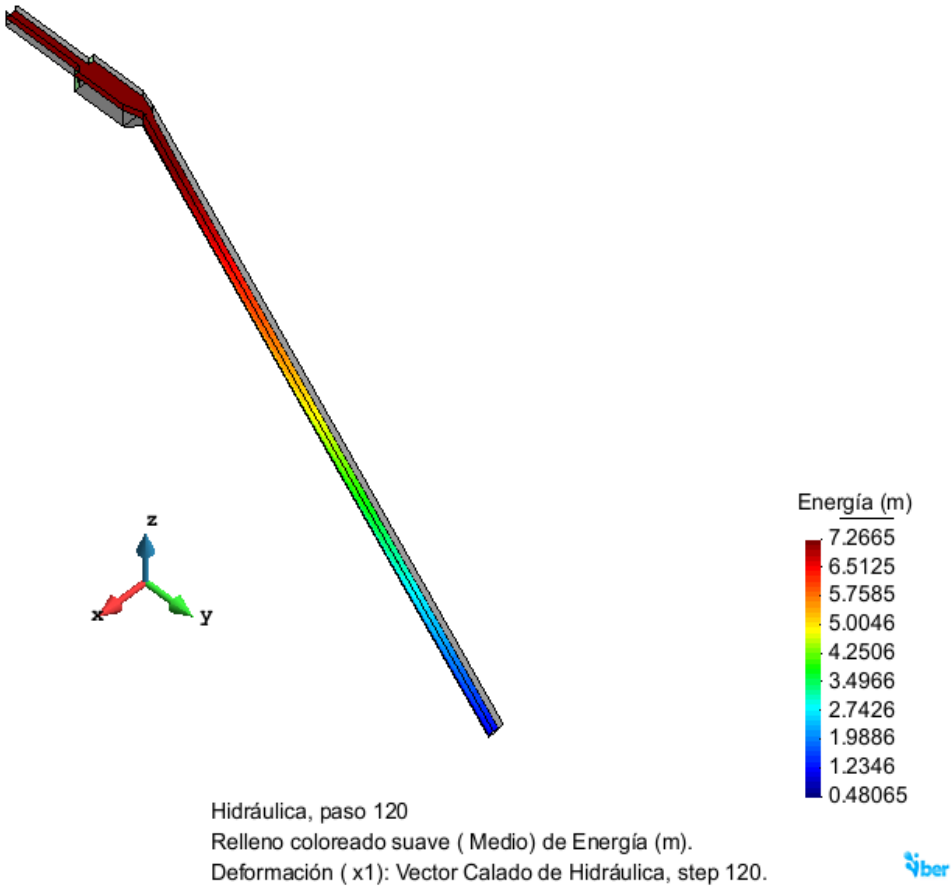


Figura 62. Energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del S45_P00_0.20b_0+0.000.

II. ANÁLISIS DE LA ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA ESPECÍFICA Y ESTADO DE FLUJO.

Análisis de la estimación de la energía específica y Estado de Flujo.

El resumen del análisis estadístico de la energía específica al largo del canal se detalla en la Tabla 5, Figura 127 y Figura 128.

5.1.2.2 CANAL DE CONCRETO DE 100% DE PENDIENTE CON PANTALLAS DE 30° DE DEFLEXIÓN.

5.1.2.2.1 Análisis Numérico con el Software Iber 2.4.2:

Con los datos de la Tabla 4 y aplicación del software Iber 2.4.2 se determina el tirante (calado), velocidad y energía específica del flujo.

I. ANÁLISIS EN LA SECCIÓN LONGITUDINAL 0+0.00m.

a) Código: S45_P30_0.20b_0+0.000

b) Perfil de la solera de la rápida.

En la Figura 57 se visualiza el perfil de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

En la Figura 63 se presenta en rango de colores la cota topográfica de la solera en el paso 0 (t=0s) del canal.

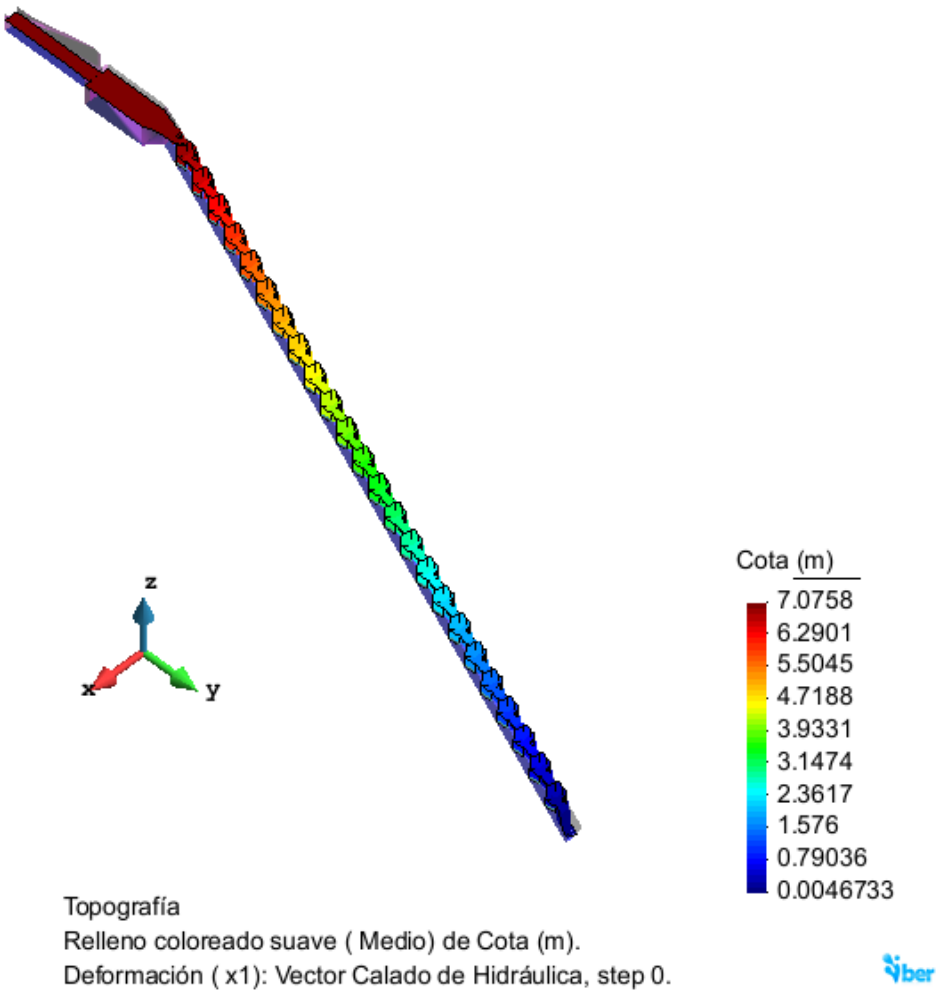


Figura 63. Cota topográfica de la solera en el paso 0 (t=0s) del S45_P30_0.20b_0+0.000.

c) Energía Específica.

La determinación de energía específica del flujo obedece a la Ecuación (33).

En la Figura 64 se visualiza el perfil de la energía específica hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53). Los datos tabulares y gráficos usados para determinar la energía específica del flujo de agua a lo largo de la rápida se detallan en el Anexo 2 (Gráfico 6, Gráfico 7, Gráfico 8, Gráfico 9 y Gráfico 10).

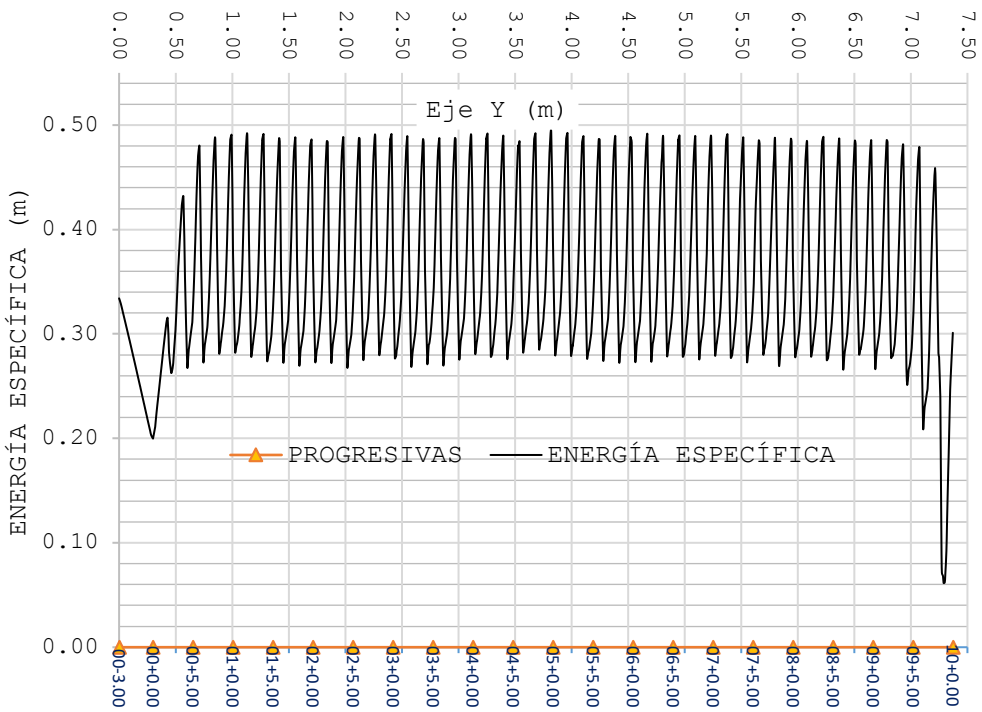


Figura 64. Perfil de la energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P30_0.20b_0+0.000.

En la Figura 65 se visualiza la variación del Número de Froude a lo largo de la rápida.

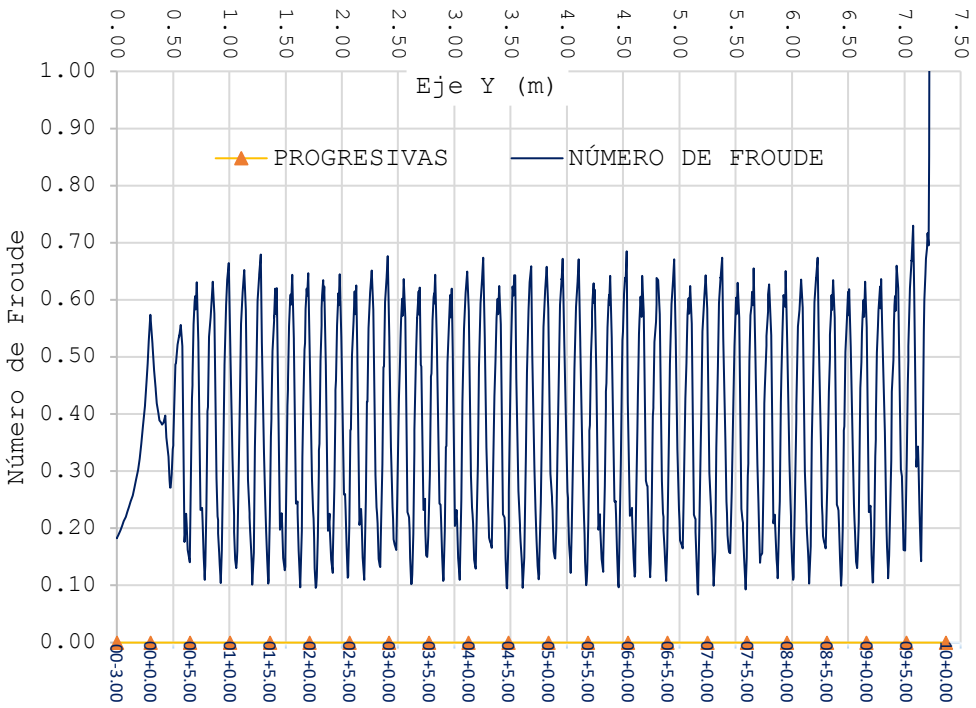


Figura 65. Perfil del Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P30_0.20b_0+0.000.

d) Energía total del flujo de agua.

La determinación de Energía Total del flujo obedece a la Ecuación (24).

En la Figura 66 se visualiza el perfil de la energía total hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

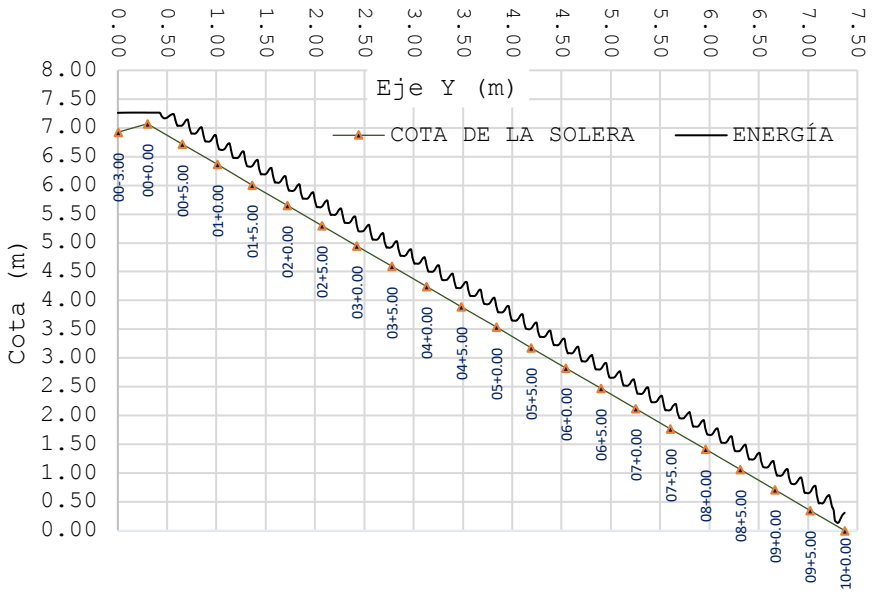


Figura 66. Perfil de la energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P30_0.20b_0+0.000.

En la Figura 67 se presenta en rango de colores de la energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal.

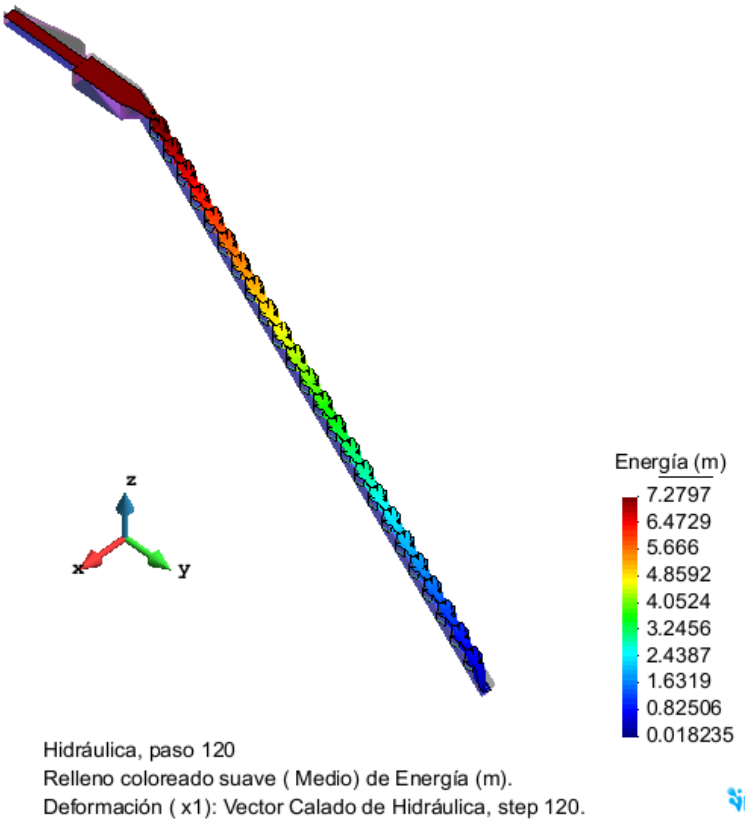


Figura 67. Energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal del S45_P30_0.20b_0+0.000.

II. ANÁLISIS EN LA SECCIÓN LONGITUDINAL 0+0.060m.

a) Código: S45_P30_0.20b_0+0.060

b) Perfil de la solera de la rápida.

En la Figura 57 se visualiza el perfil de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

En la Figura 63 se presenta en rango de colores la cota topográfica de la solera en el paso 0 (t=0s) del canal.

c) Energía Específica.

La determinación de energía específica del flujo obedece a la Ecuación (33).

En la Figura 68 se visualiza el perfil de la energía específica hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53). Los datos tabulares y gráficos usados para determinar la energía específica del flujo de agua a lo largo de la rápida se detallan en el Anexo 2 (Gráfico 11, Gráfico 12, Gráfico 13, Gráfico 14 y Gráfico 15).

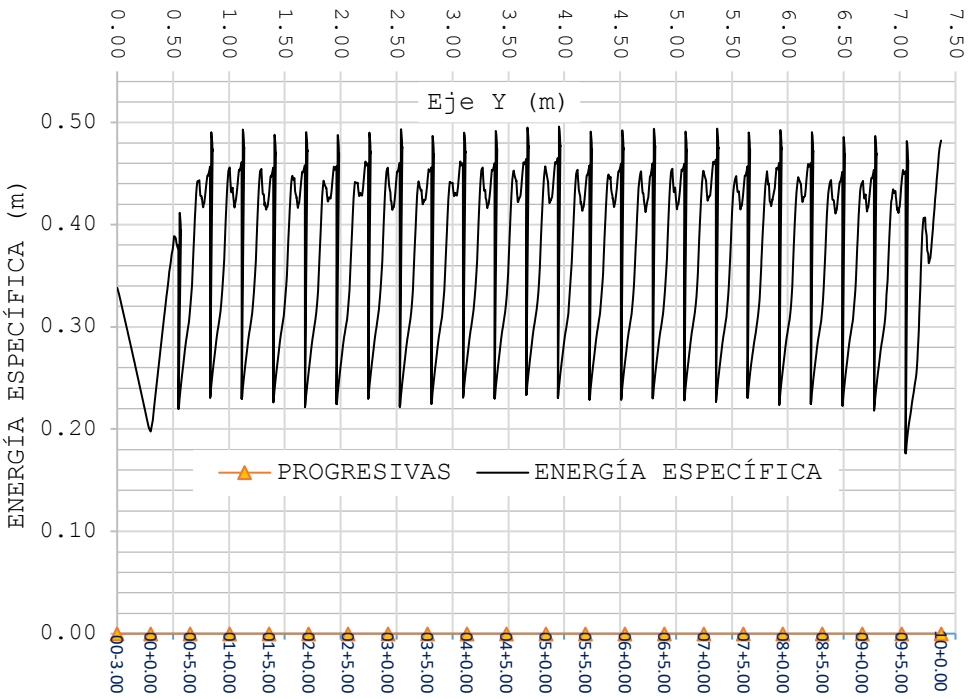


Figura 68. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P30_0.20b_0+0.060.

En la Figura 69 se visualiza la variación del Número de Froude a lo largo de la rápida.

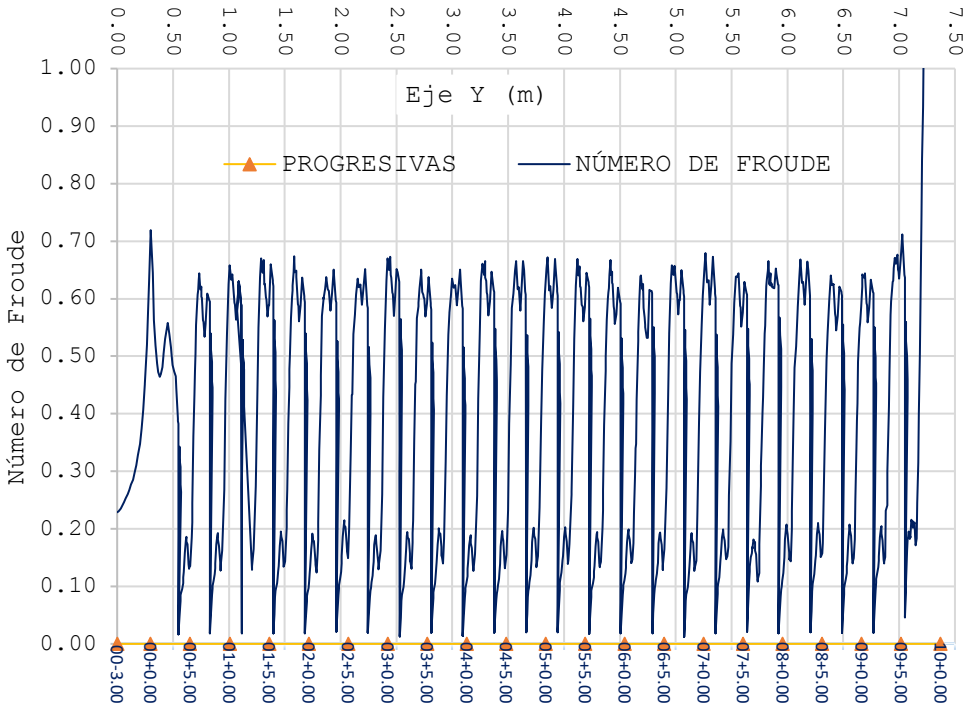


Figura 69. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P30_0.20b_0+0.060.

d) Energía total del flujo de agua.

La determinación de Energía Total del flujo obedece a la Ecuación (24).

En la Figura 70 se visualiza el perfil de la energía total hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

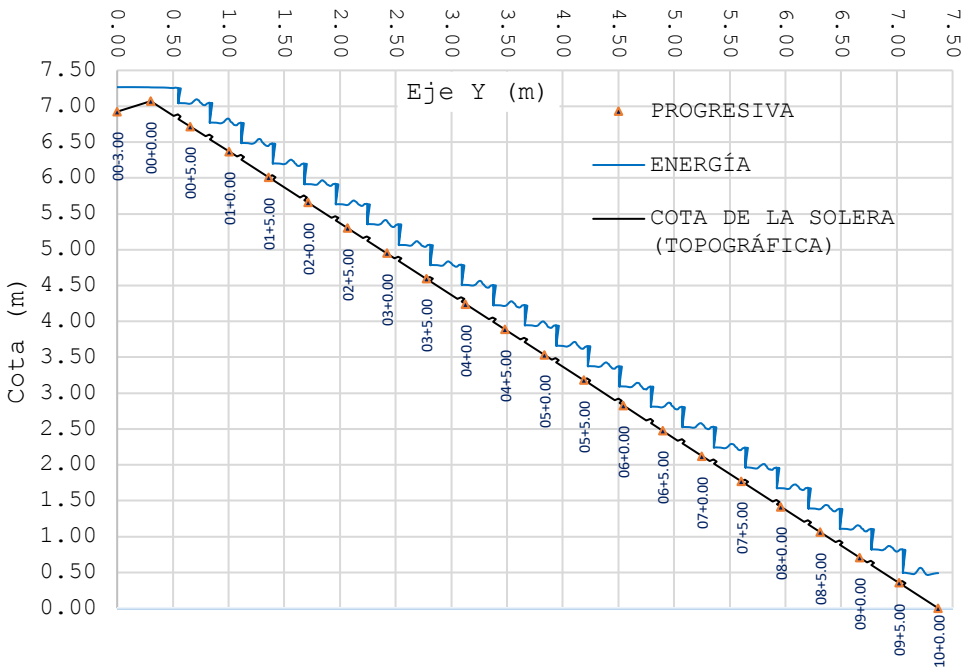


Figura 70. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P30_0.20b_0+0.060.

En la Figura 67 se presenta en rango de colores de la energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal.

III. ANÁLISIS EN LA SECCIÓN LONGITUDINAL 0-0.06m.

a) Código: S45_P30_0.20b_0-0.060

b) Perfil de la solera de la rápida.

En la Figura 57 se visualiza el perfil de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de

referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

En la Figura 63 se presenta en rango de colores la cota topográfica de la solera en el paso 0 (t=0s) del canal.

c) Energía Específica.

La determinación de energía específica del flujo obedece a la Ecuación (33).

En la Figura 71 se visualiza el perfil de la energía específica hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53). Los datos tabulares y gráficos usados para determinar la energía específica del flujo de agua a lo largo de la rápida se detallan en el Anexo 2 (Gráfico 16, Gráfico 17, Gráfico 18, Gráfico 19 y Gráfico 20).

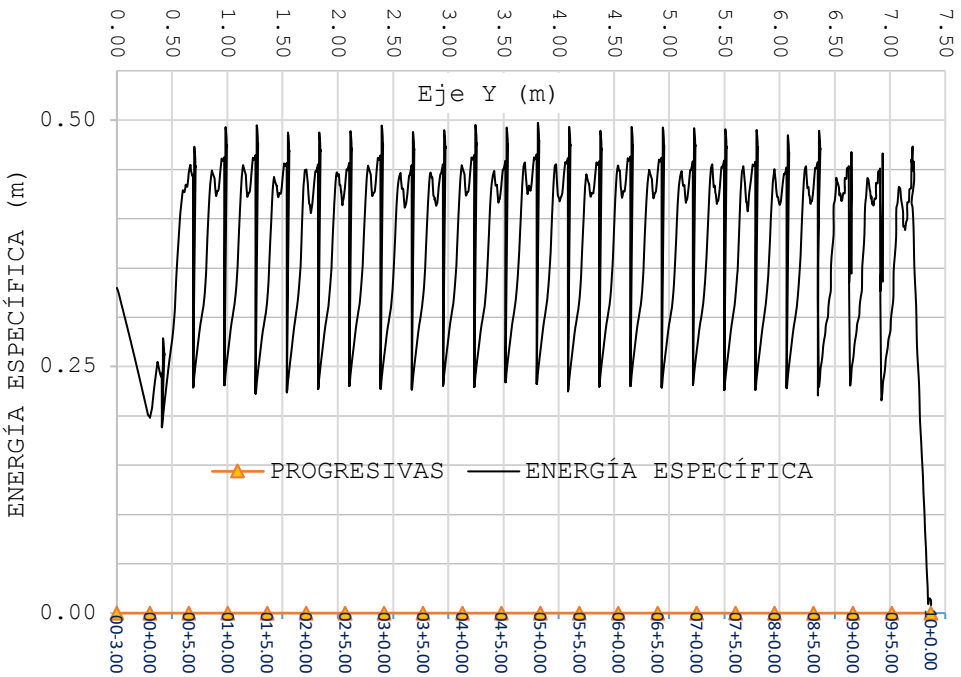


Figura 71. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P30_0.20b_0-0.060.

En la Figura 72 se visualiza la variación del Número de Froude a lo largo de la rápida.

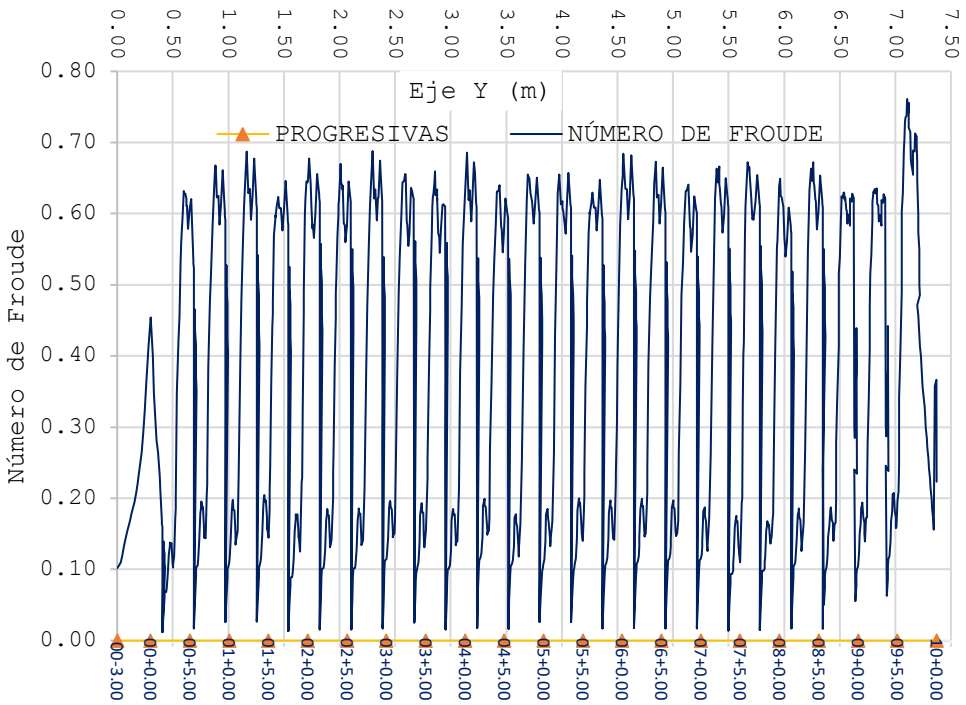


Figura 72. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P30_0.20b_0-0.060.

d) Energía total del flujo de agua.

La determinación de Energía Total del flujo obedece a la Ecuación (24).

En la Figura 73 se visualiza el perfil de la energía total hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

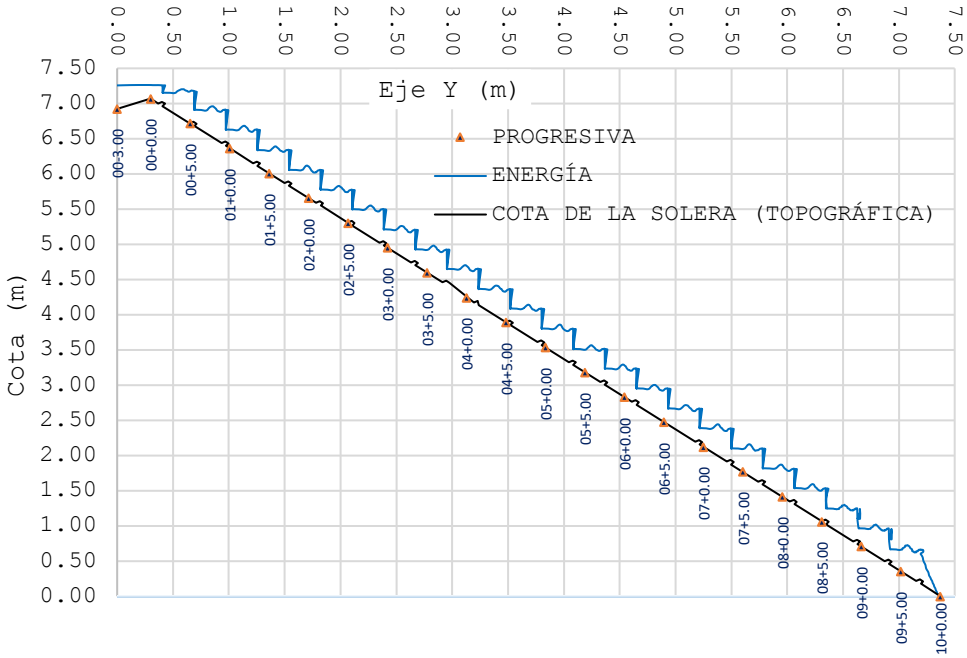


Figura 73. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P30_0.20b_0-0.060.

En la Figura 67 se presenta en rango de colores de la energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal.

IV. ANÁLISIS DE LA ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA ESPECÍFICA Y ESTADO DE FLUJO.

Análisis de la estimación de la energía específica y estado de flujo.

El resumen del análisis estadístico de la energía específica al largo del canal se detalla en la Tabla 5, Figura 127 y Figura 128.

5.1.2.3 CANAL DE CONCRETO DE 100% DE PENDIENTE CON PANTALLAS DE 45° DE DEFLEXIÓN.

5.1.2.3.1 Análisis Numérico con el Software Iber 2.4.2:

Con los datos de la Tabla 4 y aplicación del software Iber 2.4.2 se determina el tirante (calado), velocidad y energía específica del flujo.

I. ANÁLISIS EN LA SECCIÓN LONGITUDINAL 0+0.00m.

a) Código: S45_P45_0.20b_0+0.000

b) Perfil de la solera de la rápida.

En la Figura 57 se visualiza el perfil de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

En la Figura 74 se presenta en rango de colores la cota topográfica de la solera en el paso 0 (t=0s) del canal.

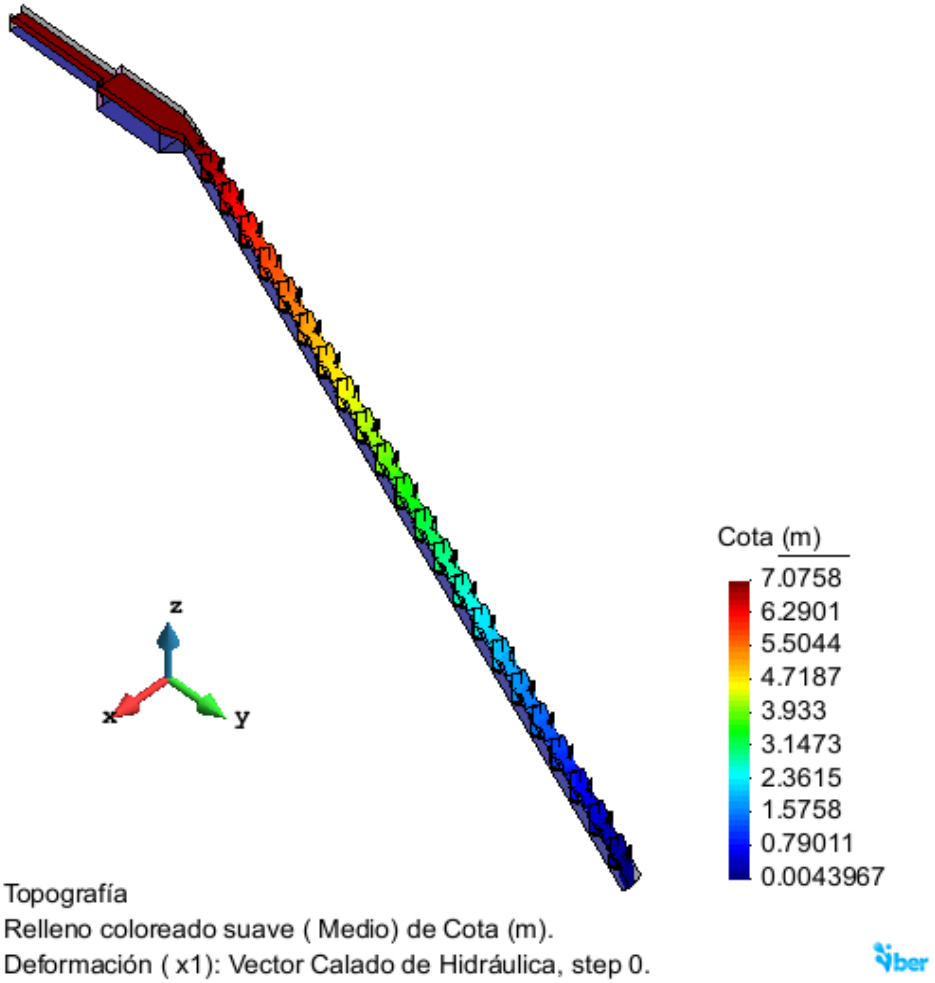


Figura 74. Cota topográfica de la solera en el paso 0 (t=0s) del S45_P45_0.20b_0+0.000.

c) Energía Específica.

La determinación de energía específica del flujo obedece a la Ecuación (33).

En la Figura 75 se visualiza el perfil de la energía específica hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53). Los datos tabulares y gráficos usados para determinar la energía específica del flujo de agua a lo largo de la rápida se detallan en el Anexo 2 (Gráfico 21, Gráfico 22, Gráfico 23, Gráfico 24 y Gráfico 25).

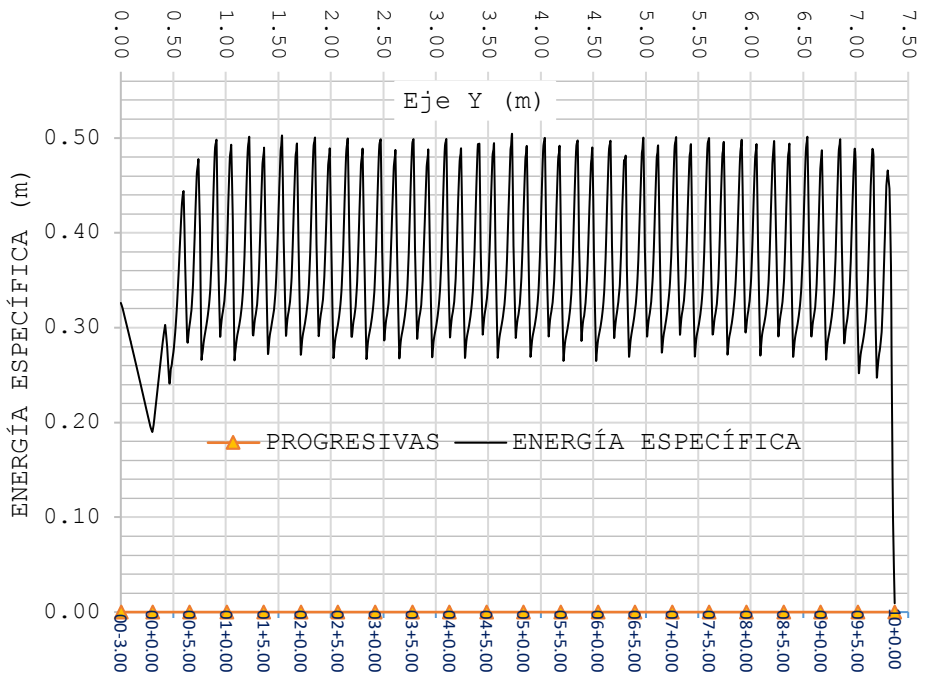


Figura 75. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P45_0.20b_0+0.000.

En la Figura 76 se visualiza la variación del Número de Froude a lo largo de la rápida.

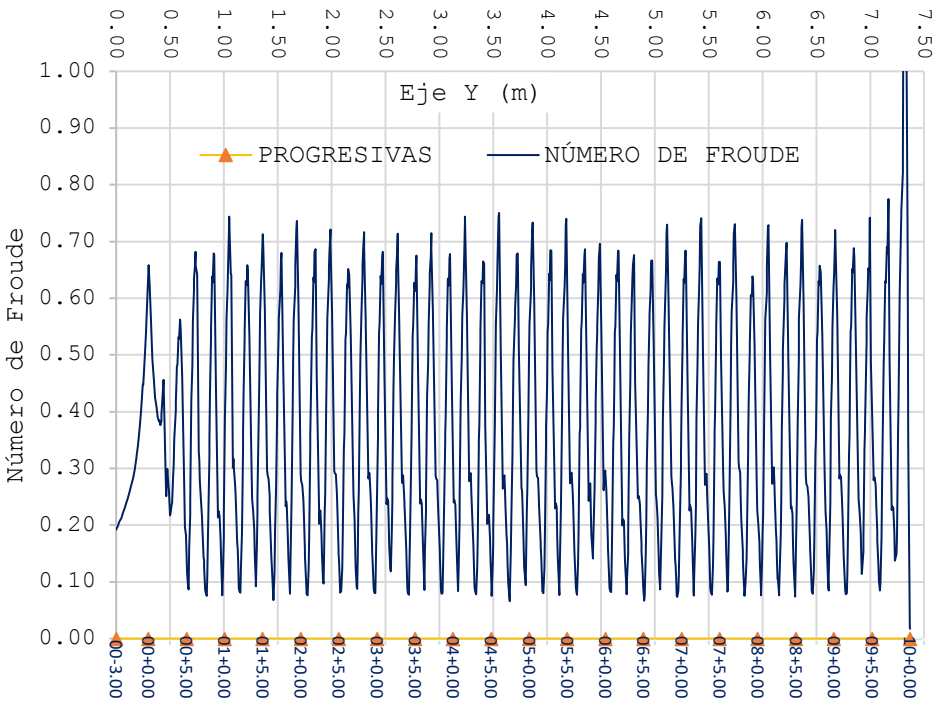


Figura 76. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P45_0.20b_0+0.000.

d) Energía total del flujo de agua.

La determinación de Energía Total del flujo obedece a la Ecuación (24).

En la Figura 77 se visualiza el perfil de la energía total hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

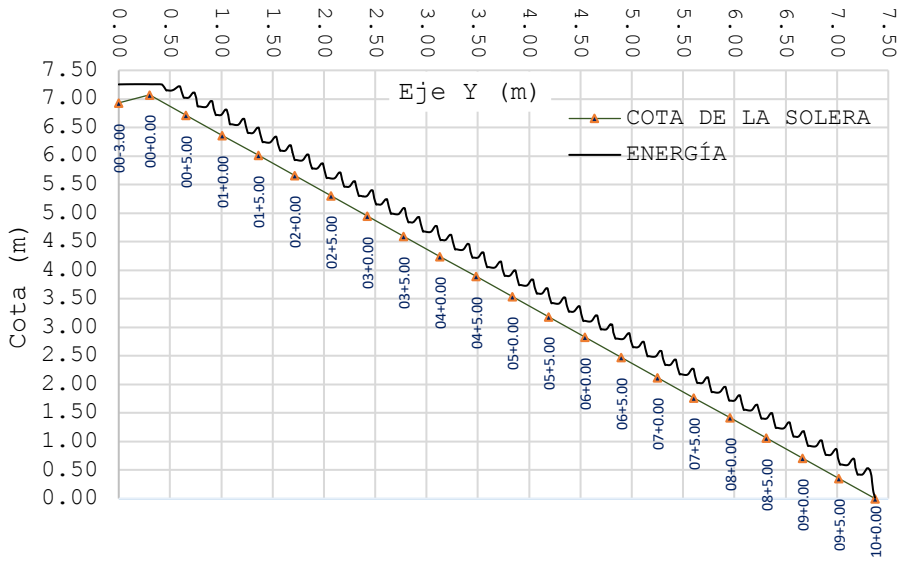


Figura 77. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P45_0.20b_0+0.000.

En la Figura 78 se presenta en rango de colores de la energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal.

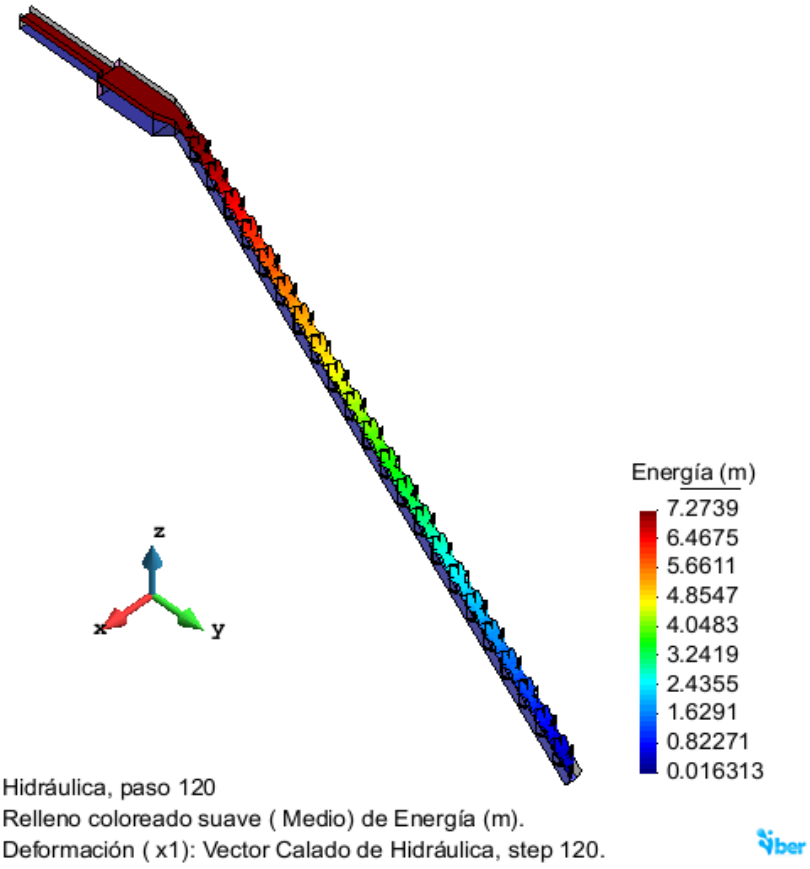


Figura 78. Energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del S45_P45_0.20b_0+0.000.

II. ANÁLISIS EN LA SECCIÓN LONGITUDINAL 0+0.06m.

a) Código: S45_P45_0.20b_0+0.060

b) Perfil de la solera de la rápida.

En la Figura 57 se visualiza el perfil de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

En la Figura 74 se presenta en rango de colores la cota topográfica de la solera en el paso 0 (t=0s) del canal.

c) Energía Específica.

La determinación de energía específica del flujo obedece a la Ecuación (33).

En la Figura 79 se visualiza el perfil de la energía específica hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53). Los datos tabulares y gráficos usados para determinar la energía específica del flujo de agua a lo largo de la rápida se detallan en el Anexo 2 (Gráfico 26, Gráfico 27, Gráfico 28,Gráfico 29 y Gráfico 30).

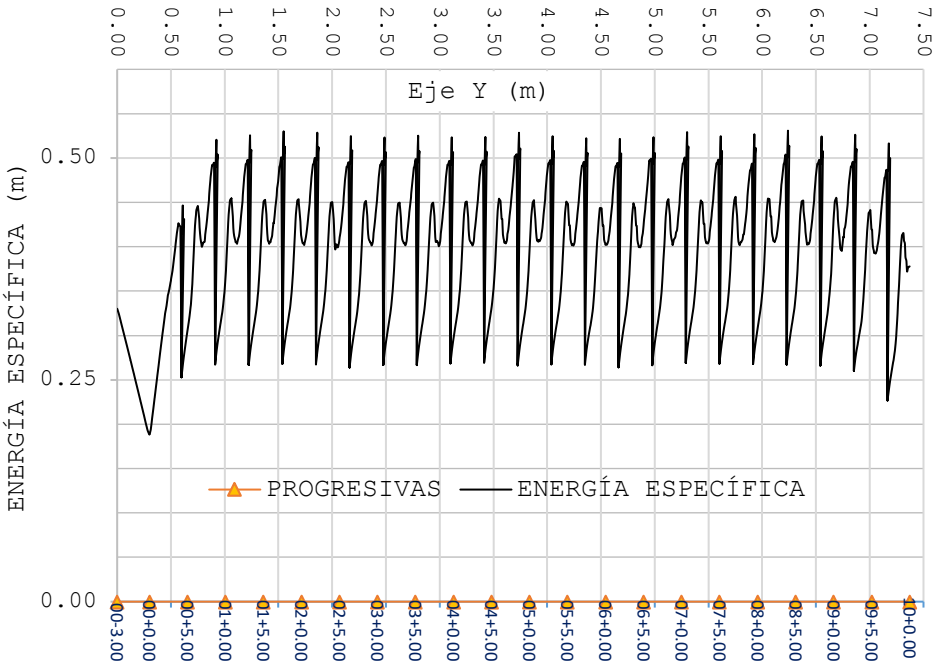


Figura 79. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P45_0.20b_0+0.060.

En la Figura 80 se visualiza la variación del Número de Froude a lo largo de la rápida.

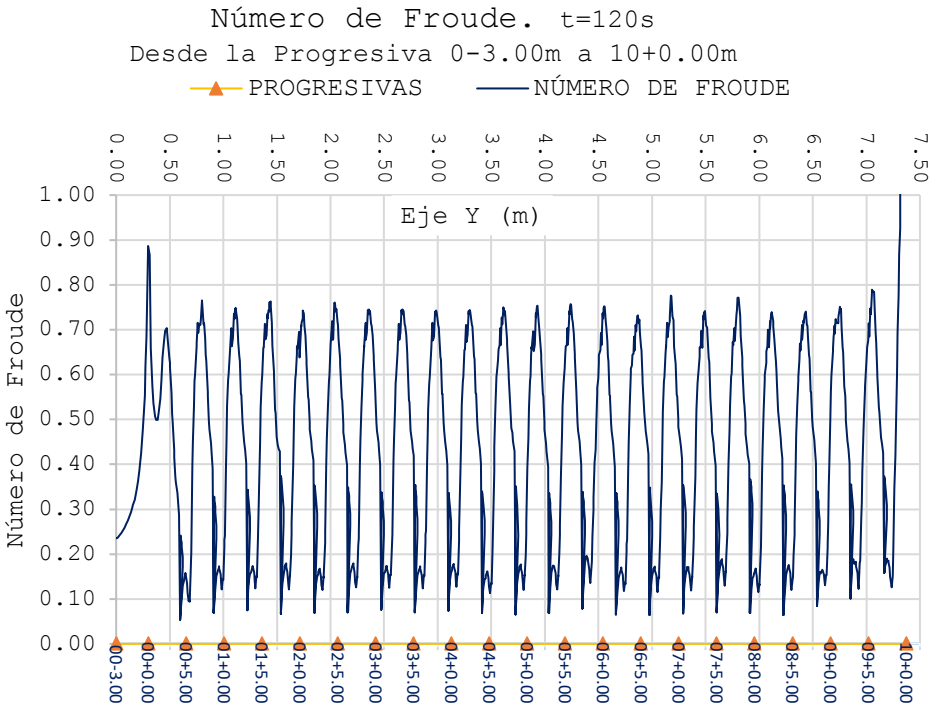


Figura 80. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P45_0.20b_0+0.060.

d) Energía total del flujo de agua.

La determinación de Energía Total del flujo obedece a la Ecuación (24).

En la Figura 81 se visualiza el perfil de la energía total hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

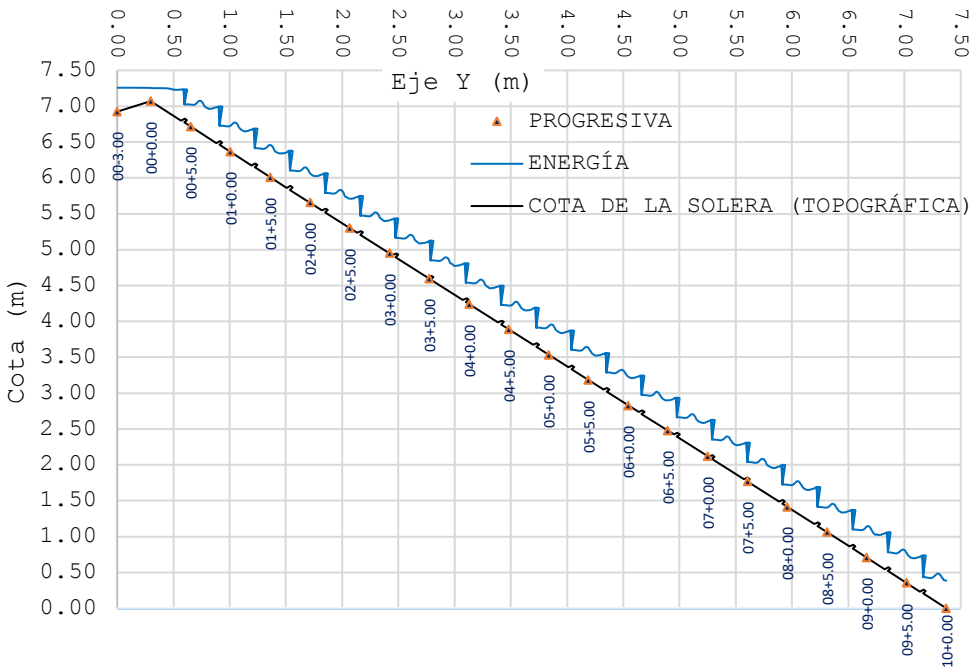


Figura 81. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P45_0.20b_0+0.060.

En la Figura 78 se presenta en rango de colores de la energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal.

III. ANÁLISIS EN LA SECCIÓN LONGITUDINAL 0-0.06m.

a) Código: S45_P45_0.20b_0-0.060

b) Perfil de la solera de la rápida.

En la Figura 57 se visualiza el perfil de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de

referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

En la Figura 74 se presenta en rango de colores la cota topográfica de la solera en el paso 0 (t=0s) del canal.

c) Energía Específica.

La determinación de energía específica del flujo obedece a la Ecuación (33).

En la Figura 82 se visualiza el perfil de la energía específica hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53). Los datos tabulares y gráficos usados para determinar la energía específica del flujo de agua a lo largo de la rápida se detallan en el Anexo 2 (Gráfico 31, Gráfico 32, Gráfico 33, Gráfico 34 y Gráfico 35).

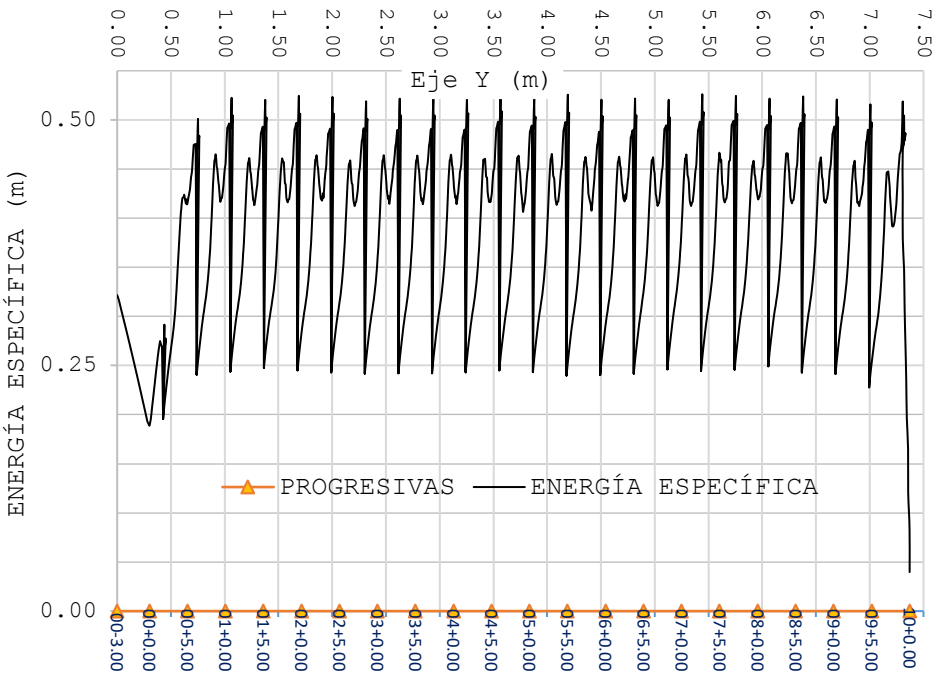


Figura 82. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P45_0.20b_0-0.060.

En la Figura 83 se visualiza la variación del Número de Froude a lo largo de la rápida.

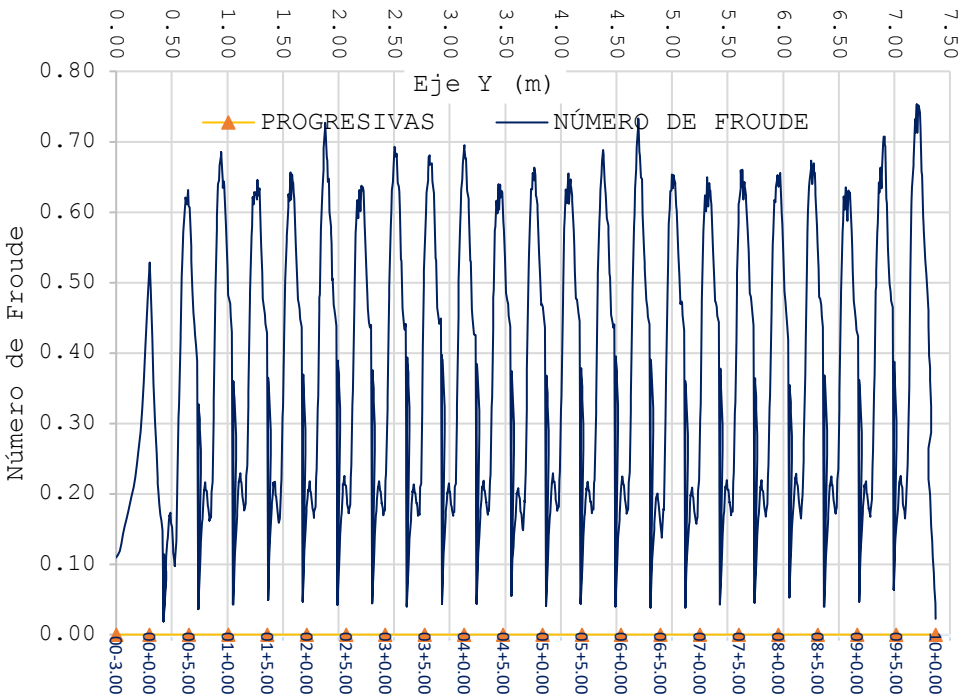


Figura 83. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P45_0.20b_0-0.060.

d) Energía total del flujo de agua.

La determinación de Energía Total del flujo obedece a la Ecuación (24).

En la Figura 84 se visualiza el perfil de la energía total hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

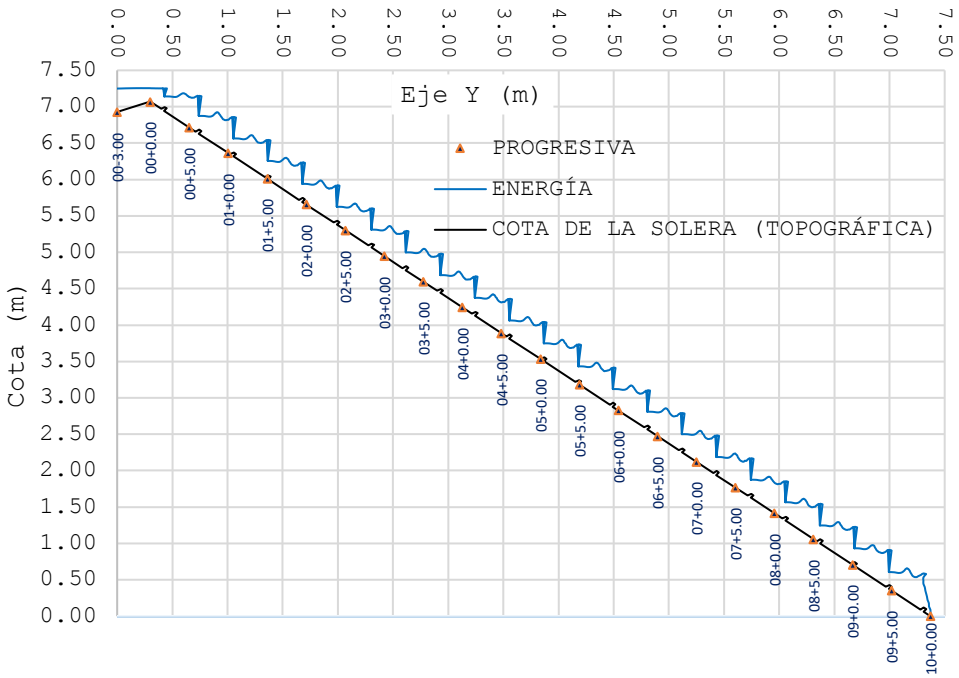


Figura 84. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P45_0.20b_0-0.060.

En la Figura 78 se presenta en rango de colores de la energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal.

IV. ANÁLISIS DE LA ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA ESPECÍFICA Y ESTADO DE FLUJO.

Análisis de la estimación de la energía específica y estado de flujo.

El resumen del análisis estadístico de la energía específica al largo del canal se detalla en la Tabla 5, Figura 127 y Figura 128.

5.1.2.4 CANAL DE CONCRETO DE 100% DE PENDIENTE CON PANTALLAS DE 60° DE DEFLEXIÓN.

5.1.2.4.1 Análisis Numérico con el Software Iber 2.4.2:

Con los datos de la Tabla 4 y aplicación del software Iber 2.4.2 se determina el tirante (calado), velocidad y energía específica del flujo.

I. ANÁLISIS EN LA SECCIÓN LONGITUDINAL 0+0.00m.

a) Código: S45_P60_0.20b_0+0.000

b) Perfil de la solera de la rápida.

En la Figura 57 se visualiza el perfil de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

En la Figura 85 se presenta en rango de colores la cota topográfica de la solera en el paso 0 (t=0s) del canal.

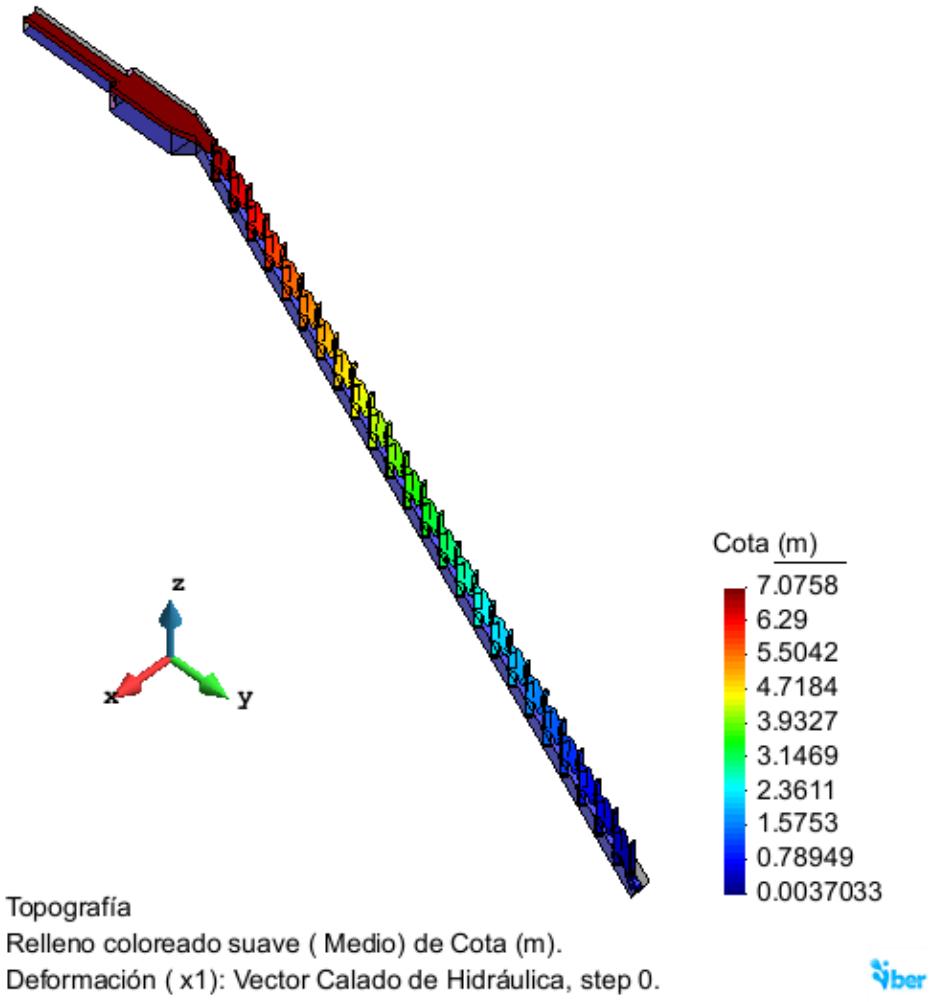


Figura 85. Cota topográfica de la solera en el paso 0 (t=0s) del S45_P60_0.20b_0+0.000.

c) Energía Específica.

La determinación de energía específica del flujo obedece a la Ecuación (33).

En la Figura 86 se visualiza el perfil de la energía específica hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53). Los datos tabulares y gráficos usados para determinar la energía específica del flujo de agua a lo largo de la rápida se detallan en el Anexo 2 (Gráfico 36, Gráfico 37, Gráfico 38, Gráfico 39 y Gráfico 40).

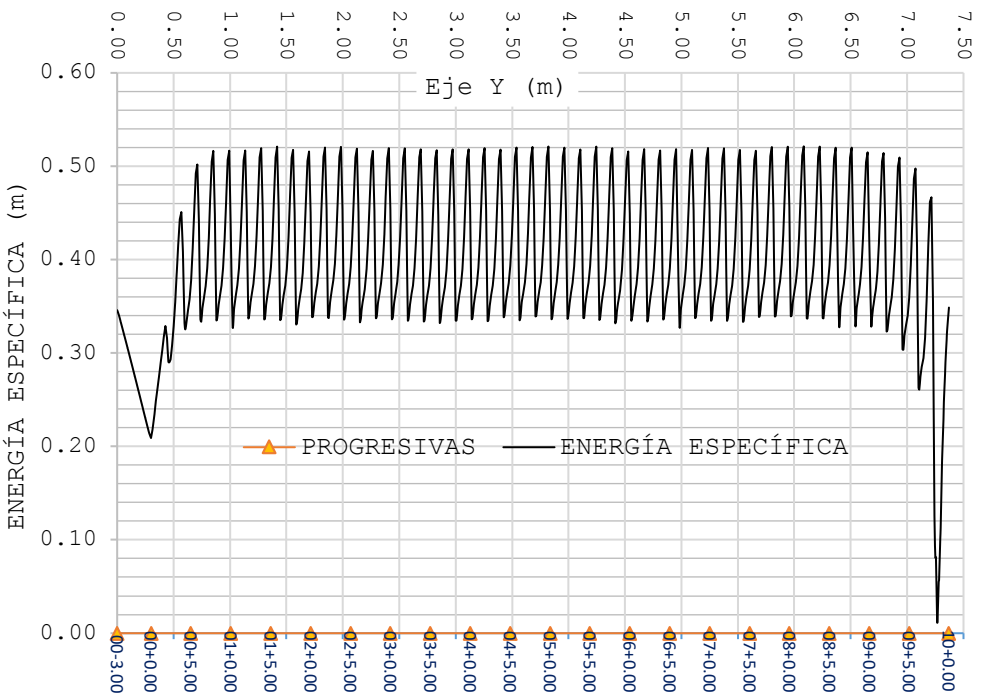


Figura 86. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P60_0.20b_0+0.000.

En la Figura 87 se visualiza la variación del Número de Froude a lo largo de la rápida.

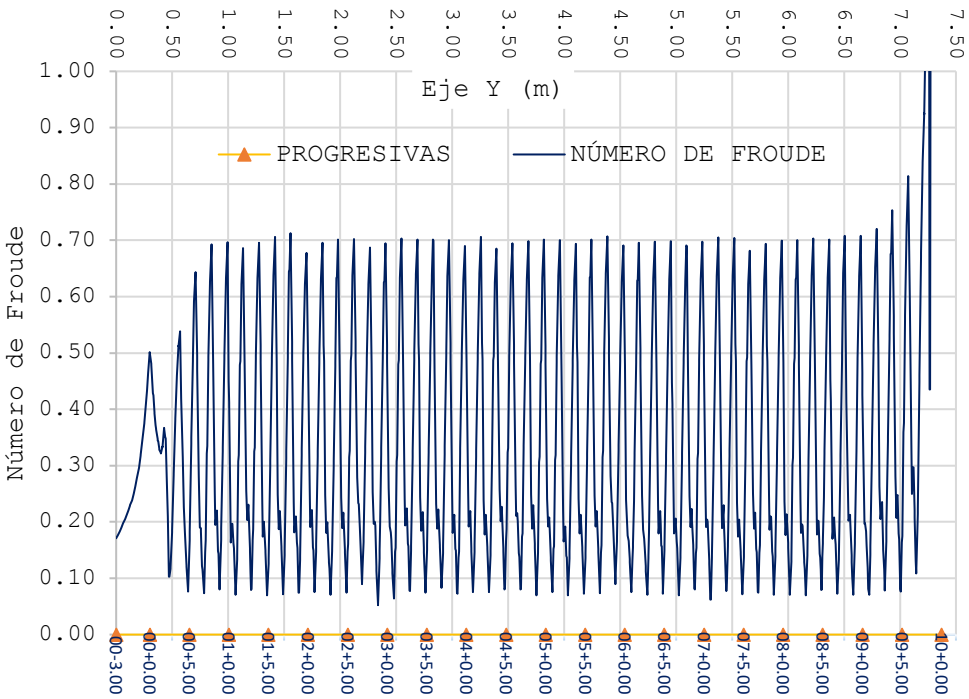


Figura 87. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P60_0.20b_0+0.000.

d) Energía total del flujo de agua.

La determinación de Energía Total del flujo obedece a la Ecuación (24).

En la Figura 88 se visualiza el perfil de la energía total hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

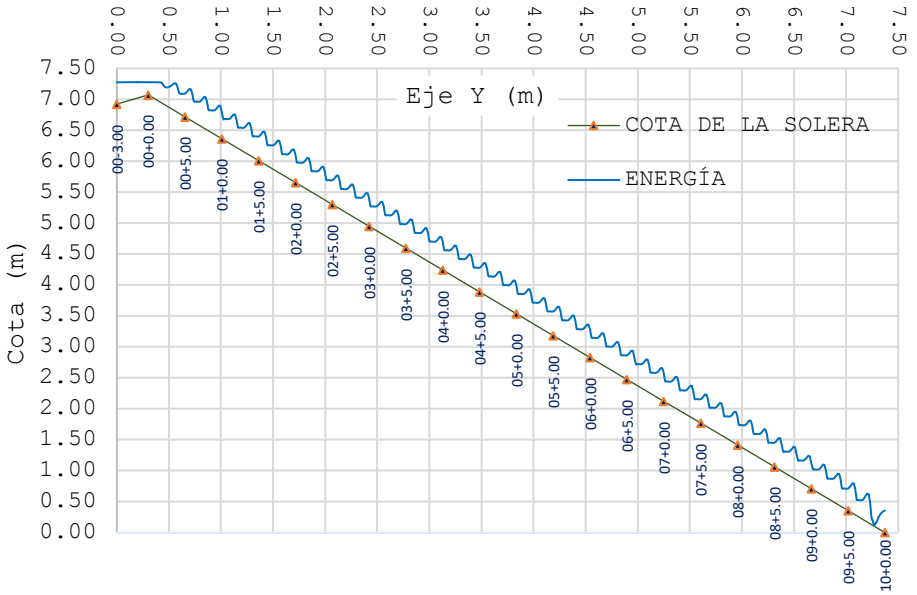


Figura 88. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P60_0.20b_0+0.000.

En la Figura 89 se presenta en rango de colores de la energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal.

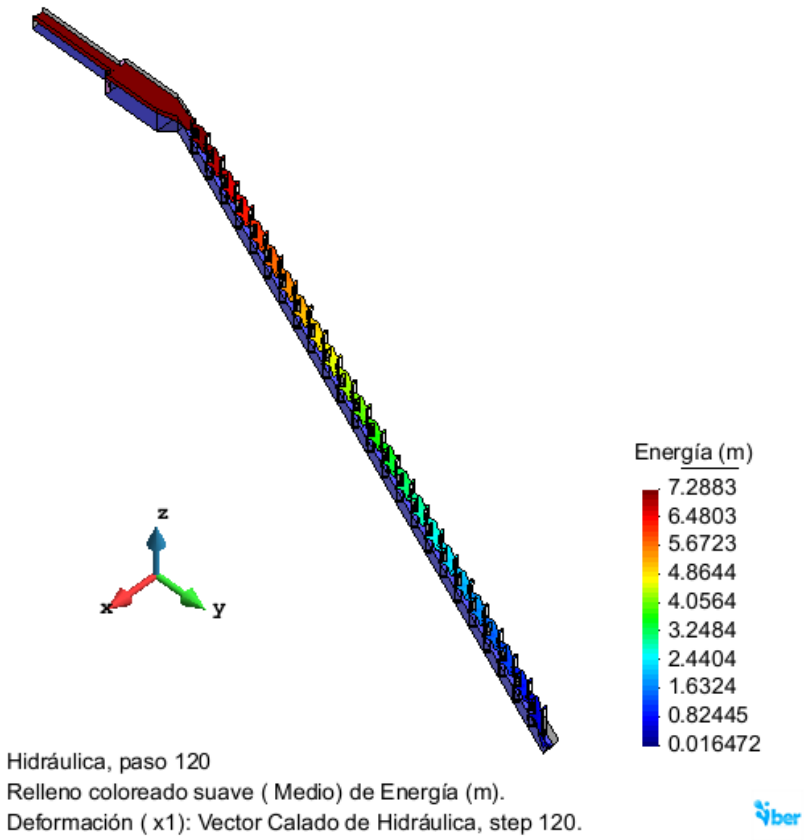


Figura 89. Energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del S45_P60_0.20b_0+0.000.

II. ANÁLISIS EN LA SECCIÓN LONGITUDINAL 0+0.06m.

a) Código: S45_P60_0.20b_0+0.060

b) Perfil de la solera de la rápida.

En la Figura 57 se visualiza el perfil de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

En la Figura 85 se presenta en rango de colores la cota topográfica de la solera en el paso 0 (t=0s) del canal.

c) Energía Específica.

La determinación de energía específica del flujo obedece a la Ecuación (33).

En la Figura 90 se visualiza el perfil de la energía específica hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53). Los datos tabulares y gráficos usados para determinar la energía específica del flujo de agua a lo largo de la rápida se detallan en el Anexo 2 (Gráfico 41, Gráfico 42, Gráfico 43 y Gráfico 44).

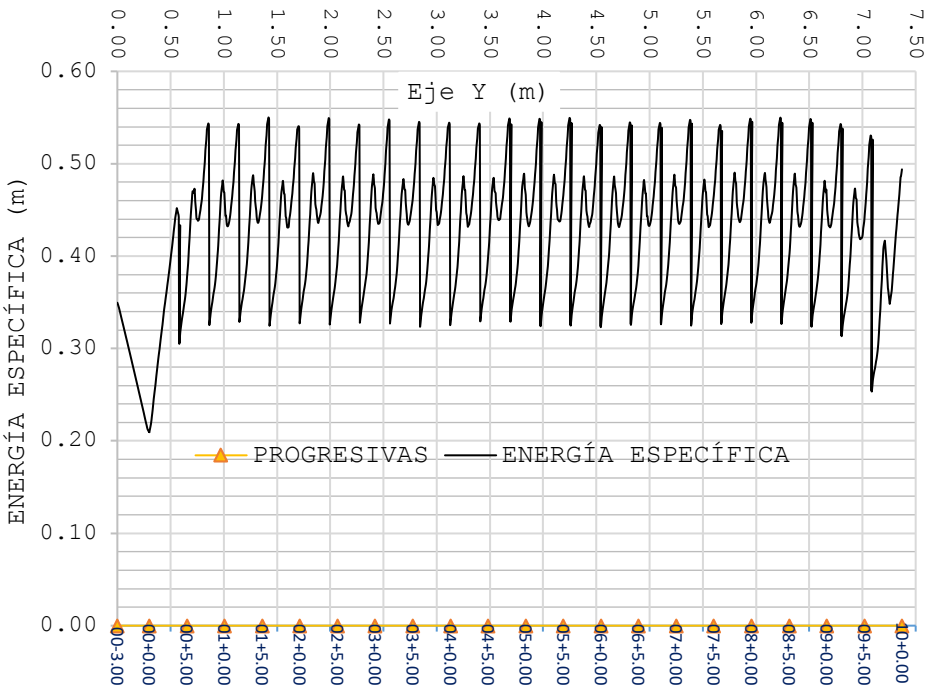


Figura 90. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P60_0.20b_0+0.060.

En la Figura 91 se visualiza la variación del Número de Froude a lo largo de la rápida.

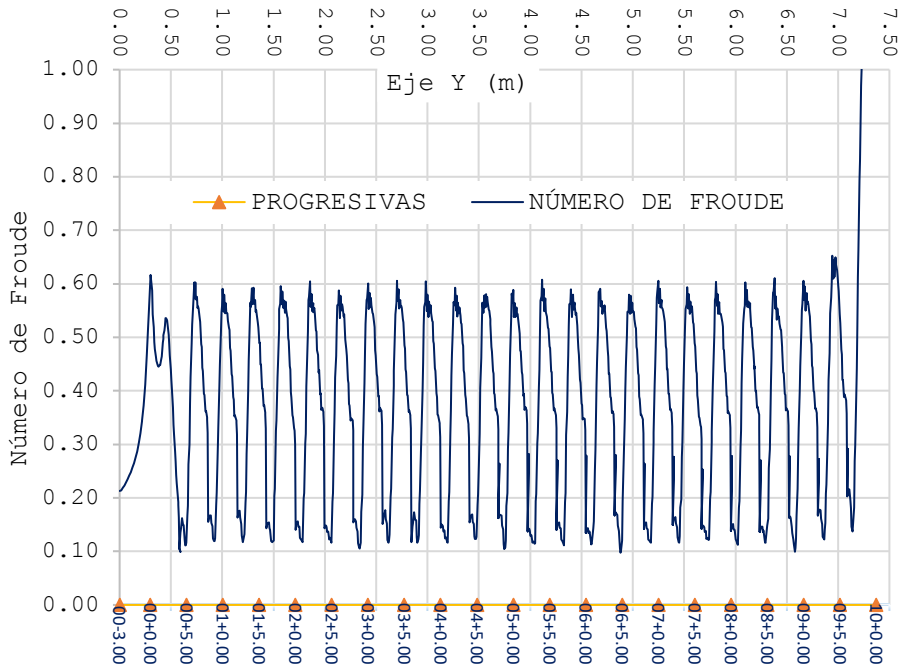


Figura 91. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P60_0.20b_0+0.060.

d) Energía total del flujo de agua.

La determinación de Energía Total del flujo obedece a la Ecuación (24).

En la Figura 92 se visualiza el perfil de la energía total hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

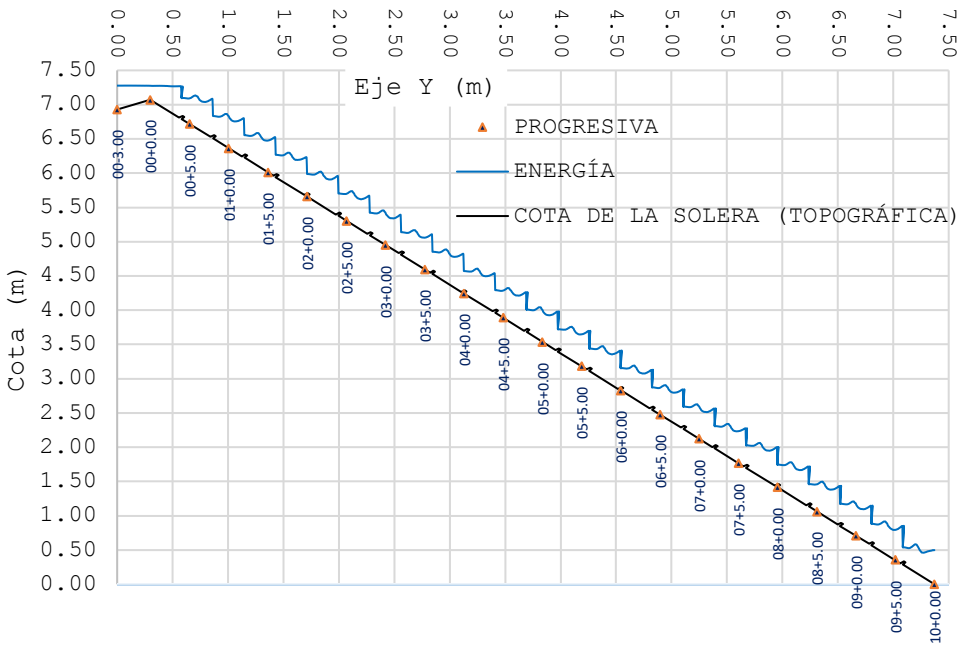


Figura 92. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P60_0.20b_0+0.060.

En la Figura 89 se presenta en rango de colores de la energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal.

III. ANÁLISIS EN LA SECCIÓN LONGITUDINAL 0-0.06m.

a) Código: S45_P60_0.20b_0-0.060

b) Perfil de la solera de la rápida.

En la Figura 57 se visualiza el perfil de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

En la Figura 85 se presenta en rango de colores la cota topográfica de la solera en el paso 0 (t=0s) del canal.

c) Energía Específica.

La determinación de energía específica del flujo obedece a la Ecuación (33).

En la Figura 93 se visualiza el perfil de la energía específica hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53). Los datos tabulares y gráficos usados para determinar la energía específica del flujo de agua a lo largo de la rápida se detallan en el Anexo 2 (Gráfico 45, Gráfico 46, Gráfico 47 y Gráfico 48).

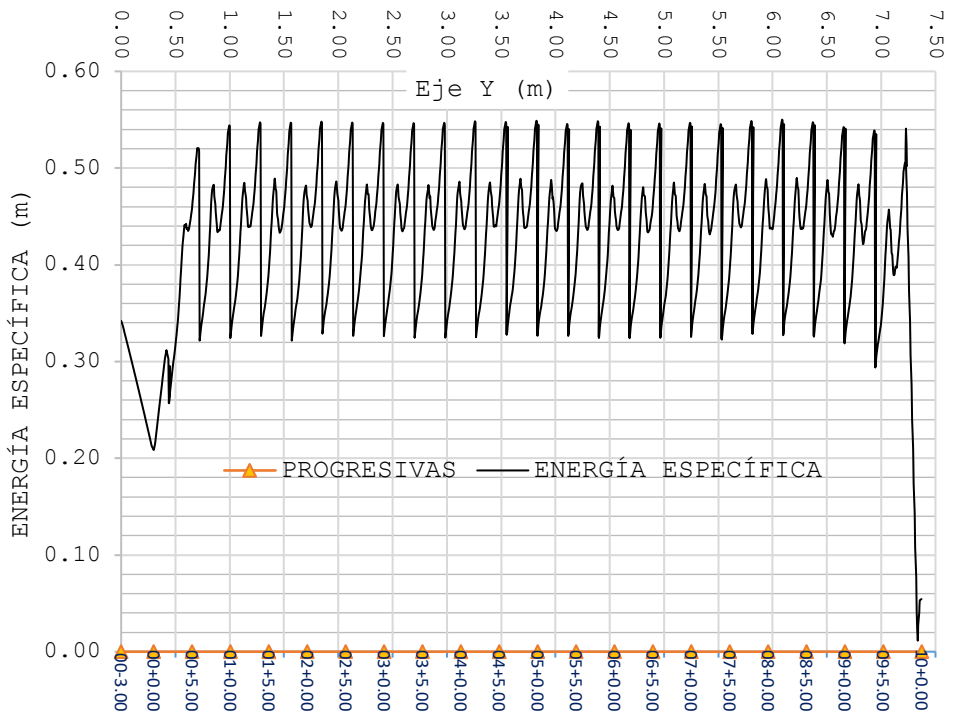


Figura 93. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P60_0.20b_0-0.060.

En la Figura 94 se visualiza la variación del Número de Froude a lo largo de la rápida.

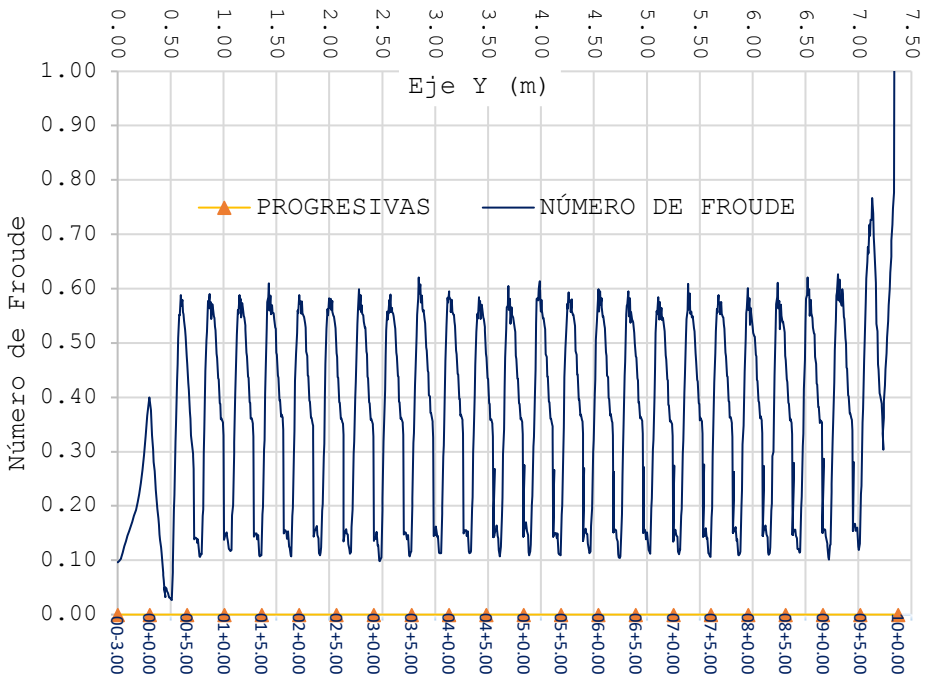


Figura 94. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P60_0.20b_0-0.060.

d) Energía total del flujo de agua.

La determinación de Energía Total del flujo obedece a la Ecuación (24).

En la Figura 95 se visualiza el perfil de la energía total hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

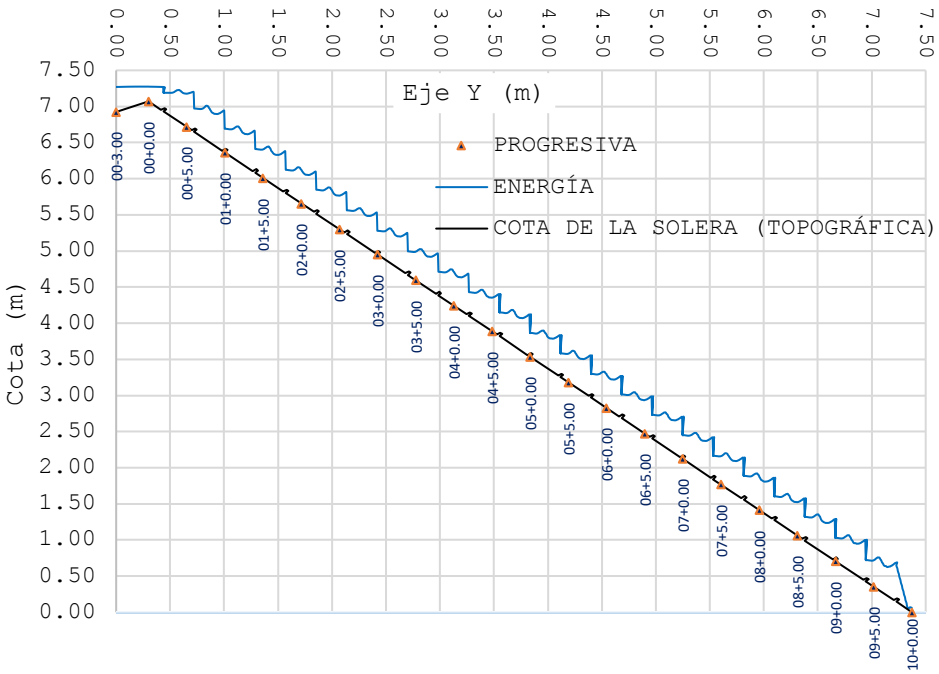


Figura 95. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P60_0.20b_0-0.060.

En la Figura 89 se presenta en rango de colores de la energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal.

IV. ANÁLISIS DE LA ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA ESPECÍFICA Y ESTADO DE FLUJO.

Análisis de la estimación de la energía específica y Estado de Flujo.

El resumen del análisis estadístico de la energía específica al largo del canal se detalla en la Tabla 5, Figura 127 y Figura 128.

5.1.2.5 CANAL DE CONCRETO DE 100% DE PENDIENTE CON PANTALLAS DE 75° DE DEFLEXIÓN.

5.1.2.5.1 Análisis Numérico con el Software Iber 2.4.2:

Con los datos de la Tabla 4 y aplicación del software Iber 2.4.2 se determina el tirante (calado), velocidad y energía específica del flujo.

I. ANÁLISIS EN LA SECCIÓN LONGITUDINAL 0+0.00m.

a) Código: S45_P75_0.20b_0+0.000

b) Perfil de la solera de la rápida.

En la Figura 57 se visualiza el perfil de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

En la Figura 96 se presenta en rango de colores la cota topográfica de la solera en el paso 0 (t=0s) del canal.

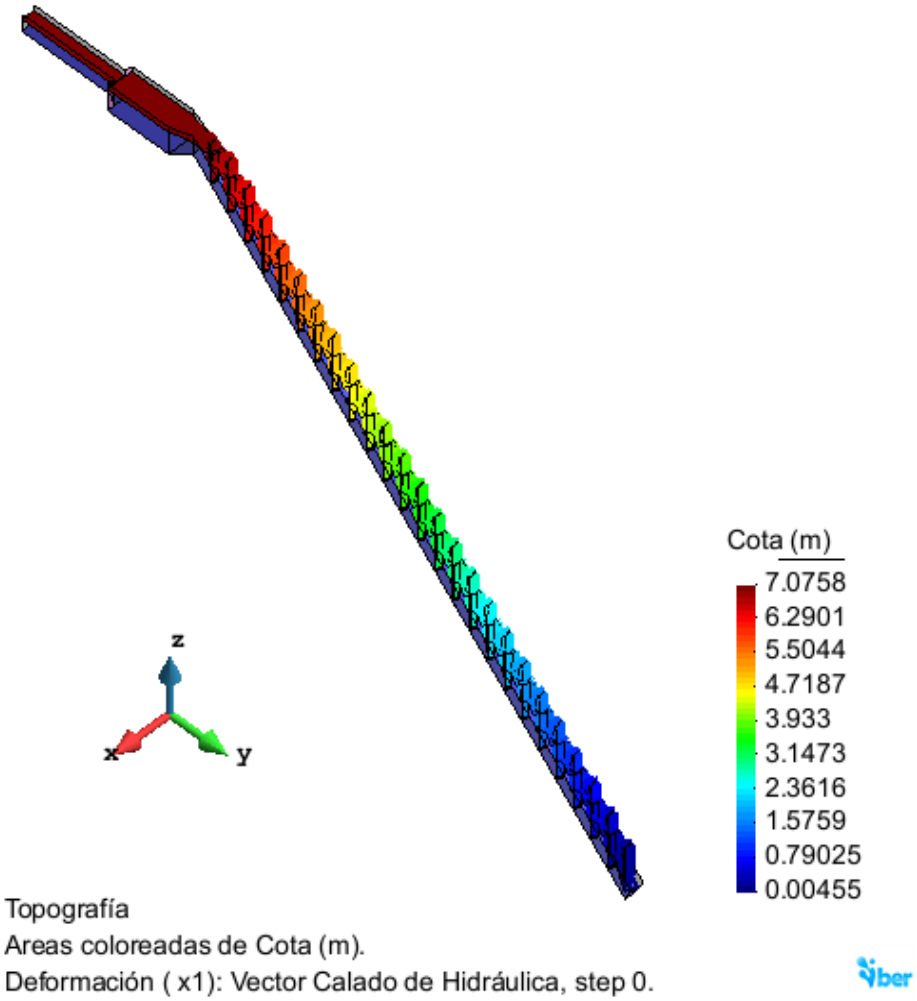


Figura 96. Cota topográfica de la solera en el paso (t=0s) del S45_P75_0.20b_0+0.000.

c) Energía Específica.

La determinación de energía específica del flujo obedece a la Ecuación (33).

En la Figura 97 se visualiza el perfil de la energía específica hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53). Los datos tabulares y gráficos usados para determinar la energía específica del flujo de agua a lo largo de la rápida se detallan en el Anexo 2 (Gráfico 49, Gráfico 50, Gráfico 51, Gráfico 52 y Gráfico 53).

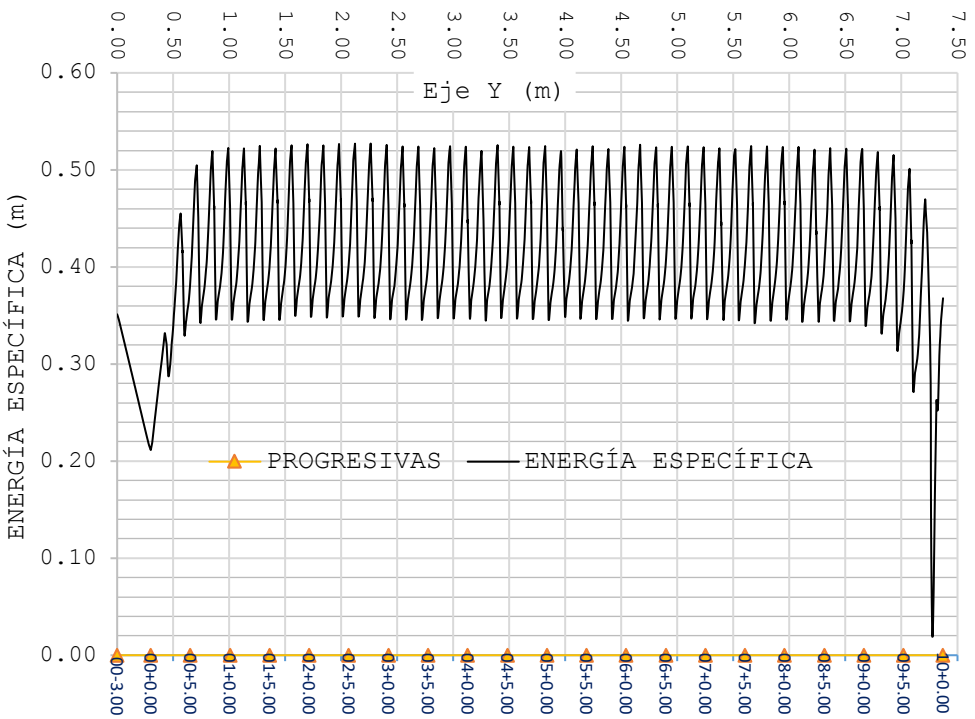


Figura 97. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P75_0.20b_0+0.000.

En la Figura 98 se visualiza la variación del Número de Froude a lo largo de la rápida.

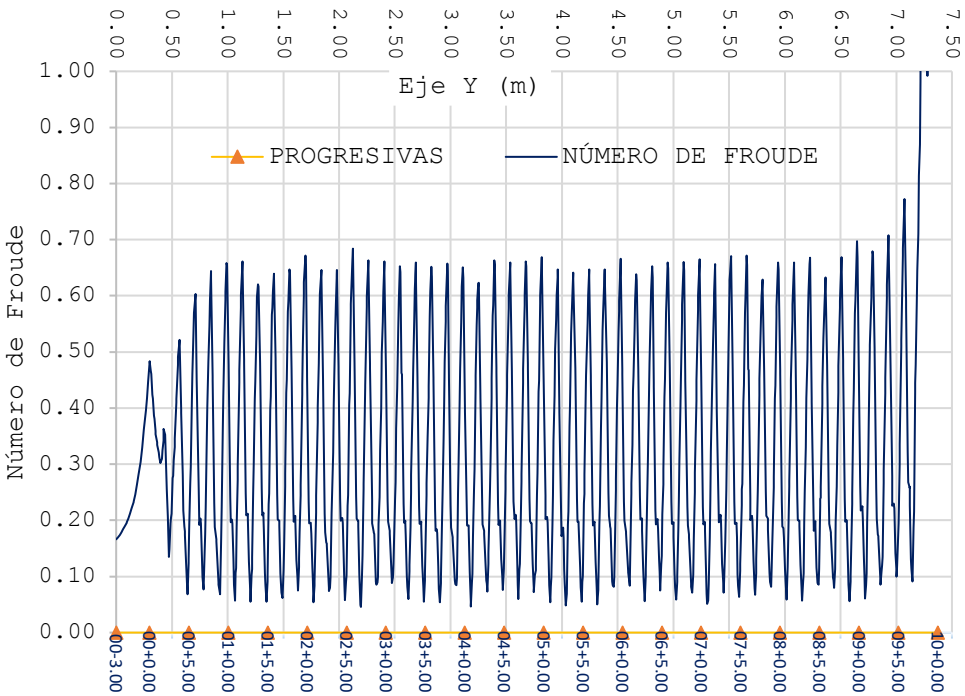


Figura 98. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P75_0.20b_0+0.000.

d) Energía total del flujo de agua.

La determinación de Energía Total del flujo obedece a la Ecuación (24).

En la Figura 99 se visualiza el perfil de la energía total hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

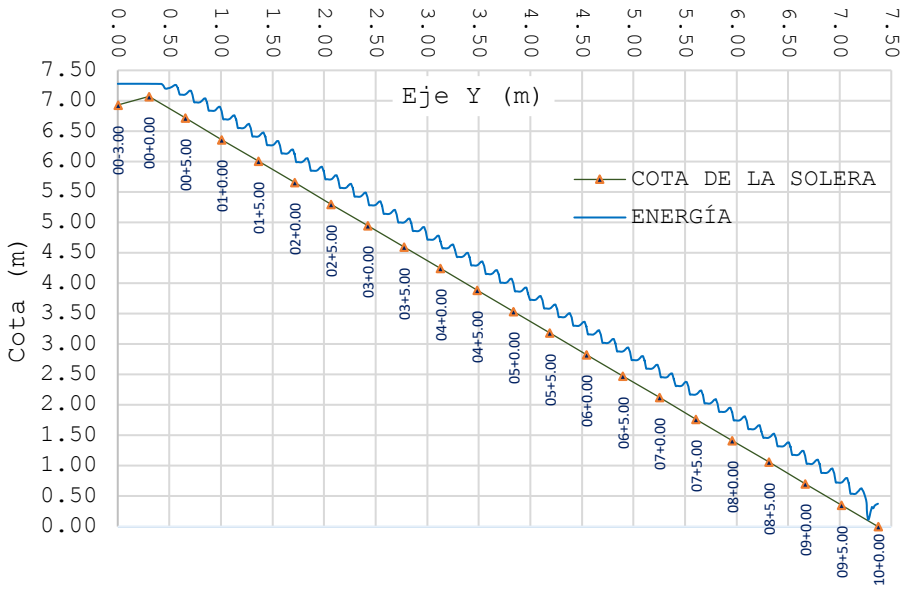


Figura 99. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P75_0.20b_0+0.000.

En la Figura 100 se presenta en rango de colores de la energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal.

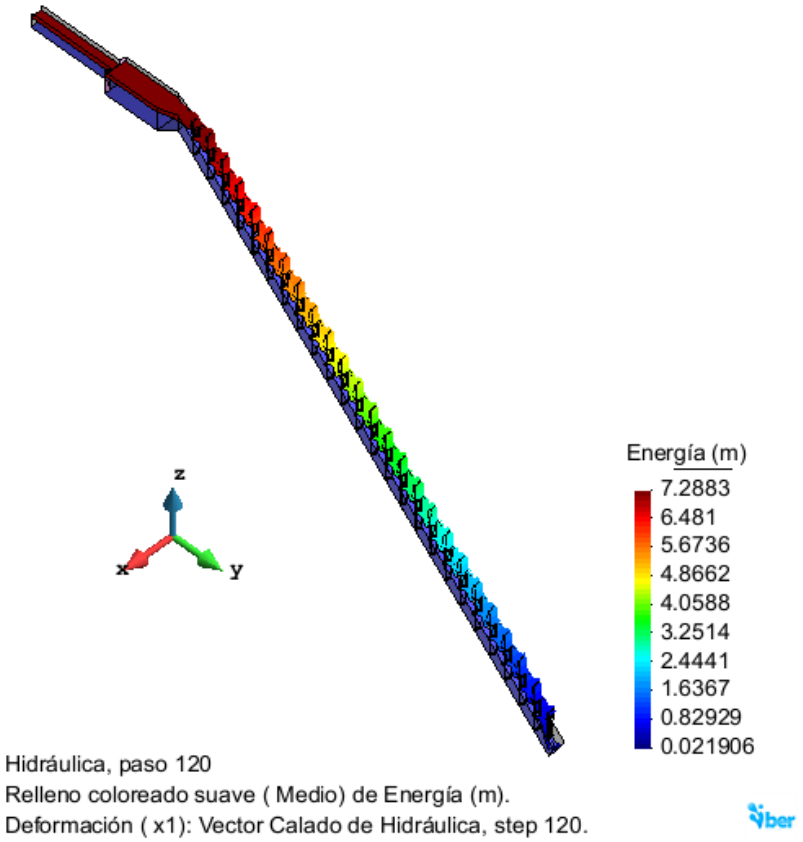


Figura 100. Energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del S45_P75_0.20b_0+0.000.

II. ANÁLISIS EN LA SECCIÓN LONGITUDINAL 0+0.06m.

a) Código: S45_P75_0.20b_0+0.060

b) Perfil de la solera de la rápida.

En la Figura 57 se visualiza el perfil de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

En la Figura 96 se presenta en rango de colores la cota topográfica de la solera en el paso 0 (t=0s) del canal.

c) Energía Específica.

La determinación de energía específica del flujo obedece a la Ecuación (33).

En la Figura 101 se visualiza el perfil de la energía específica hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53). Los datos tabulares y gráficos usados para determinar la energía específica del flujo de agua a lo largo de la rápida se detallan en el Anexo 2 (Gráfico 54,Gráfico 55, Gráfico 56 y Gráfico 57).

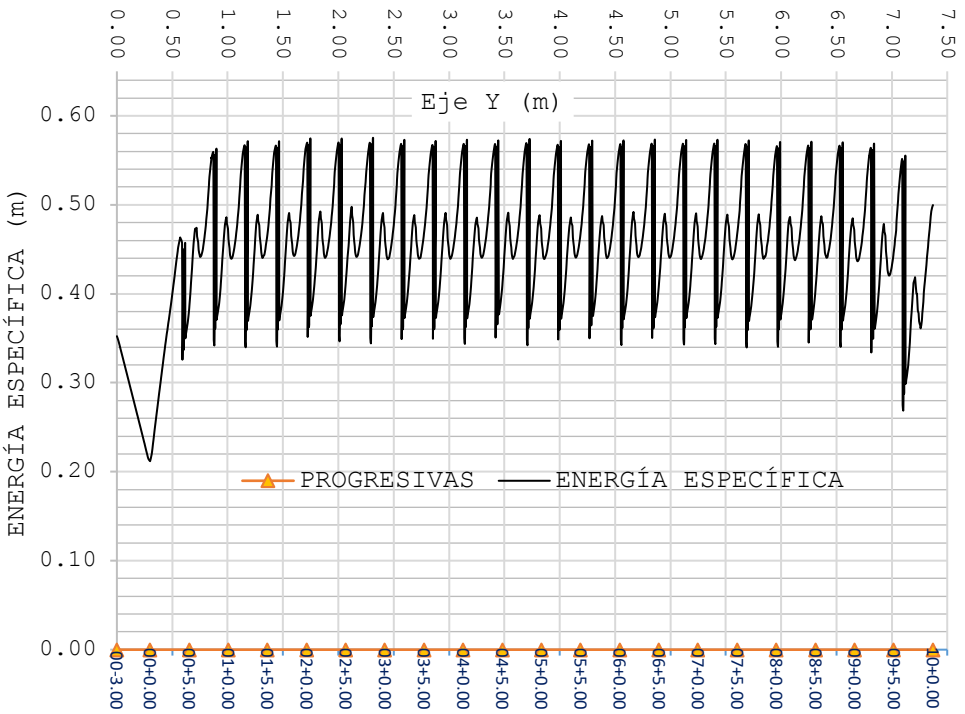


Figura 101. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P75_0.20b_0+0.060.

En la Figura 102 se visualiza la variación del Número de Froude a lo largo de la rápida.

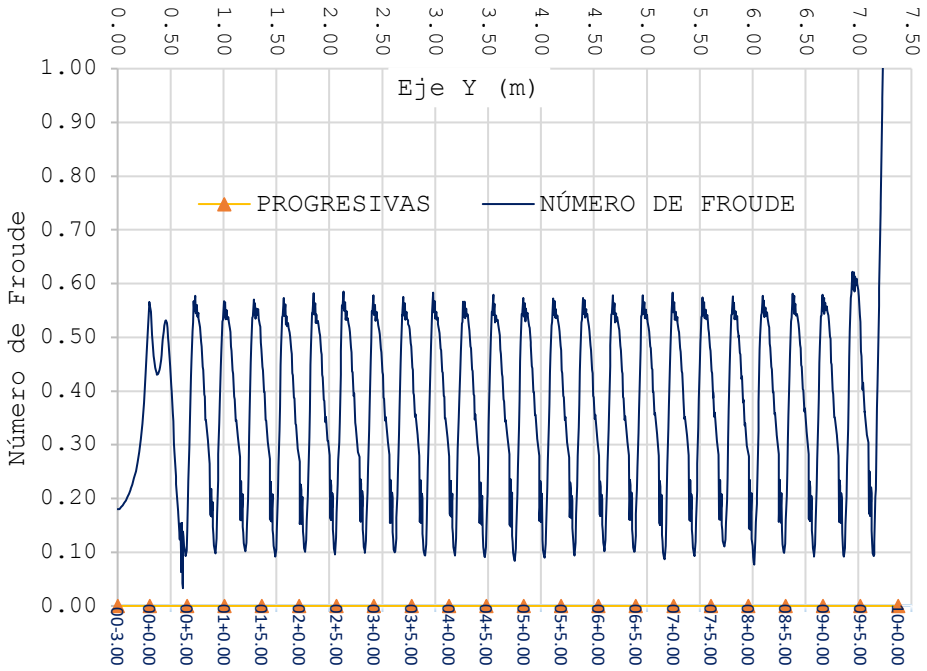


Figura 102. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P75_0.20b_0+0.060.

d) Energía total del flujo de agua.

La determinación de Energía Total del flujo obedece a la Ecuación (24).

En la Figura 103 se visualiza el perfil de la energía total hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

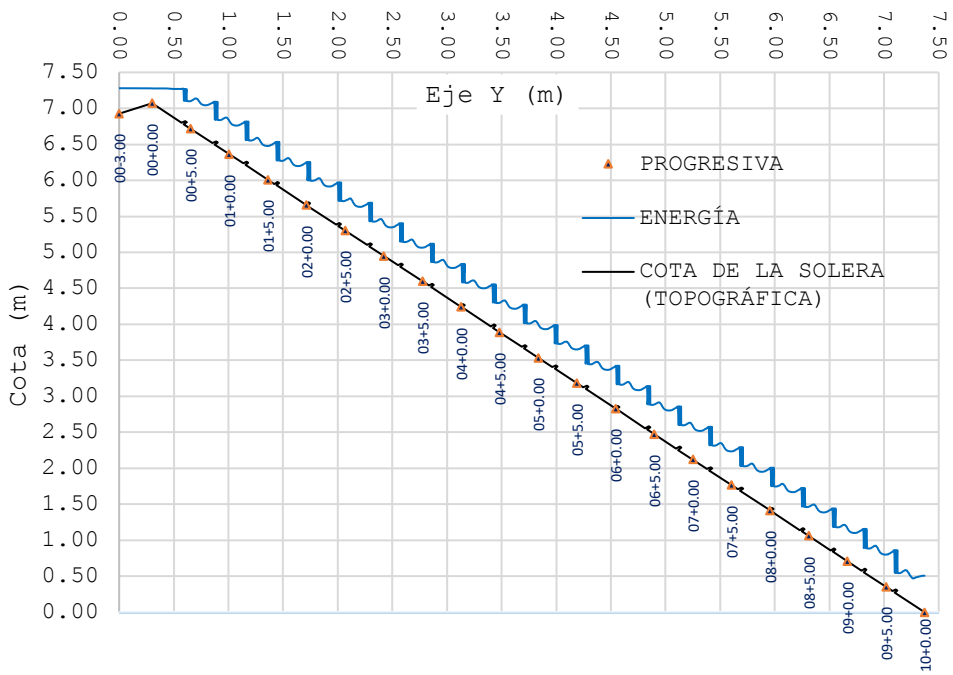


Figura 103. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P75_0.20b_0+0.060.

En la Figura 100 se presenta en rango de colores de la energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal.

III. ANÁLISIS EN LA SECCIÓN LONGITUDINAL 0-0.06m.

a) Código: S45_P75_0.20b_0-0.060

b) Perfil de la solera de la rápida.

En la Figura 57 se visualiza el perfil de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de

referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

En la Figura 96 se presenta en rango de colores la cota topográfica de la solera en el paso 0 (t=0s) del canal.

c) Energía Específica.

La determinación de energía específica del flujo obedece a la Ecuación (33).

En la Figura 104 se visualiza el perfil de la energía específica hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53). Los datos tabulares y gráficos usados para determinar la energía específica del flujo de agua a lo largo de la rápida se detallan en el Anexo 2 (Gráfico 58, Gráfico 59, Gráfico 60 y Gráfico 61).

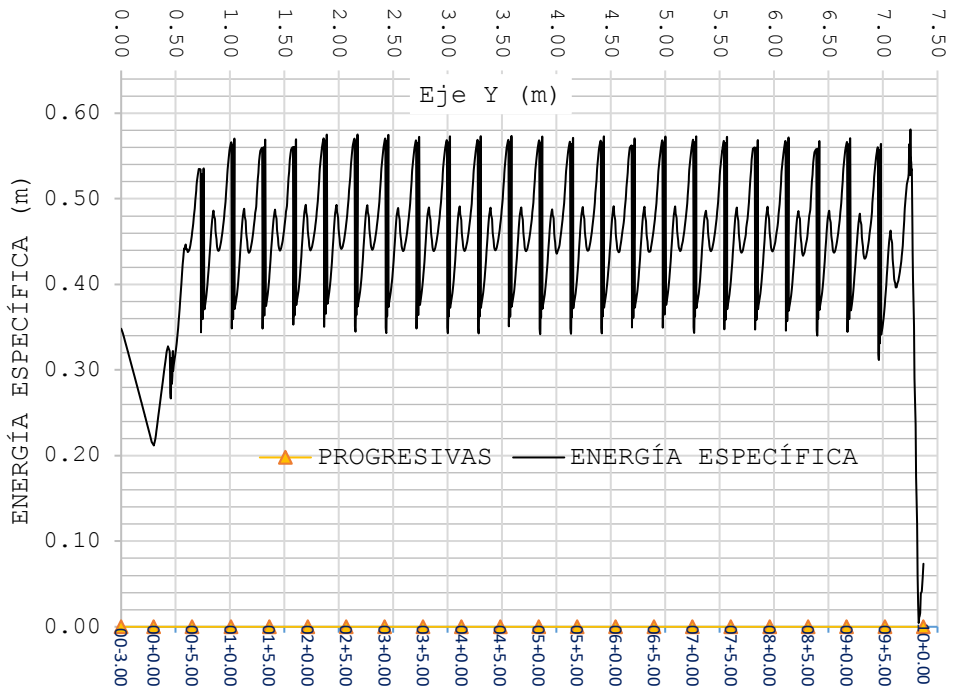


Figura 104. Energía específica hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P75_0.20b_0-0.060.

En la Figura 105 se visualiza la variación del Número de Froude a lo largo de la rápida.

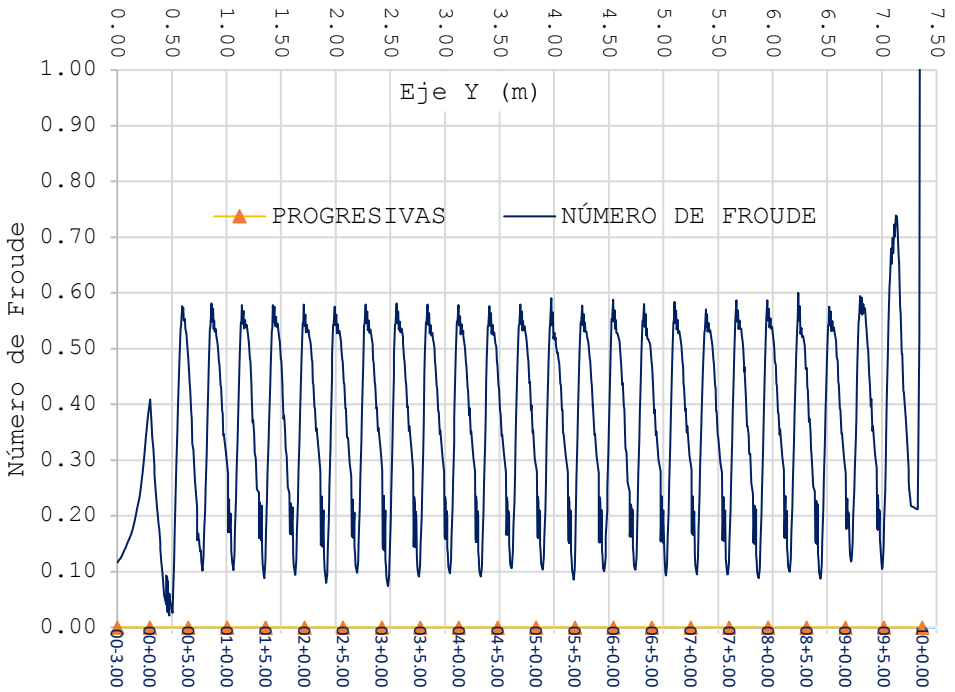


Figura 105. Número de Froude a lo largo de la rápida del S45_P75_0.20b_0-0.060.

d) Energía total del flujo de agua.

La determinación de Energía Total del flujo obedece a la Ecuación (24).

En la Figura 106 se visualiza el perfil de la energía total hidráulica a lo largo de la rápida y las progresivas correspondiente a los largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

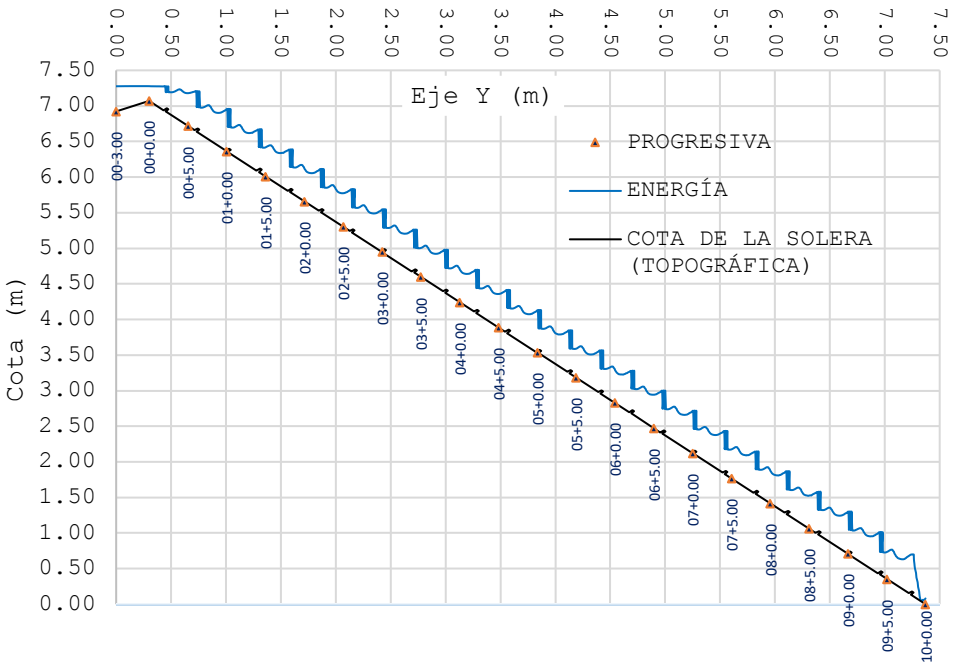


Figura 106. Energía total hidráulica a lo largo de la rápida del S45_P75_0.20b_0-0.060.

En la Figura 100 se presenta en rango de colores de la energía total del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal.

IV. ANÁLISIS DE LA ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA ESPECÍFICA Y ESTADO DE FLUJO.

Análisis de la estimación de la energía específica y Estado de Flujo.

El resumen del análisis estadístico de la energía específica al largo del canal se detalla en la Tabla 5, Figura 127 y Figura 128.

4.1.3 ESTIMACIÓN DE RESULTADOS.

Debido a que la distribución de datos extraídos del software Iber como son el caso de tirante, velocidad, energía, número de Froude, etc., poseen una frecuencia asimétrica (bimodal), de manera conservativa se usara el percentil 60 de la frecuencia de datos. Para ver la frecuencia de datos ver la Tabla N°1 y Tabla N°5 del Anexo 3.

5.1.3.1 DISTRIBUCIÓN DE TIRANTES, VELOCIDADES, ENERGÍA ESPECÍFICA Y ENERGÍA TOTAL DE LAS RAPIDAS.

5.1.3.1.1 CANAL TIPO: S45_P00_0.20b

A) Tirante del flujo: El tirante del flujo sin pantallas deflectoras alcanza una estabilidad en la progresiva 04+5.4m, alcanzando un tirante de 2.53cm. Como se representa en la Figura 107.

B) Velocidad del flujo: La velocidad del flujo sin pantallas deflectoras alcanza una estabilidad en la progresiva 04+5.4m, alcanzando una velocidad de 4.94 m/s. Como se representa en la Figura 108.

C) Energía Específica del flujo: La energía específica del flujo sin pantallas deflectoras alcanza una estabilidad en la progresiva 04+5.4m, alcanzando una energía de 1.21m. Como se representa en la Figura 109.

D) Energía total del flujo: La energía total del flujo se representa en la Figura 110.

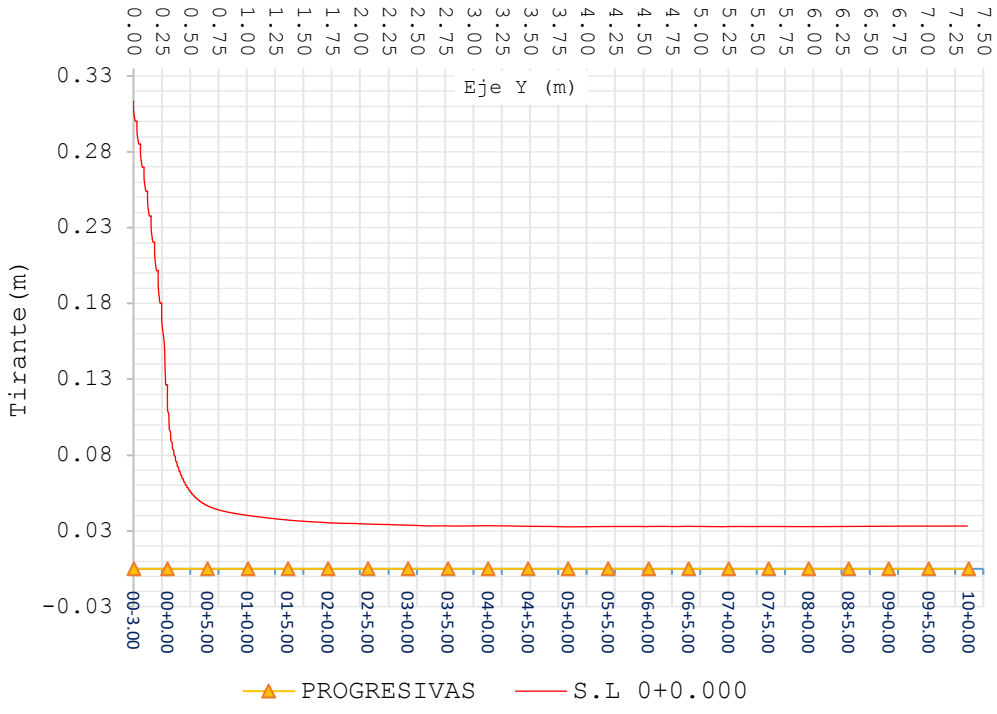


Figura 107. Distribución del Tirante en el S45_P00_0.20b

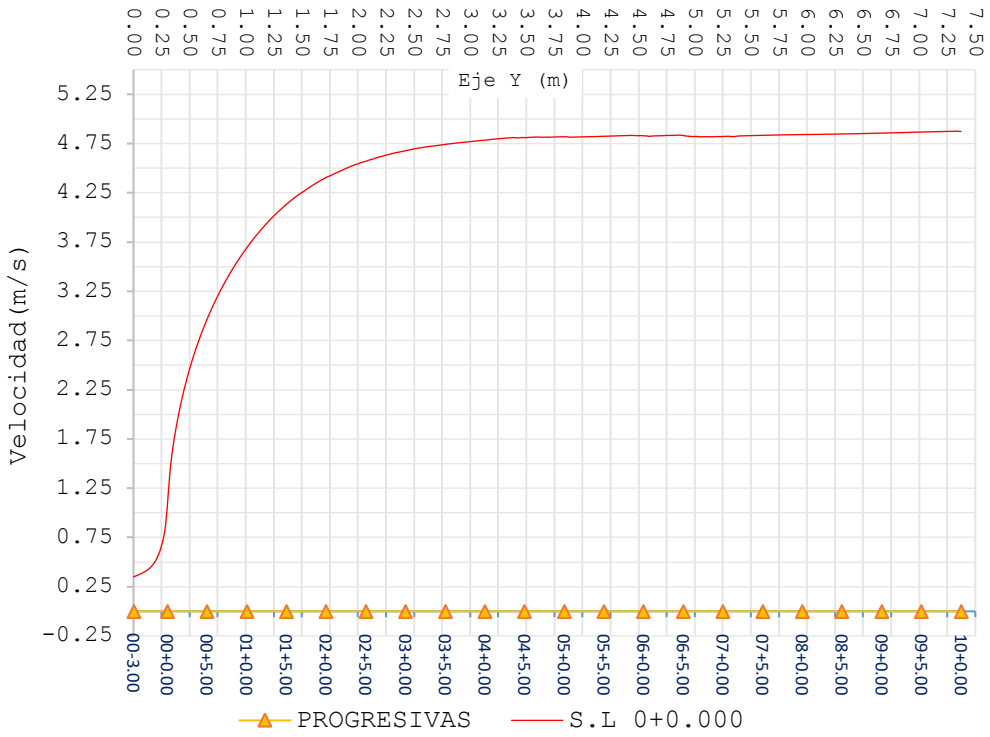


Figura 108. Distribución de velocidades en el S45_P00_0.20b

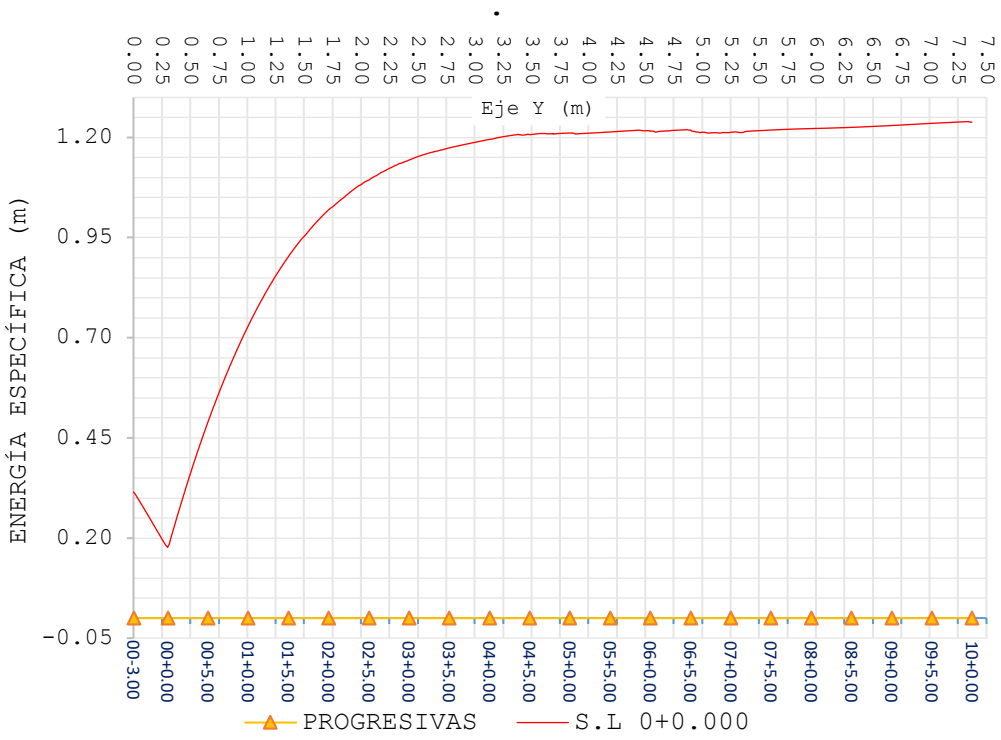


Figura 109. Distribución de la energía específica en el S45_P00_0.20b

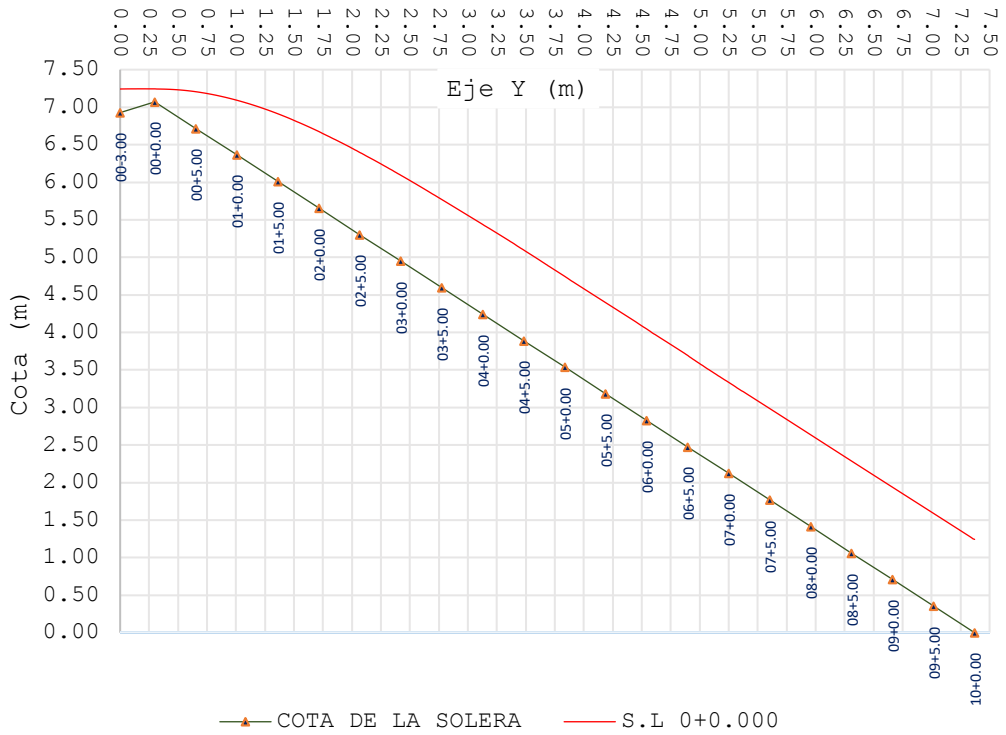


Figura 110. Distribución de la energía en el S45_P00_0.20b

5.1.3.1.2 CANAL TIPO: S45_P30_0.20b

A) Tirante del flujo: El tirante del flujo y su distribución se representa en la Figura 111.

B) Velocidad del flujo: La velocidad del flujo y su distribución se representa en la Figura 112.

C) Energía Específica del flujo: La energía específica y su distribución se representa en la Figura 113.

D) Energía total del flujo: La energía total del flujo se representa en la Figura 114.

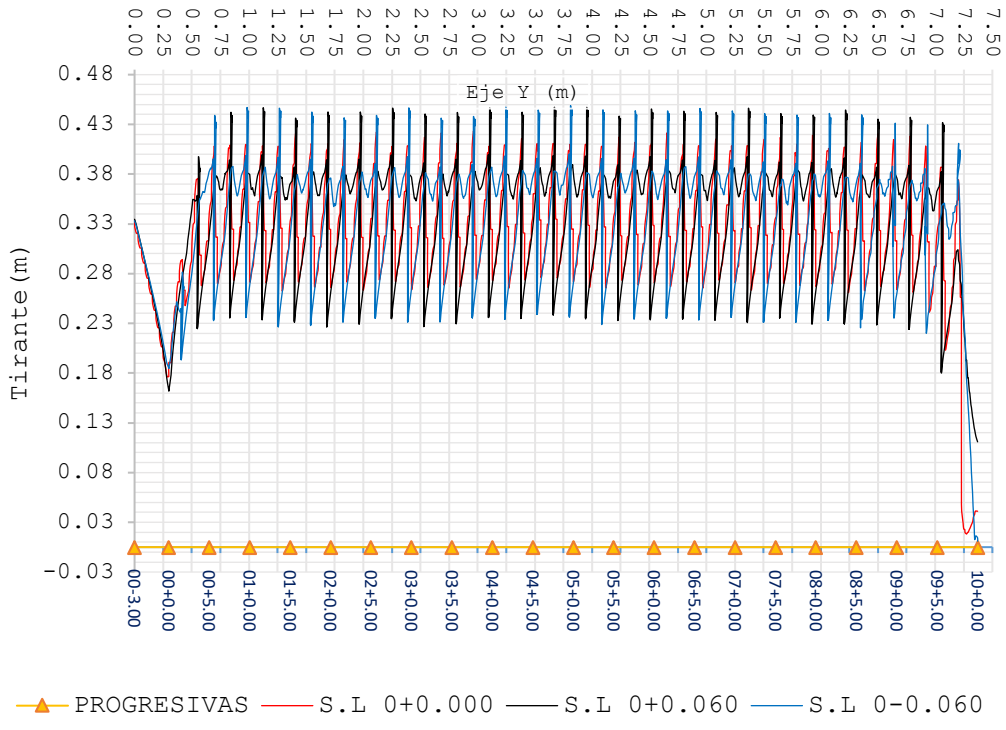


Figura 111. Distribución del Tirante en el S45_P30_0.20b

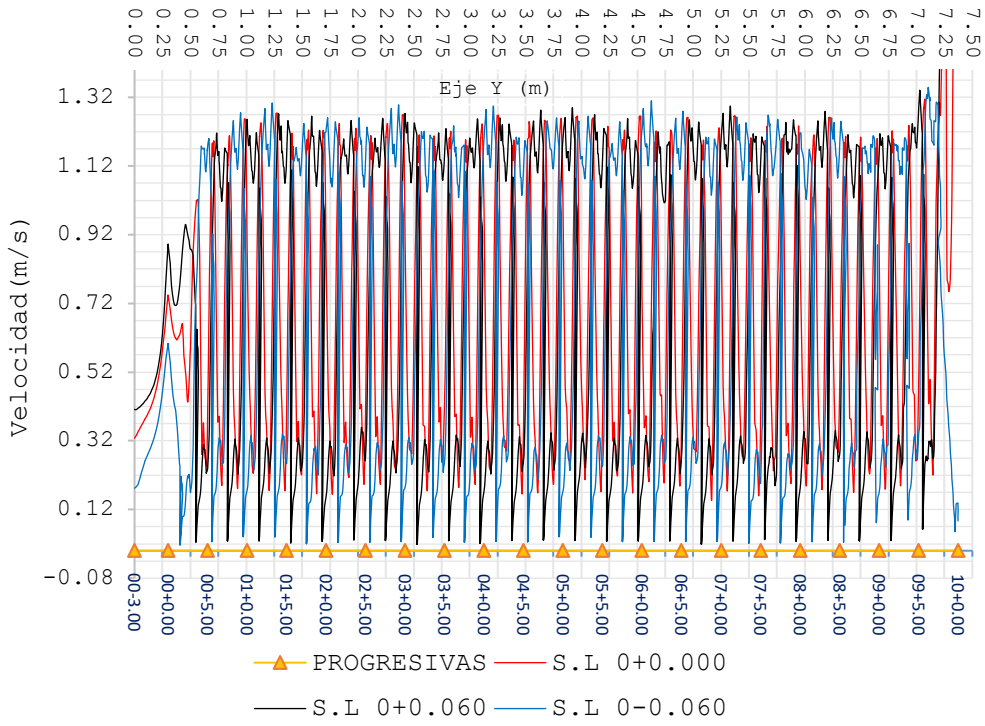


Figura 112. Distribución de velocidades en el S45_P30_0.20b

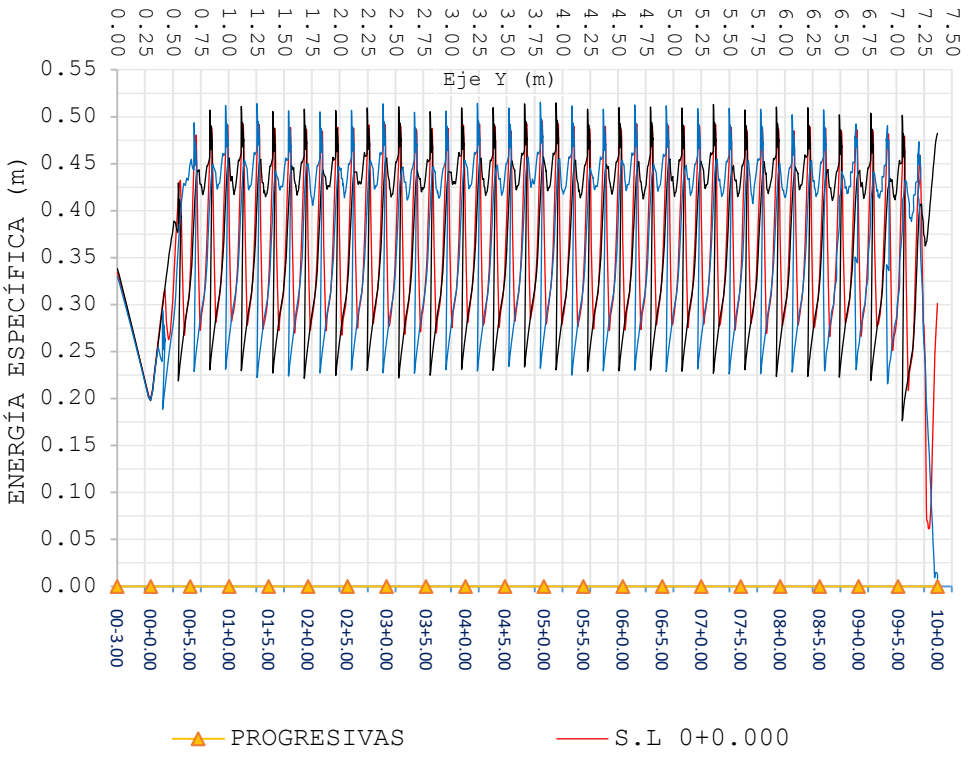


Figura 113. Distribución de la energía específica en el S45_P30_0.20b

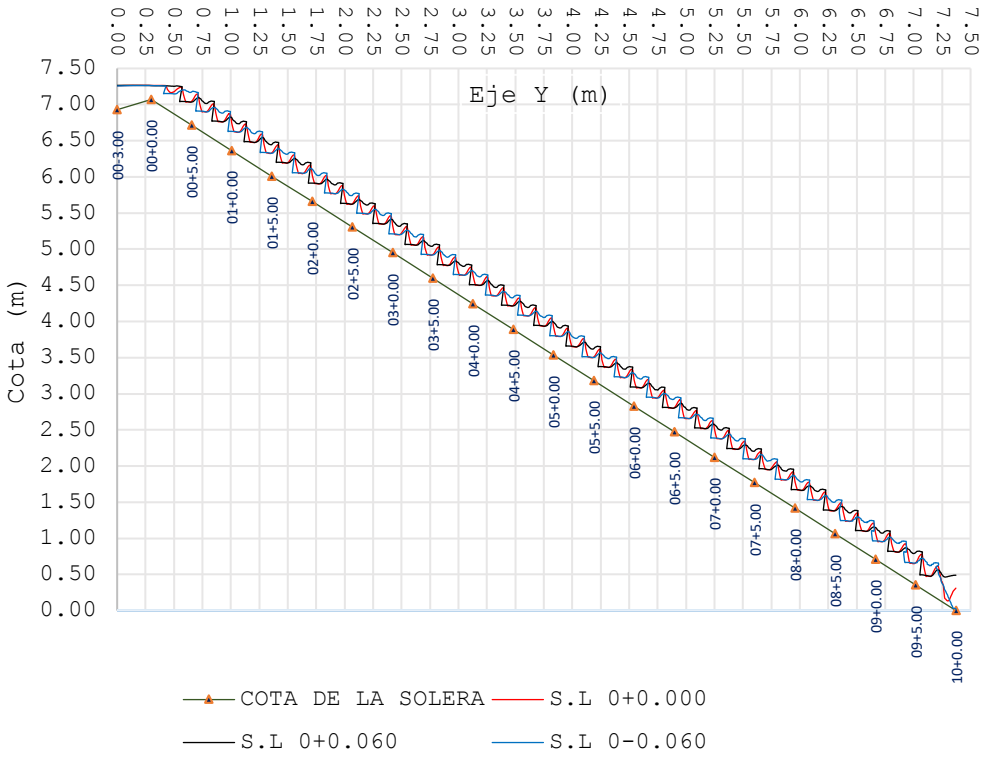


Figura 114. Distribución de la energía en el S45_P30_0.20b

5.1.3.1.3 CANAL TIPO: S45_P45_0.20b

A) Tirante del flujo: El tirante del flujo y su distribución se representa en la Figura 115.

B) Velocidad del flujo: La velocidad del flujo y su distribución se representa en la Figura 116.

C) Energía Específica del flujo: La energía específica y su distribución se representa en la Figura 117.

D) Energía total del flujo: La energía total del flujo se representa en la Figura 118.

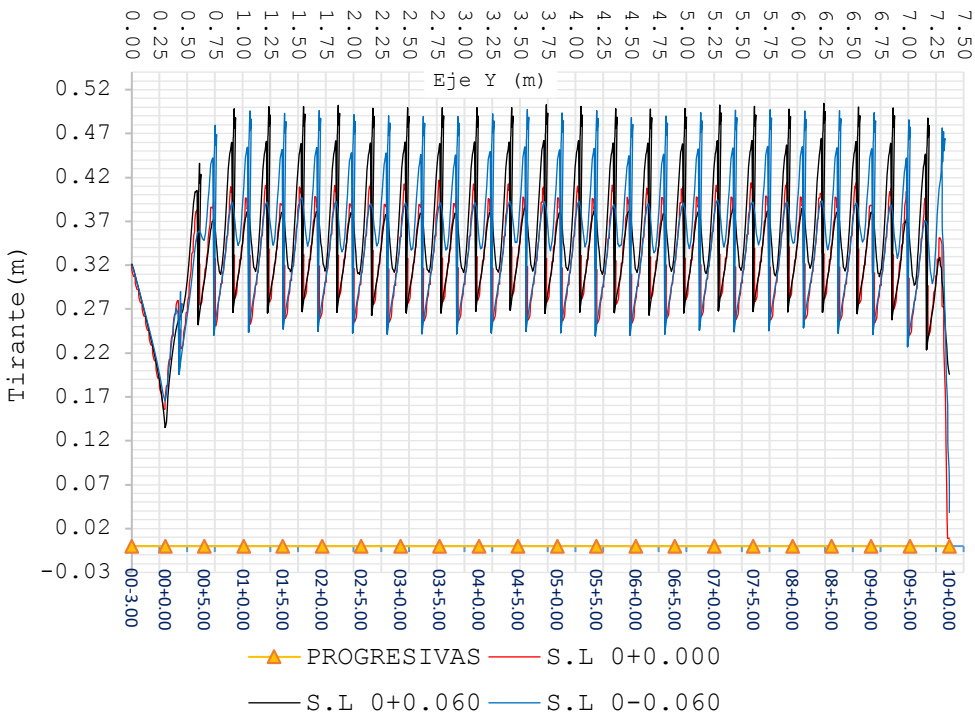


Figura 115. Distribución del Tirante en el S45_P45_0.20b

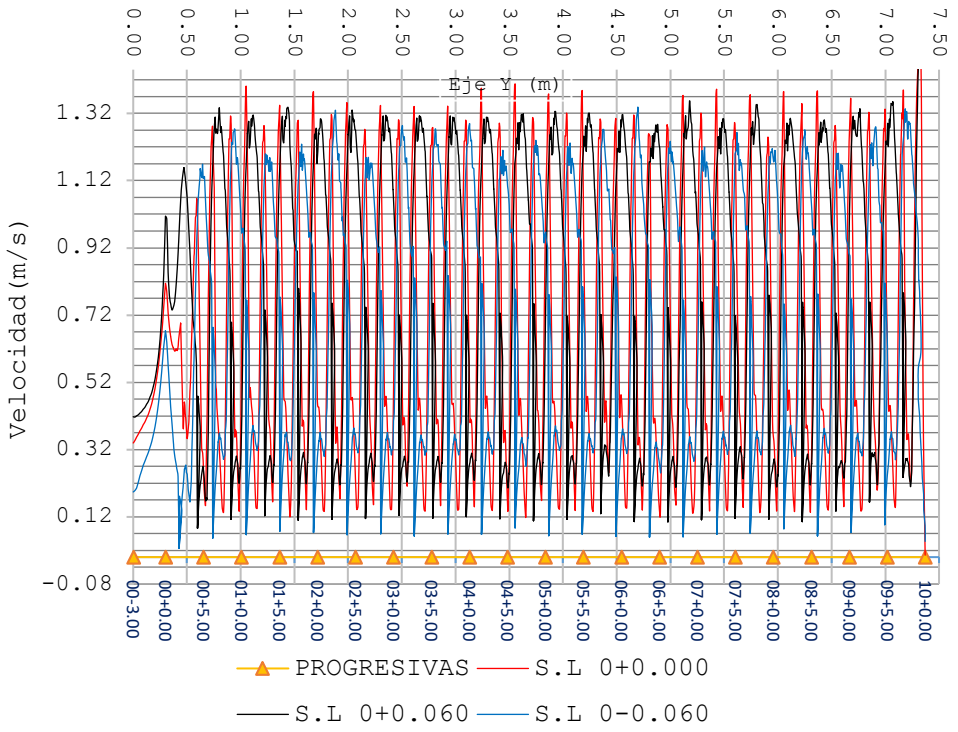


Figura 116. Distribución de velocidades en el S45_P45_0.20b

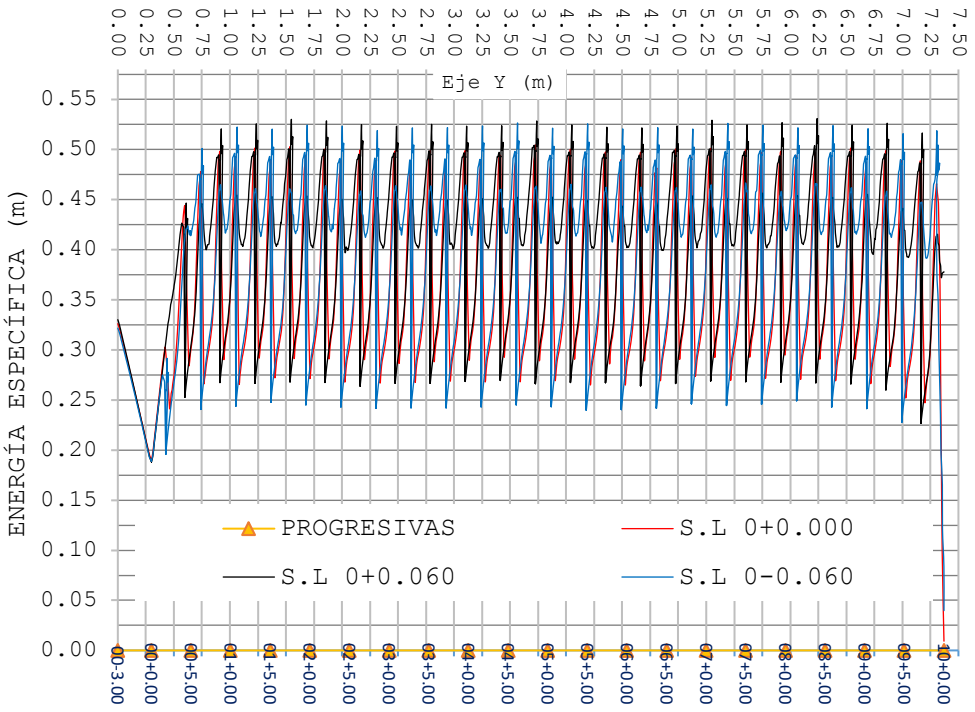


Figura 117. Distribución de la energía específica en el S45_P45_0.20b

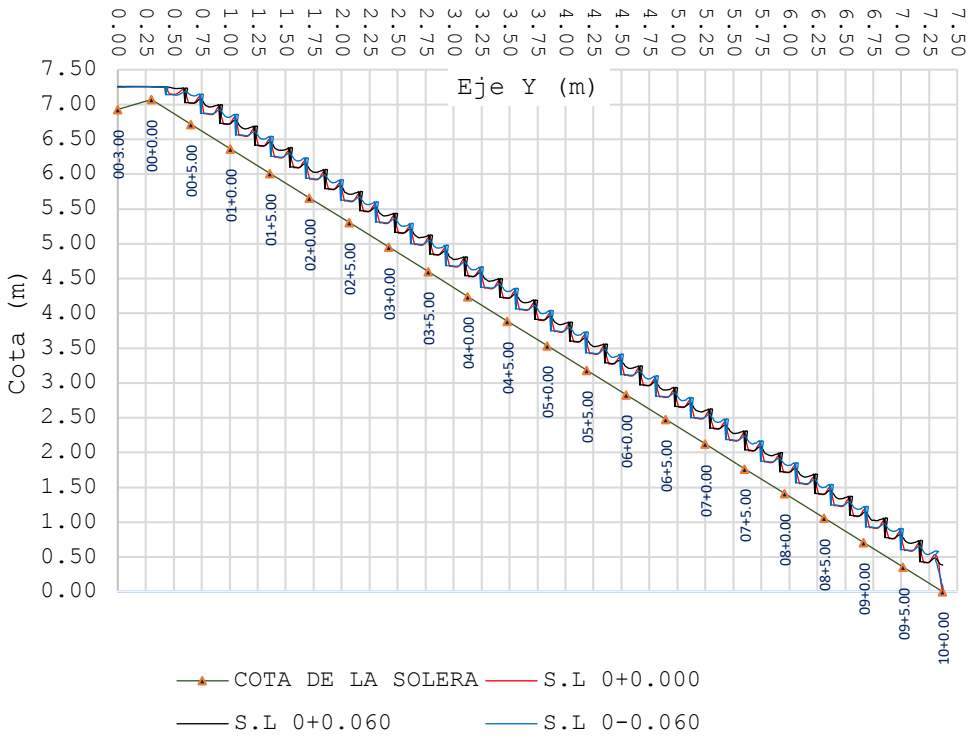


Figura 118. Distribución de la energía en el S45_P45_0.20b

5.1.3.1.4 CANAL TIPO: S45_P60_0.20b

A) Tirante del flujo: El tirante del flujo y su distribución se representa en la Figura 119.

B) Velocidad del flujo: La velocidad del flujo y su distribución se representa en la Figura 120.

C) Energía Específica del flujo: La energía específica y su distribución se representa en la Figura 121.

D) Energía total del flujo: La energía total del flujo se representa en la Figura 122.

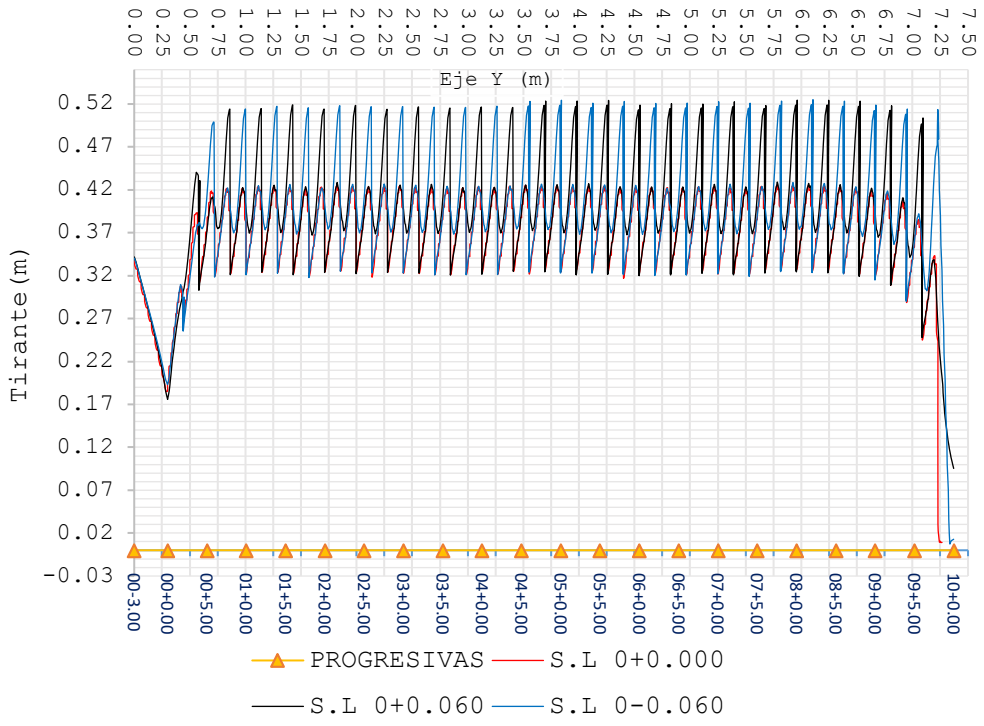


Figura 119. Distribución del Tirante en el S45_P60_0.20b

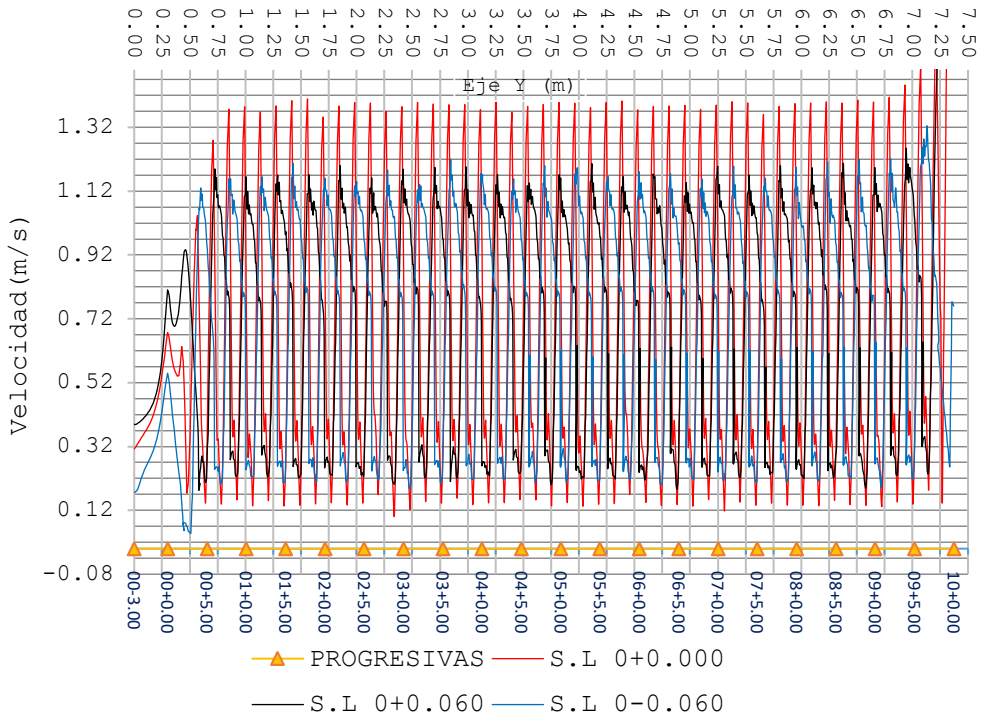


Figura 120. Distribución de velocidades en el S45_P60_0.20b

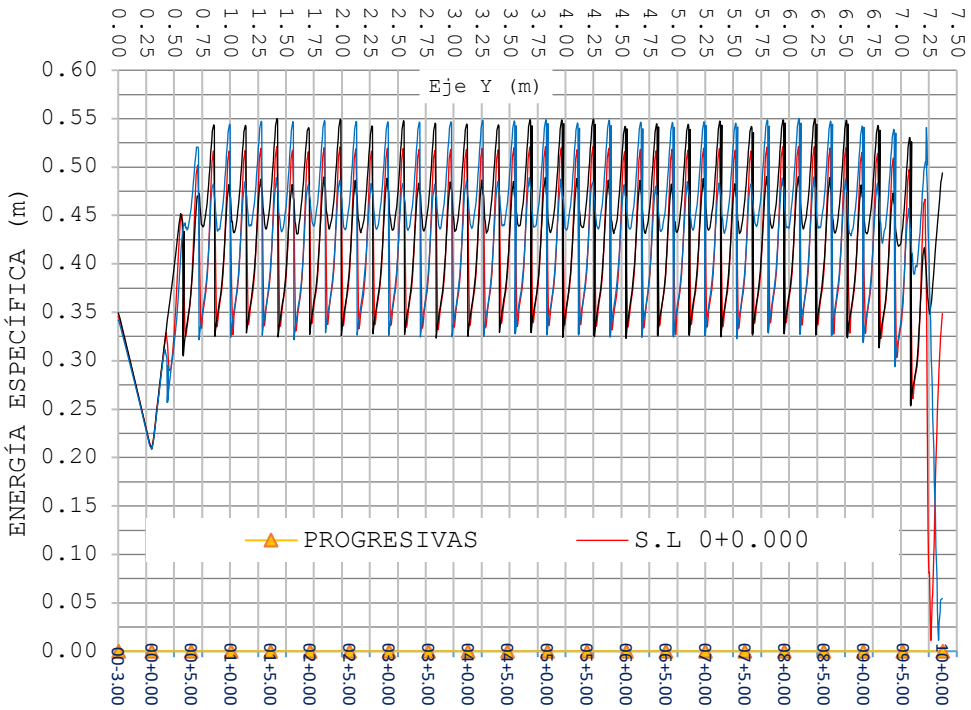


Figura 121. Distribución de la energía específica en el S45_P60_0.20b

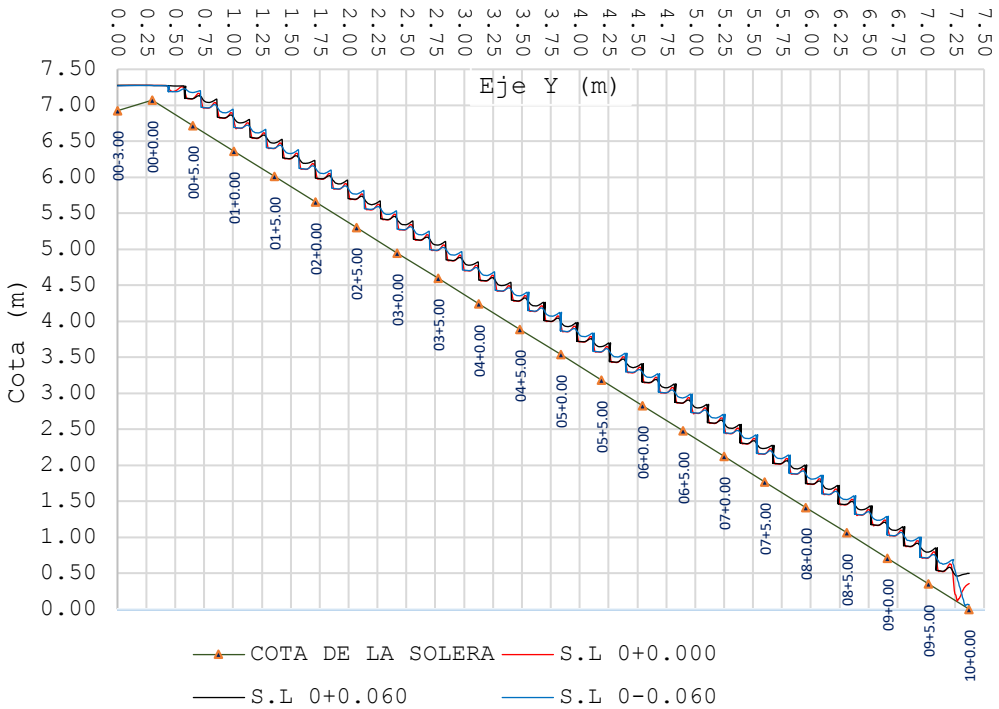


Figura 122. Distribución de la energía en el S45_P60_0.20b

5.1.3.1.5 CANAL TIPO: S45_P75_0.20b

A) Tirante del flujo: El tirante del flujo y su distribución se representa en la Figura 123.

B) Velocidad del flujo: La velocidad del flujo y su distribución se representa en la Figura 124.

C) Energía Específica del flujo: La energía específica y su distribución se representa en la Figura 125.

D) Energía total del flujo: La energía total del flujo se representa en la Figura 126.

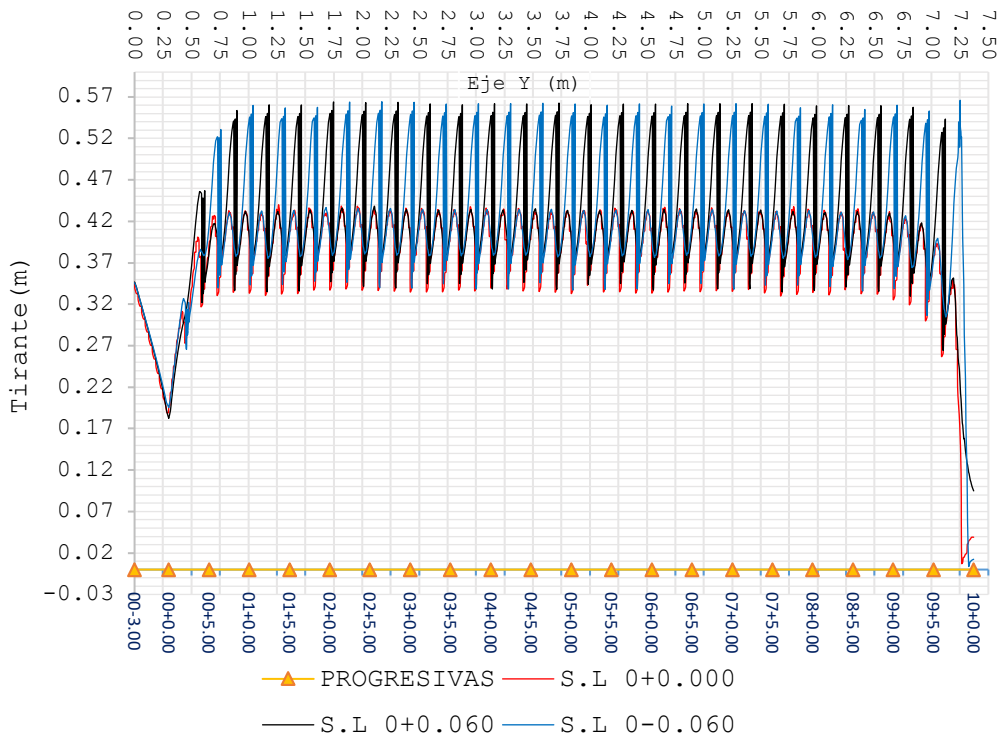


Figura 123. Distribución del Tirante en el S45_P75_0.20b

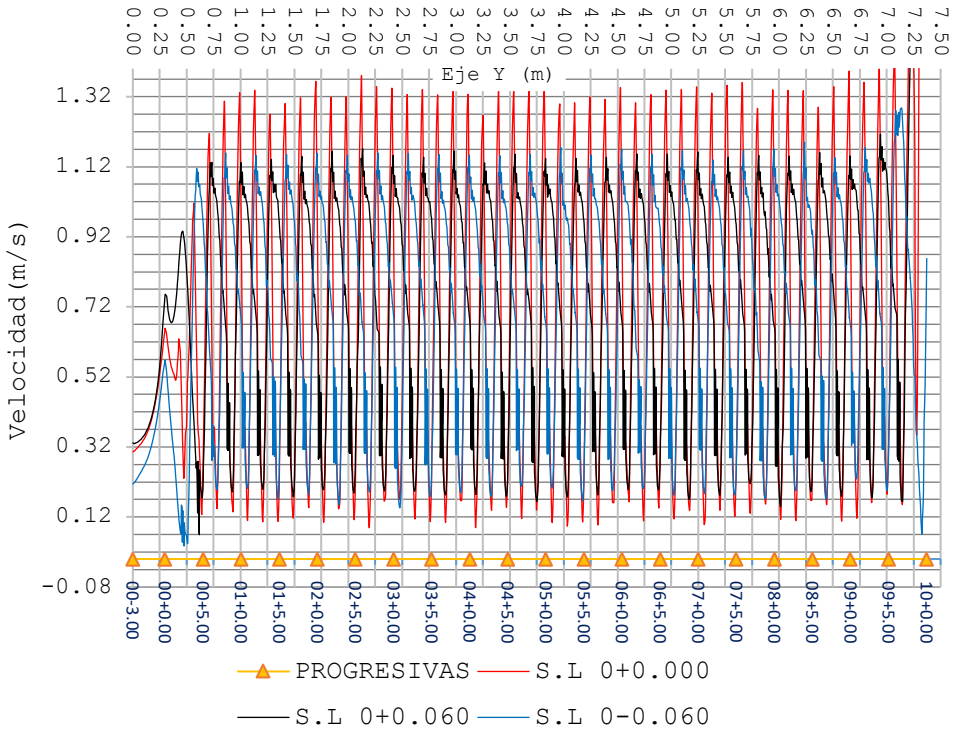


Figura 124. Distribución de velocidades en el S45_P75_0.20b

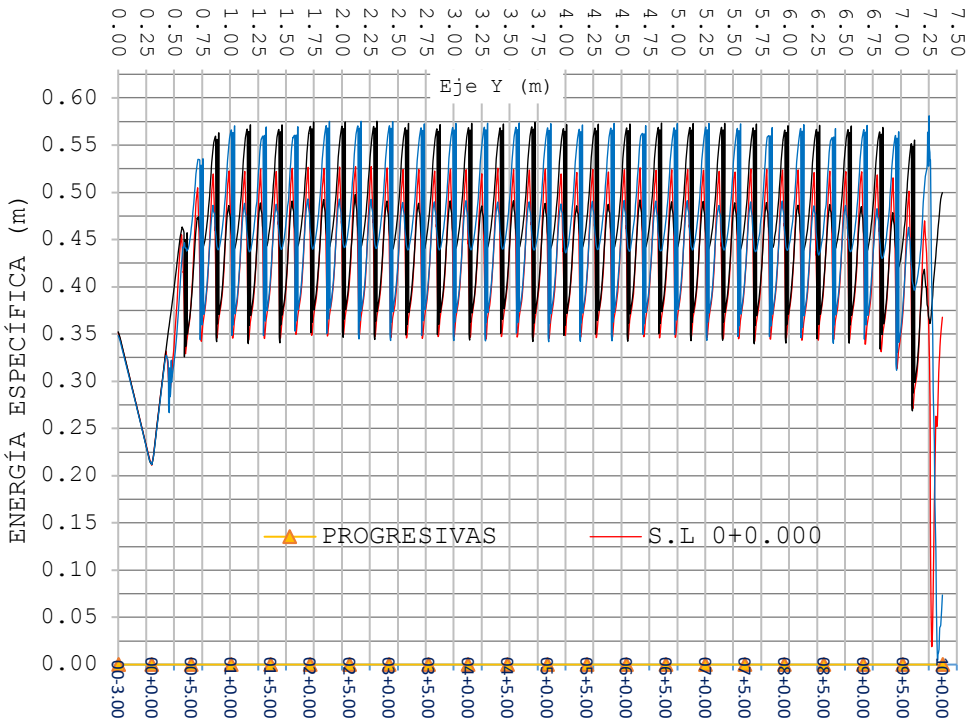


Figura 125. Distribución de la energía específica en el S45_P75_0.20b

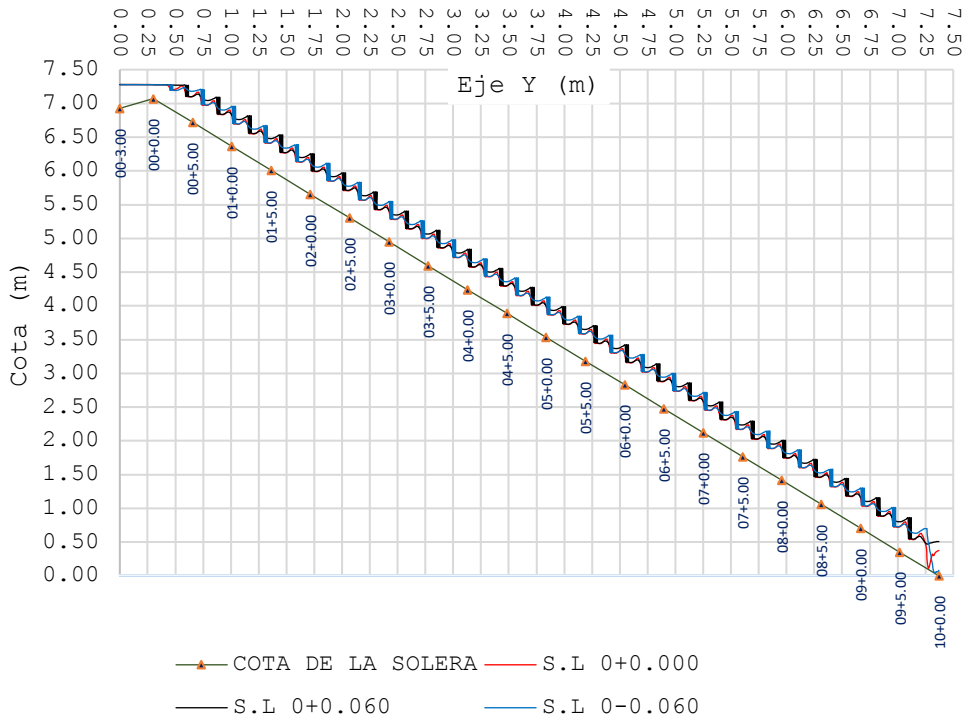


Figura 126. Distribución de la energía en el S45_P75_0.20b

5.1.3.2 ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA ESPECÍFICA Y ESTADO FLUJO.

La estimación de la disipación de la energía específica del flujo con pantallas deflectoras se realiza a partir del análisis estadístico de la distribución de los valores máximos de la energía específica (Figura 113, Figura 117, Figura 121 y Figura 125), y comparados estos con la energía específica del flujo sin pantallas deflectoras (Figura 109).

El análisis para determinar la eficiencia de la disipación de energía se detalla Tabla 5.

Tabla 5: Análisis estadístico descriptivo de la energía específica y estado de flujo de los canales.

DISIPACIÓN DE ENERGÍA DE LAS CORRIENTES DE AGUA EN CANALES DE CONCRETO DE 100% DE PENDIENTE EMPLEANDO PANTALLAS DEFLECTORAS					
CANAL	S45_P00_0.20b*	S45_P30_0.20b	S45_P45_0.20b	S45_P60_0.20b	S45_P75_0.20b
VARIABLE	Energía Específica	Energía Específica	Energía Específica	Energía Específica	Energía Específica
i) ESTADO DE FLUJO	SUPERCRÍTICO	SUBCRÍTICO	SUBCRÍTICO	SUBCRÍTICO	SUBCRÍTICO
Número de Froude	8.38	0.39	0.37	0.35	0.33
ii) ANÁLISIS ESTADÍSTICO**					
Media	1.085	0.433	0.436	0.473	0.479
Mediana	1.209	0.437	0.435	0.466	0.467
Moda	1.212	0.428	0.491	0.541	0.462
Varianza	0.059	0.002	0.002	0.002	0.002
Desviación estándar	0.243	0.040	0.047	0.039	0.046
Asimetría	-2.083	-0.393	-0.113	0.409	0.570
Curtosis	3.465	-0.508	-0.983	-0.901	-0.611
Rango	1.058	0.175	0.191	0.150	0.175
Rango intercuartil	0.140	0.049	0.079	0.065	0.064
Mínimo	0.178	0.340	0.340	0.400	0.400
Máximo	1.235	0.515	0.531	0.550	0.575
Distribución de datos	Asimetría negativa/leptocúrtica	Asimetría negativa/platicurtica	Asimetría negativa/platicurtica	Asimetría positiva/platicurtica	Asimetría positiva/platicurtica
Significación Kolmogorov-Smirnova	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Percentil 90**	1.2258	0.4843	0.4966	0.5239	0.5386
iii) VALOR DE LA ENERGÍA	1.2258	0.4843	0.4966	0.5239	0.5386
iv)DISIPACIÓN DE ENERGIA	0.00%	60.49%	59.49%	57.26%	56.06%

* Canal sin pantallas deflectoras.

** Valor del percentil 90 de la distribución normal.

Interpretación: Debido a que el canal que ofrece una mejor distribución normal (menor asimetría) es el de tipo S45_P45_0.20b (Canal con 100% de pendiente y pantallas deflectoras con un ángulo de 45° respecto al eje longitudinal de la rápida) y ofrece una disipación de energía de 59.49% a lo largo del canal, para el análisis experimental de la disipación de energía se construirá un modelo físico con las características del canal de tipo S45_P45_0.20b (ver detalles en el Lamina CPD45 y Lamina CPD del Anexo 1).

El software Iber 2.4.2 presenta cierta incertidumbre en el modelamiento de flujos en 3 dimensiones (X, Y y Z), se toma el 90% del valor máximo (percentil 90) de la distribución de la energía específica. El valor del percentil 90 del canal S45_P45_0.20b es 0.4966 m y el valor del percentil 90 del canal S45_P00_0.20b es 1.2258 m.

Usando la Ecuación (31) se tiene la eficiencia de la disipación de energía, como se muestra a continuación:

$$\Delta E = \frac{H_1 - H_2}{H_1} x100\%$$

$$\Delta E = \frac{1.2258 - 0.4966}{1.2258} x100\%$$

$$\Delta E = \frac{0.7292}{1.2258} x100\%$$

$$\Delta E = 0.5949 x100\%$$

$$\Delta E = 59.49\%$$

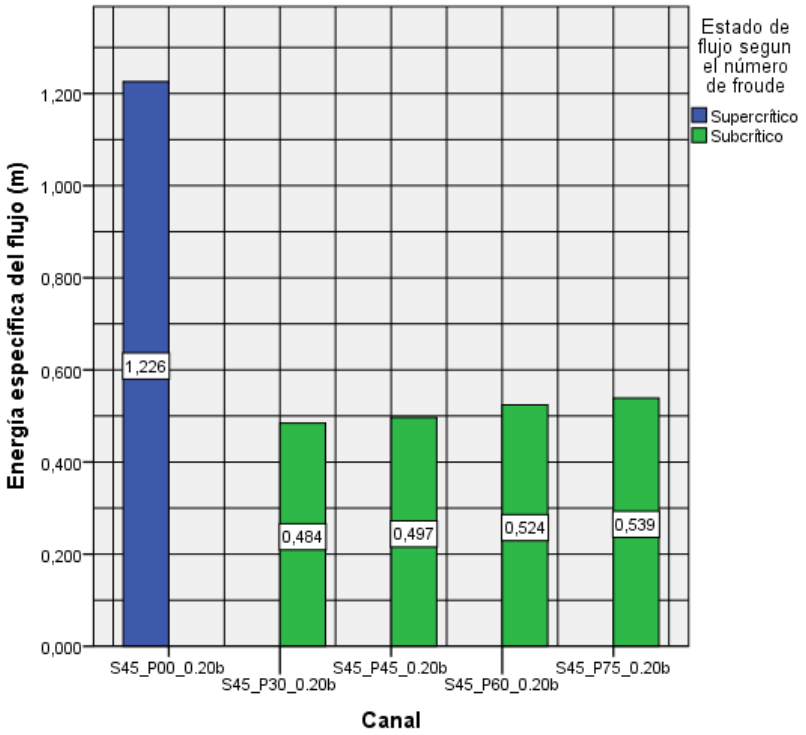


Figura 127. Energía específica del flujo de los diferentes canales.

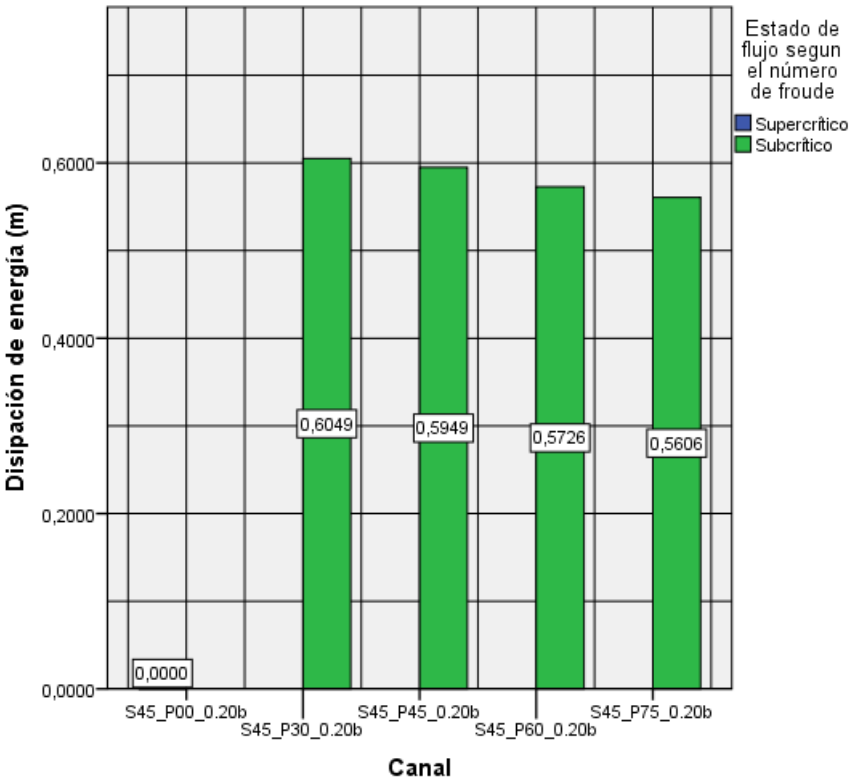


Figura 128. Eficiencia en la disipacion de energía específica de los diferentes canales.

Para el diseño de la altura de las paredes del canal se tomará como dato el percentil 90 del conjunto de valores del tirante del canal S45_P45_0.20b, el cual tiene un valor de 0.4332m. valor de la altura de las paredes del canal debe ser mayor al calado del percentil 90, el cual por proceso constructivo se tomará el valor de 0.50m.

5.1.3.3 ESTIMACION DEL COEFICIENTE DE CHEZY, RADIO HIDRAULICO-FACTOR DE FORMA, FACTOR DE FORMA-ÁNGULO DE DEFLECCIÓN Y COEFICIENTE DE CORIOLIS.

-Coeficiente de Chézy:

Para estimar el coeficiente de Chézy se realizará un ajuste según la Ecuación (127).

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = A_2 log\left(\frac{R}{\chi}\right) + B_2$$

Haciendo la regresión para los valores de C, R y χ, como se indica en la Figura 129, se tiene:

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = -2.6095 log\left(\frac{R}{\chi}\right) + 4.3272$$

Con una fiabilidad de 97.31%.

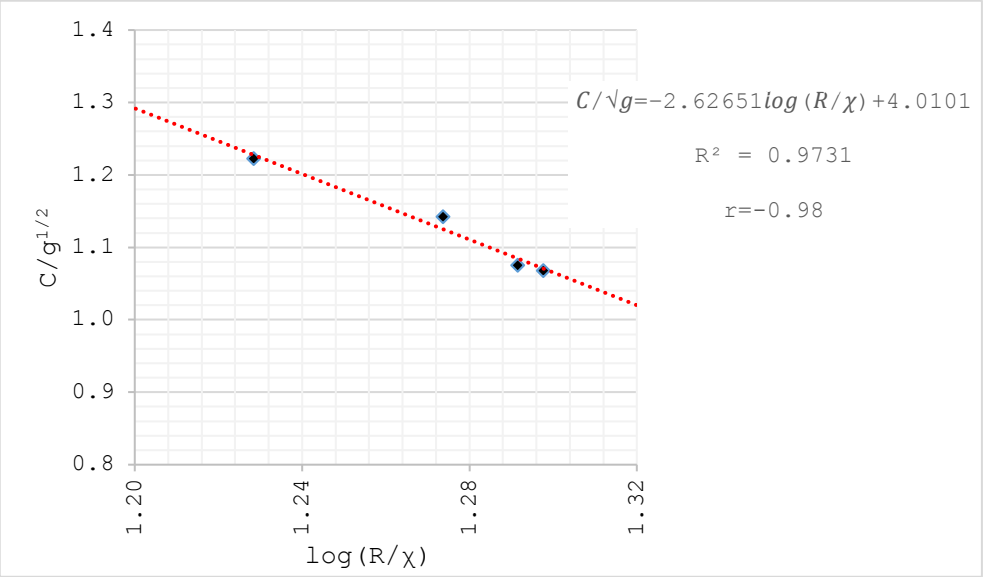


Figura 129. Relación Lineal entre el coeficiente de Chézy y el Radio hidráulico y el factor de forma.

-Factor de Forma:

Para estimar el factor de forma (χ) en función del ángulo de deflexión de las pantallas deflectoras se hace un ajuste de regresión (Ver Tabla 5 del Anexo 3) para los valores de χ, y θ, como se indica en la Figura 129, se tiene:

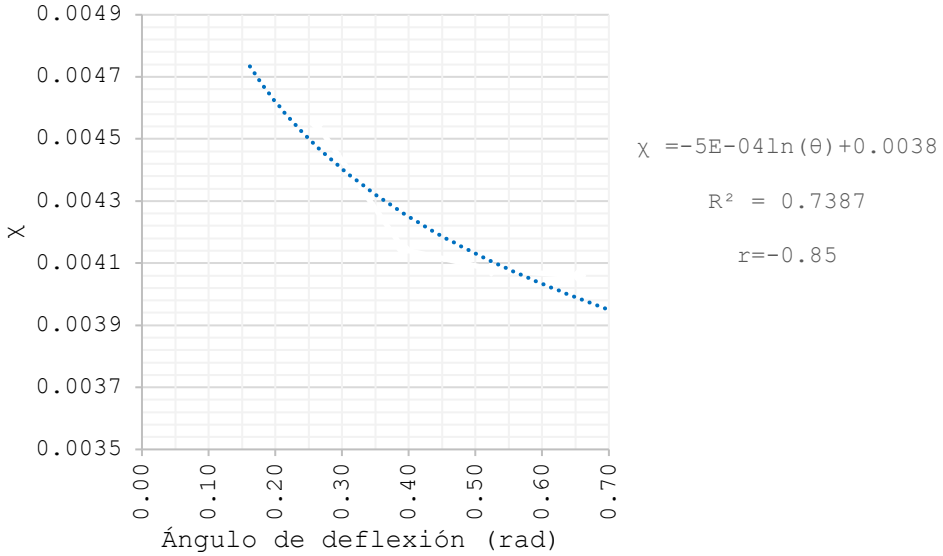


Figura 130. Relación Logarítmica entre el factor de forma y el ángulo de deflexión de las pantallas.

Se tiene el factor de forma en función del ángulo (radianes) de deflexión de las pantallas.

$$\chi = -\frac{5}{10000} ln(\theta) + 0.0038$$

Con una fiabilidad de 73.87%.

-Coeficiente de Energía o Coeficiente de Coriolis (α) del S45_P45_0.20b:

La estimación del valor del Coeficiente de Energía o Coeficiente de Coriolis para el S45_P45_0.20b con la ecuación (21) y ecuación (23) aplicada a la rápida S45_P45_0.20b.

Donde la ecuación (21):

$$\alpha = 1 + 3\epsilon^2 - 2\epsilon^3$$

Donde el valor de ϵ es:

$$\epsilon = \frac{V_M}{V} - 1$$

Y la ecuación (23)

$$\alpha = 1 + 0.056(\frac{V_M}{V})^{4.97}$$

Donde:

V_M, Velocidad máxima.

V, Velocidad media.

Tomando los valores medios de las velocidades en las secciones de canal con pantallas deflectoras de 45°, se tiene la Tabla 6:

Tabla 6: Estimación del coeficiente de Coriolis.

CANAL		S45_P45_0.20b
i) ESTADO DE FLUJO		SUBCRÍTICO
Número de Froude		0.37
ii) Datos		
Velocidad maxima media S45_P45_0.20b_0-0.060	v (m/s)	1.098
Velocidad minima media S45_P45_0.20b_0-0.060	v (m/s)	0.283
Velocidad maxima media S45_P45_0.20b_0+0.000	v (m/s)	0.974
Velocidad minima media S45_P45_0.20b_0+0.000	v (m/s)	0.330
Velocidad maxima media S45_P45_0.20b_0+0.060	v (m/s)	1.098
Velocidad minima media S45_P45_0.20b_0+0.060	v (m/s)	0.276
Velocidad Media	V (m/s)	0.676
Velocidad Maxima	V_M (m/s)	1.098
ϵ[1]		0.6231
Coeficiente de Coriolis[2]	α	1.6809
Coeficiente de Coriolis[3]	α	1.6217

[1] Ecuación (22)

[2] Ecuación (21)

[3] Ecuación (23)

De la Tabla 6 se tiene dos valores para el coeficiente de Coriolis, teniendo en cuenta que el flujo es turbulento se considerara para los cálculos posteriores el valor de 1.6809.

$$\alpha = 1.6809$$

B) ENSAYO EN UN MODELO FÍSICO.

4.2 ESTRUCTURA, EQUIPOS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.

Para el realizar el análisis en un modelo físico se construyó un canal de concreto según los detalles del Lámina CCPD45 y Lámina CCPD del Anexo 1, y como se aprecia en la Figura 131, el cual fue previamente evaluado mediante un análisis numérico con el software Iber 2.4.2.

Figura 131. Vista aguas arriba y aguas debajo del canal de 10.00m de longitud, pendidente de 100%, ancho de 0.20m.

Para proceder con el ensayo se tuvo las siguientes consideraciones:

-Para medir el caudal de ingreso al canal S45_P45_0.20b se construyó un vertedero triangular de pared delgada metálico, como se muestra en la Figura 132 (Ver también Lámina CCPD45, Lámina CCPD del Anexo 1 y Figura 44).

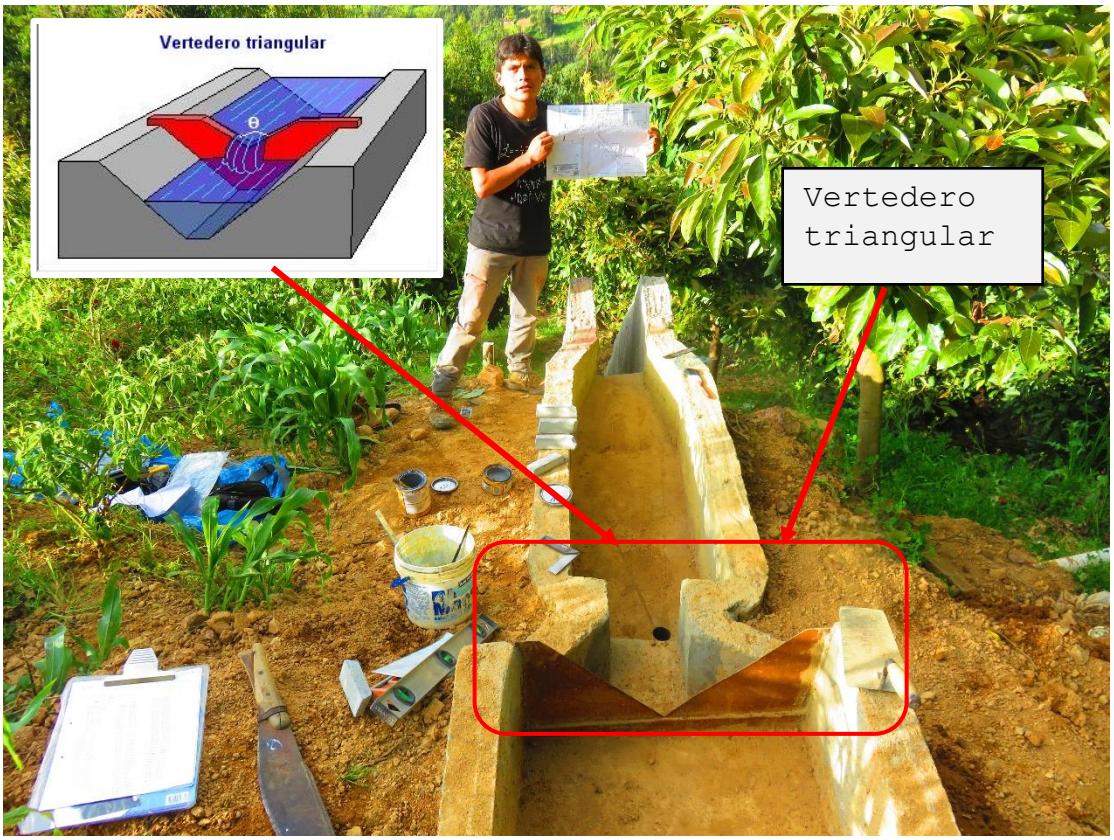


Figura 132. Vertedero triangular de pared delgad con $\theta = 90°$, con un coeficiente de descarga $C_d = 1.4$, valido para cargas mayores a 0.14m.

-Para medir la pendiente del canal S45_P45_0.20b se planeó usar un eclímetro modelo Berger 6 3/8" de 1% de precisión como se aprecia en la Figura 133.

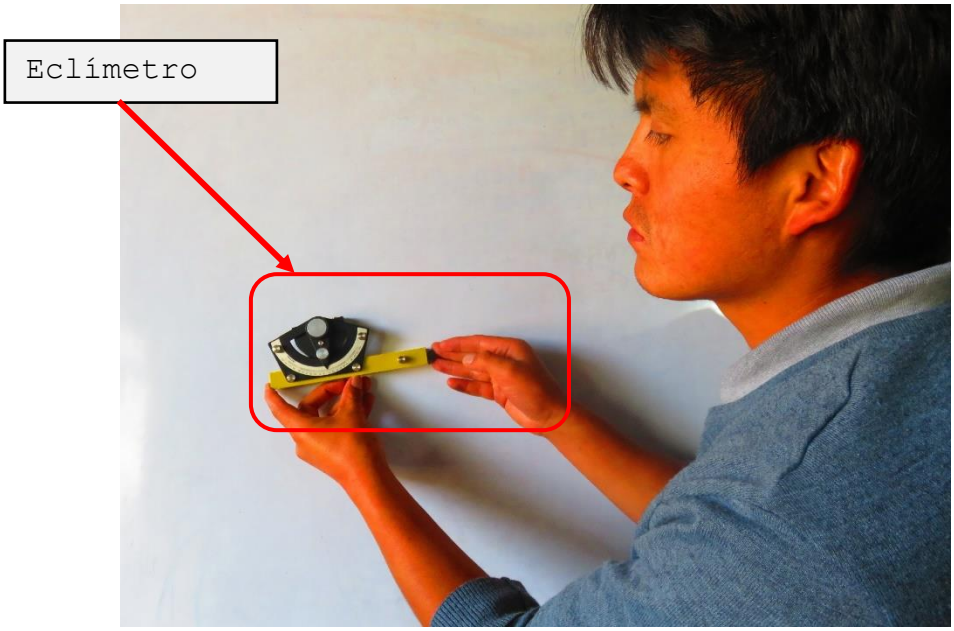


Figura 133. Eclimetro modelo Berger para la medida de la pendiente del canal.

-Para medir el tirante del flujo de agua se ensamblo un nivel de burbuja (para la verticalidad) con una regla de plástico enumerada de 60.00 cm (para la lectura del tirante), como se muestra en la Figura 134 y Figura 135.

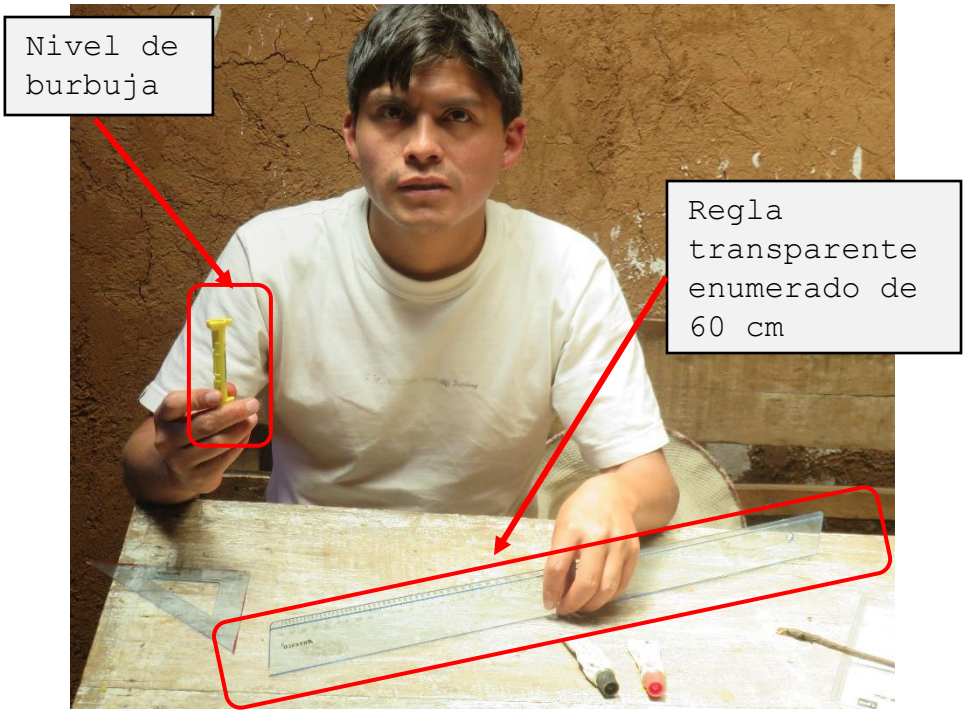


Figura 134. Nivel de burbuja, regla y cemento-pegamento.

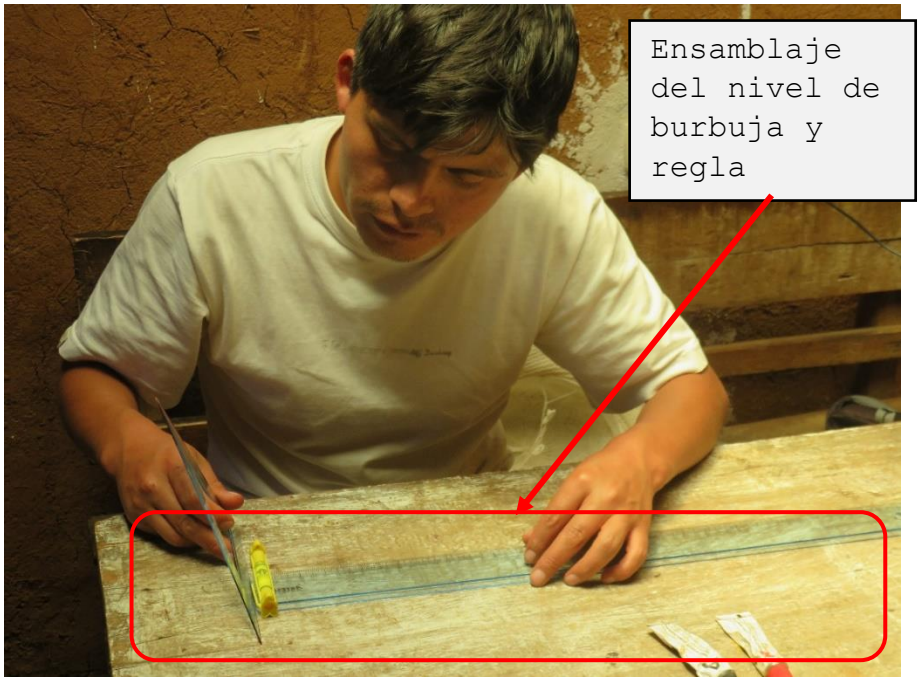


Figura 135. Ensamblaje de la regla numerada y el nivel de burbuja con cemento-pegamento.

-Para medir los tirantes a intervalos de 0.10m a lo largo del canal, desde la progresiva 0+0.00m hasta la progresiva 10+0.00m, se marcó con un plumón indeleble de color rojo a cada 0.10m a lo largo de la base del canal y la pared del canal, consignando a su vez las progresivas del tramo, como se muestra en la Figura 136.

Figura 136. Marcas en las superficies de la base y pared del canal, a cada 0.10m a lo largo del canal desde la progresiva 0+0.00 a 10+0.00m.

- Las pantallas deflectoras fueron prefabricadas, usando como moldes el yeso preparado y endurecido, como se aprecia en la Figura 137 y Figura 138.

Figura 137. Moldes de yeso para la fabricación de las pantallas deflectoras de concreto simple.

Figura 138. Prefabricación de las pantallas deflectoras (vaceado del concreto preparado en los moldes de yeso-figura izquierda y desencofrado de las pantallas deflectoras-figura derecho).

Las pantallas deflectoras desencofradas fueron límpidas y colocadas en la superficie de la base del canal con las distribuciones según se detallan en la Lámina CCPD45 del Anexo 1, y como se presenta en la Figura 139, Figura 140 y Figura 144.

Figura 139. Pantallas deflectoras prefabricadas colocadas en la superficie de la base del canal.

Figura 140. Uso del epóxico (Sika dur 32gel) para el pegado resistente entre la base del canal y las pantallas deflectoras.

-Para medir la temperatura del agua se planeó usar un termómetro de alimentos (por su sensibilidad) de 0.1 °C de precisión.

Finalmente, la estructura hidráulica construida para el ensayo se muestra en la Figura 141 y Figura 142.

Figura 141. Estructura hidráulica (vertedero, canal de transición) al canal de 10.00m de longitud y pendiente de 100%.

4.2.1 PROCEDIMIENTOS DEL ENSAYO.

Para realizar el ensayo se construyó un canal de concreto, con una pendiente de 100% con una longitud de 10.00m y con pantallas deflectoras orientadas a 45° con respecto al eje longitudinal del canal, asentada en una cota de 2800.00 msnm, cuyos detalles de sus dimensiones geométricas se adjuntan en la Lámina CCPD45 y Lámina CCPD del Anexo 1.

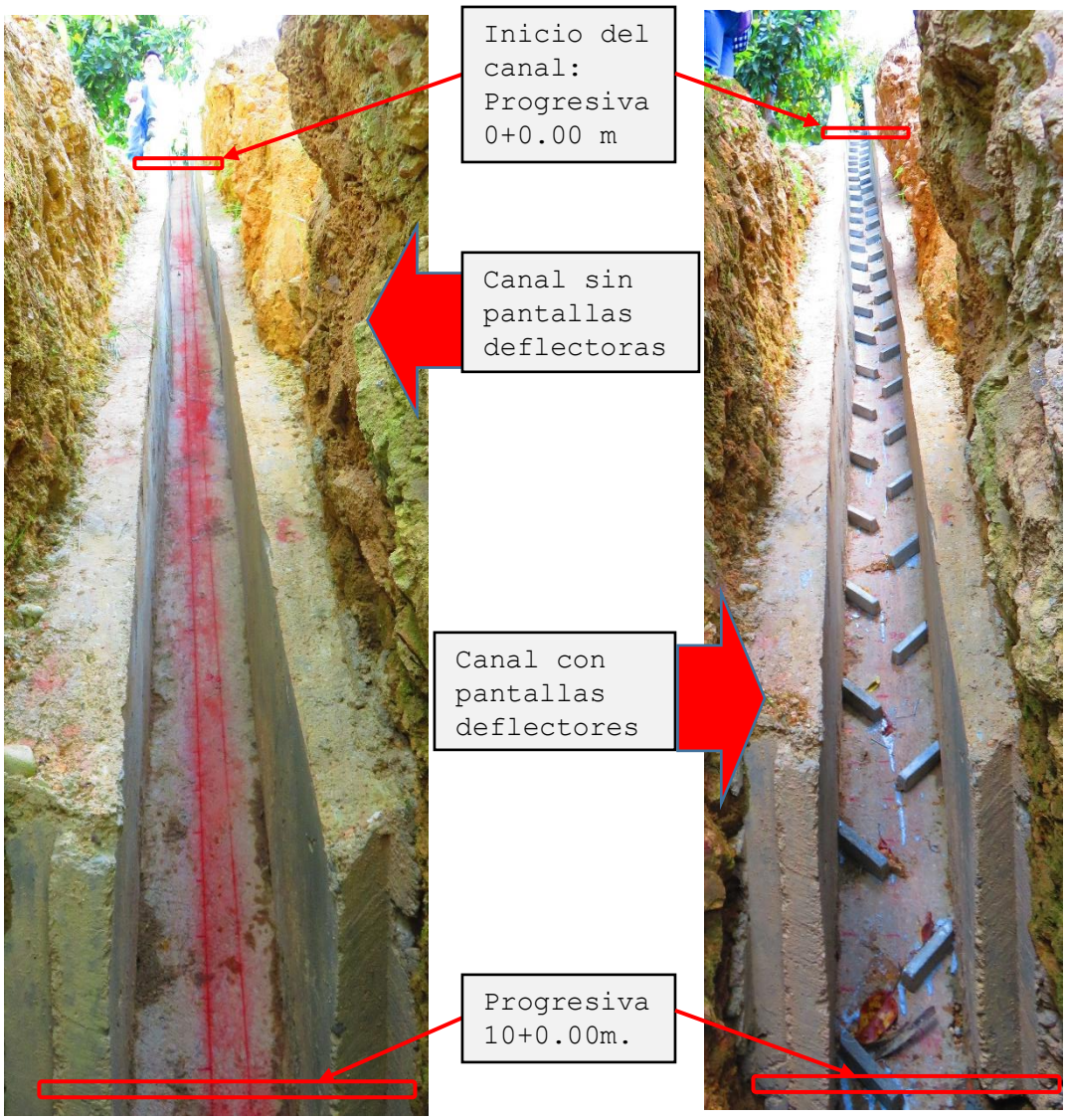


Figura 142. Canal de 10.00 m de longitud, con pendiente de 100%. A la izquierda el canal de sin pantallas y a la derecha el canal con pantallas deflectora.

La rápida de tipo S45_P45_0.20b es de concreto simple, resultado de la mezcla de hormigón de las canteras ubicadas a las orillas del Rio Santa a la altura de Tingua-Yungay, cemento y agua. Las pantallas deflectoras se prefabricaron con las dimensiones detalladas en la Lámina CCPD45 del Anexo 1, para luego ser pegadas a la base del canal con el epóxico Chema Epox Adhesivo 32 para pegar concreto antiguo (base del canal) con concreto nuevo (pantallas deflectoras).

A) Medición de caudal: El caudal se midió con la ayuda de un vertedero triangular de pared delgada (plancha de metal) construido antes del tramo del canal de transición (en el ingreso) de la estructura hidráulica de concreto [S45_P45_0.20b]. Se realizó el ensayo con un caudal constante de 0.025 m^3/s (25.00 l/s), como se aprecia Figura 143.

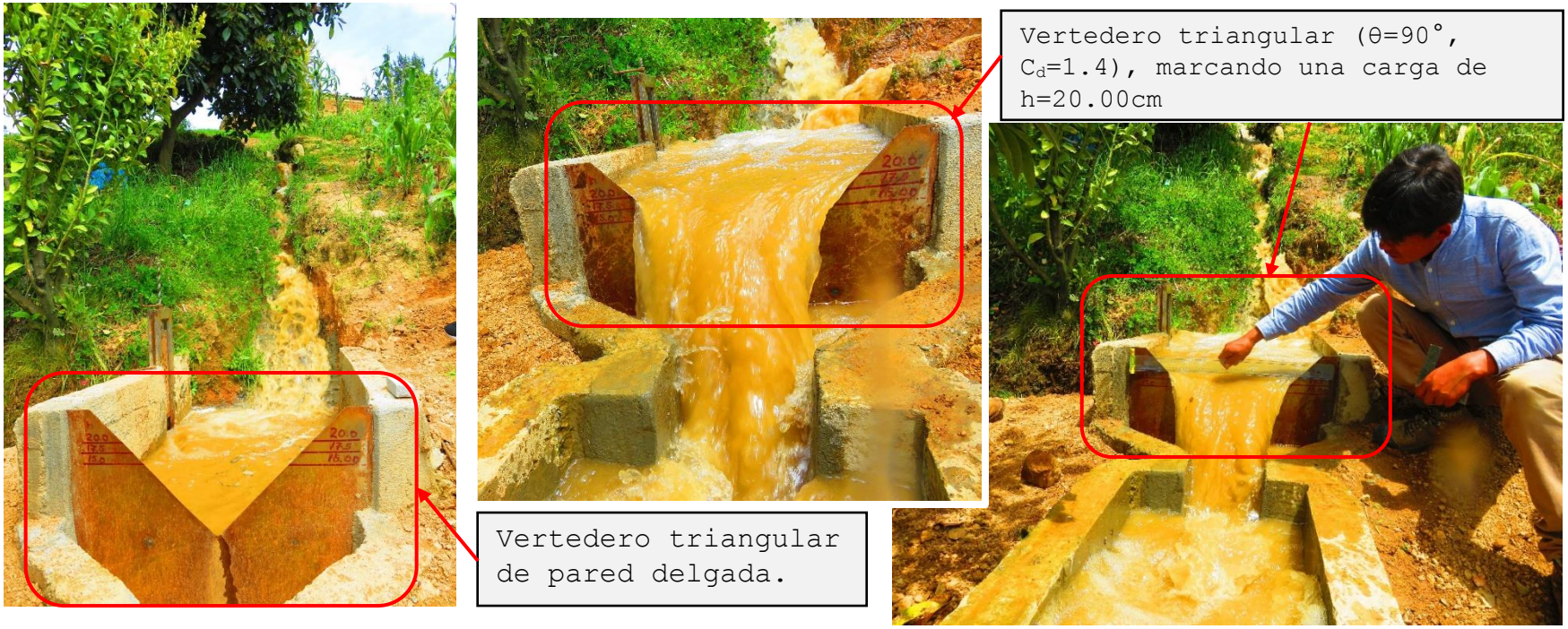


Figura 143. Medición de caudal por el método de vertedero, al lado izquierdo se observa las marcas para carga de agua en el vertedero, en la imagen media se observa que la carga de agua esta alcanzando los 20.00 cm de caraga y en la imagen derecha se esta mididendo la carga de agua en el vertedero, el cual resulto ser h=20.00 cm, para un caudal de 25.00 l/s.

B) Medición de tirante del flujo: La medición del tirante del flujo se realizó con una regla de acero ensamblado a un nivel de mano, desde la progresivas 00+0.00 hasta la progresiva 10+0.00 con un intervalo de 0.10 m. Debido a que el comportamiento del flujo es turbulento, existe una mezcla de agua-aire a lo largo de la trayectoria del flujo, motivo por el cual las medidas del tirante del flujo no pueden ser usadas directamente para estimar la velocidad y la energía específica del flujo. Como se aprecia en la Figura 144 y Figura 145.

Tabla 7: Método de análisis de los parámetros.

Parámetros.	**Método de análisis.**
-Caudal.	-Aforo. -Vertedero triangular
-Tirante de flujo.	-Regla metálica con nivel de mano.
-Pendiente del canal.	-Eclímetro.
-Altura de la pared del canal.	-Flexómetro.
-Pantallas deflectoras (macrorugosidad).	-Flexómetro.
-Temperatura.	-Termómetro.

Figura 144. Medición de los tirantes del flujo, en la imagen izquierda se observa la regla graduada y ensamblada a un nivel de burbuja posicionándose en la progresiva 0+0.00m, en la imagen media se observa el uso de una escuadra para posicionar la regla ensamblada en el eje longitudinal central del canal, y en la imagen del lado derecho se puede apreciar la carga del agua en la regla graduada, el cual marca h=12.00 cm en la progresiva 0+0.00 m.

Figura 145. Medicion de los tirantes del flujo, al lado izquierdo se observa la medida del tirante en el flujo turbulento en la progresiva 06+20.00 m y en la imagen derecha se observa la medida del tirante en el flujo turbulente en la progresiva 03+40.00 m.

C) Medición de la pendiente del canal: La pendiente del canal se midió con un eclímetro, desde la progresivas 00+0.00 hasta la progresiva 10+0.00 con un intervalo de 0.50m. Las medidas de las pendientes en el ensayo se consignan en la Tabla . Ver Figura 146.

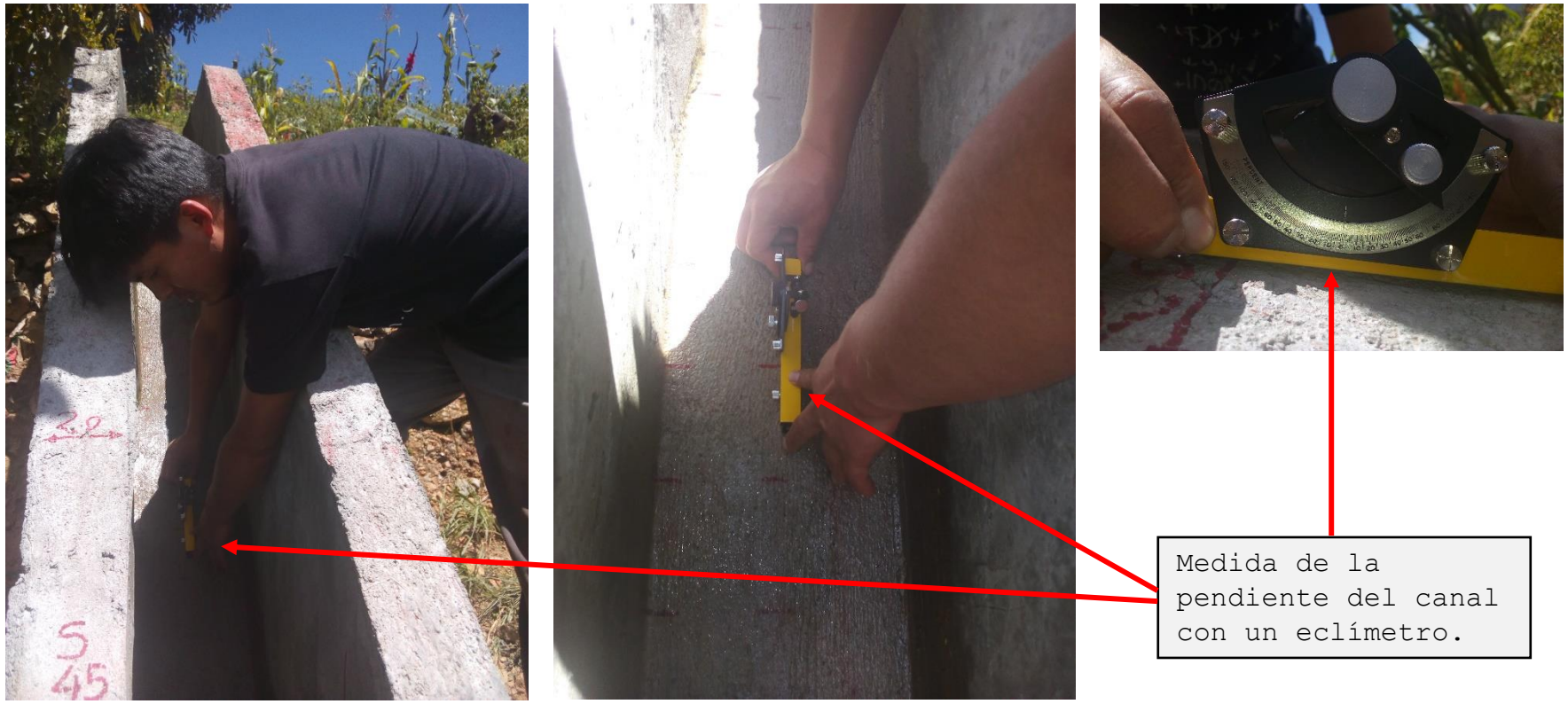


Figura 146. Medicion de la pendiente del canal en intervalos de 1.00 m a lo largo del eje longitudinal del canal, con un eclimetro.

D) Medición de las pantallas deflectoras (macrorugosidades): La medición de las características geométricas de las pantallas deflectoras fueron medidas con un flexómetro de metal previo a al ensamblaje a la base del canal. Ver Figura 147.

Figura 147. Detalles de la colocacion y medidas de las pantallas deflectoras a lo largo de la base del canal de 100% de pendiente. Las pantallas prefabricadas fueron colocados en un angulo de 45° respecto al eje central longitudinal del canal, y las que a su vez fueron pegados a la superficie de la base del canal con un epoxico.

E) Medición de la temperatura: Con el objeto de estimar la viscosidad dinámica del agua se midió la temperatura del flujo al ingreso y salida de la rápida. Se consideró las medidas obtenidas como referenciales, debido a que el flujo es turbulento. Ver Figura 148.

Figura 148. Medicion de la temperatura del agua al incio y antes de terminar el ensayo.

Todas las medidas y observaciones se anotaron en hojas de registro del ensayo, los cuales se presentan en el Anexo 3 (Tabla N°2 y Tabla N°3).

CAPÍTULO V: ANÁLISIS, COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

5.1 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE DATOS.

A) Confiabilidad y validez de la simulación numérica con el software Iber 2.4.2.

La confiabilidad y validez de la simulación numérica con el software Iber 2.4.2 se determinó comparando los tirantes de estas con los tirantes medidos en el modelo físico.

Para evaluar la confiabilidad y validez se calculó el coeficiente α(alpha), propuesto por Lee J. Cronbach en el año 1951.

Para lo cual se usó la siguiente formula:

$$\alpha = \frac{K}{K-1}\left[1 - \frac{\sum V_i}{V_t}\right]$$

Donde:

α, Alfa de Cronbach.

K, Número de ítems.

V_i, Varianza de cada ítem.

V_t, Varianza de los ítems suma.

El coeficiente Alfa de Cronbach es un modelo de consistencia interna, basado en el promedio de las correlaciones entre los ítems (muestras).

Como criterio general, George y Mallery sugieren las recomendaciones siguientes para evaluar los coeficientes de alfa de Cronbach:

a) Coeficiente alfa >0.9 es excelente.
b) Coeficiente alfa >0.8 es bueno.
c) Coeficiente alfa >0.7 es aceptable.
d) Coeficiente alfa >0.6 es cuestionable.
e) Coeficiente alfa >0.5 es pobre.

f) Coeficiente alfa <0.5 es inaceptable.

1) Confiabilidad de los tirantes del flujo de agua en el canal de concreto de 100% de pendiente.

La estadística de fiabilidad se calculó con el software IBM SPSS Statistics 24, cuyo resultado se presenta en la Tabla 8, para mayor referencia ver las Figura 151 y Figura 154.

Tabla 8:Confiabilidad de los tirantes.

Medida	Canal	Modelo	Número de elementos	Desviación Estandar	Coeficiente alfa de Cronbach
Tirante	Sin pantallas deflectoras S45_P00_0.20b	-Físico/Medido	101	1,780	0.876
		-Número Iber 2.4.2		1,115	
	Con pantallas deflectoras S45_P45_0.20b	-Físico/Medido	101	4,640	0.238
		-Número Iber 2.4.3		5,418	

De la Tabla 8, se tiene que tirantes medidos en comparación con los tirantes obtenidos del modelo numérico del canal sin pantallas deflectoras son confiablemente buenos, con un Coeficiente alfa de Cronbach de 0.876.

Sin embargo, en los canales con pantallas deflectoras (S45_P45_0.20b), se tiene un Coeficiente alfa de Cronbach de 0.238, el cual se puede interpretar como que la distribución de los tirantes medidos y simulados son poco similares, o que el software Iber 2.4.2 no es confiable en la simulación de flujos turbulentos y airados, como es el caso del flujo en el canal con pantallas deflectoras. Ver Figura 149 y Figura 150.

2) Validez o exactitud de los tirantes del flujo de agua en el canal de concreto de 100% de pendiente.

La validez de los tirantes obtenidos por el software Iber 2.4.2, se determinó comparándolos con los valores referenciales medidos en modelo físico.

La validez se midió con la correlación de los tirantes del modelo numérico y físico, en el canal sin pantallas deflectoras (S45_P00_0.20b) y canal con pantallas deflectoras (S45_P45_0.20b). Ver Figura 151 y Figura 154.

Tabla 9: Validez de los tirantes del modelo numérico.

Medida	Canal	Modelo	Correlación (R)	Coeficiente de Variación	Gráfico
Tirante	Sin pantallas deflectoras S45_P00_0.20b	-Físico/Medido -Número Iber 2.4.2	0.867	48.19% 35.66%	Figura 6. 1
	Con pantallas deflectoras S45_P45_0.20b	-Físico/Medido -Número Iber 2.4.3	0.137	20.70% 15.72%	Figura 6. 2

Teniendo como un sistema de referencia los datos (curva) medidos en el modelo físico se tiene que:
-De la Tabla 9, los tirantes obtenidos del modelo numérico en comparación con los tirantes medidos del canal sin pantallas deflectoras son válidos, con una correlación de 86.70%.
Sin embargo, en los canales con pantallas deflectoras (S45_P45_0.20b), se tiene una correlación de 0.137, el cual se puede interpretar como que las distribuciones de los tirantes simulados no son válidas en comparación con los tirantes medidos, o que el software Iber 2.4.2 no es válido para la simulación de flujos turbulentos y airados, como es el caso del flujo en el canal con pantallas deflectoras. Ver Figura 149 y Figura 150.

Figura 149. Recorrido de flujo de agua en el canal con pantallas deflectoras en el modelo físico.

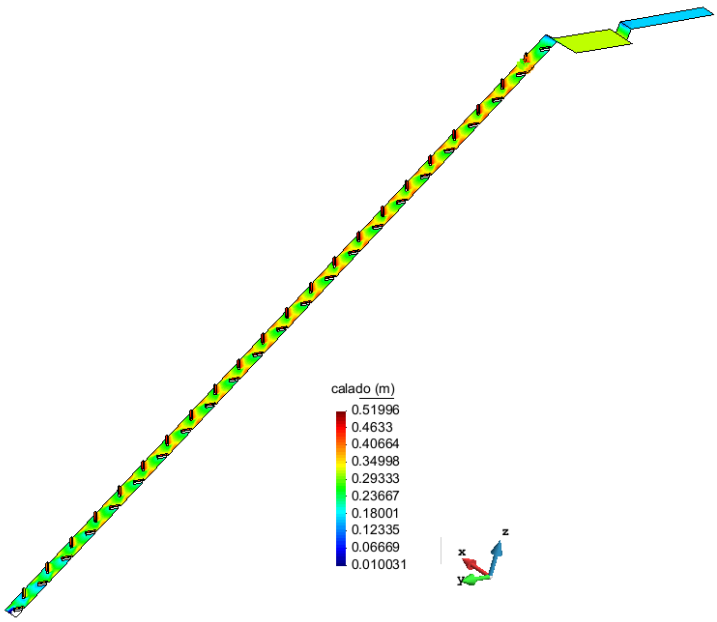


Figura 150. Recorrido de flujo de agua en el canal con pantallas deflectoras en el modelo numérico.

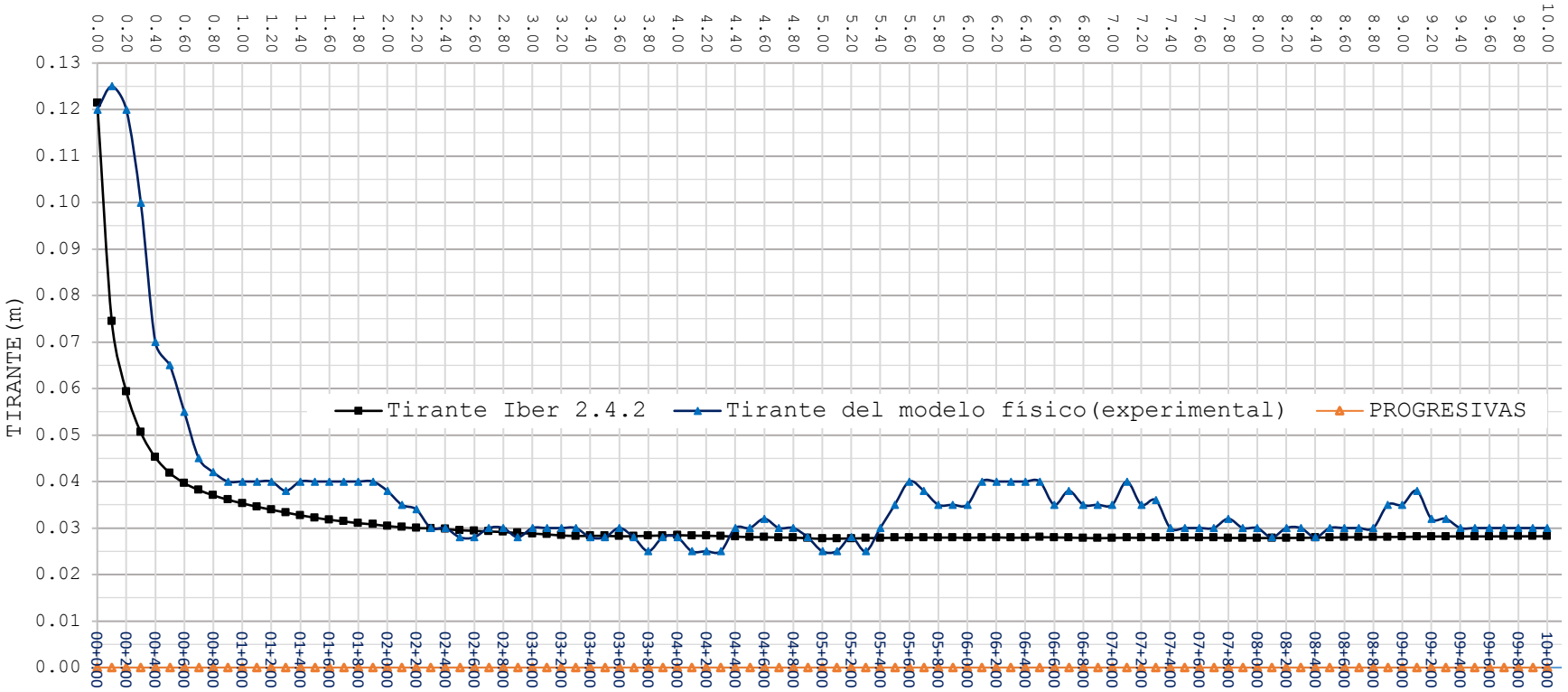


Figura 151. Tirantes medidos en el modelo físico y calculados en el modelo numérico (Iber) en el canal de tipo S45_P00_0.20b (canal sin pantallas deflectoras).

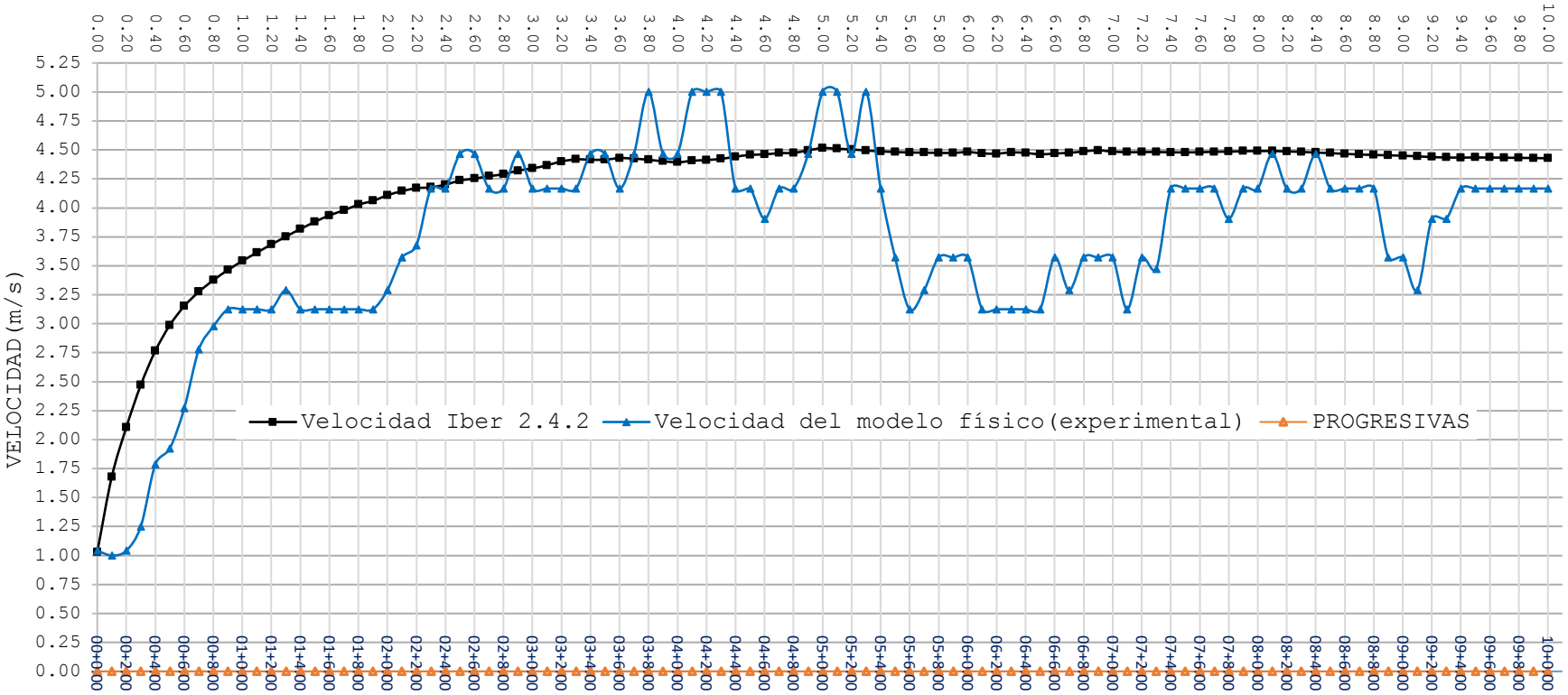


Figura 152. Velocidades calculadas en el modelo físico y numérico (Iber) en el canal de tipo S45_P00_0.20b (canal sin pantallas deflectoras).

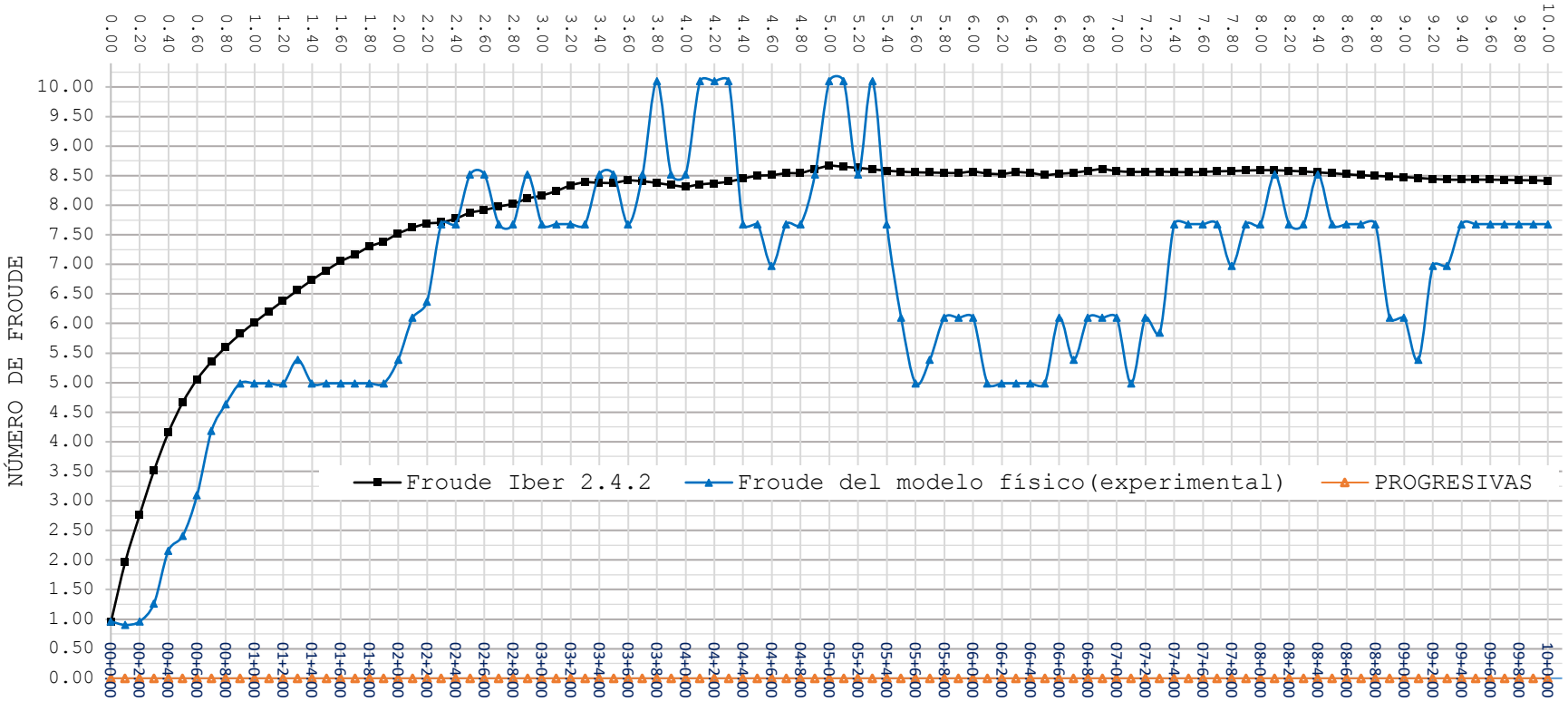


Figura 153. Número de Froude en el modelo físico y numérico (Iber) en el canal de tipo S45_P00_0.20b (canal sin pantallas deflectoras).

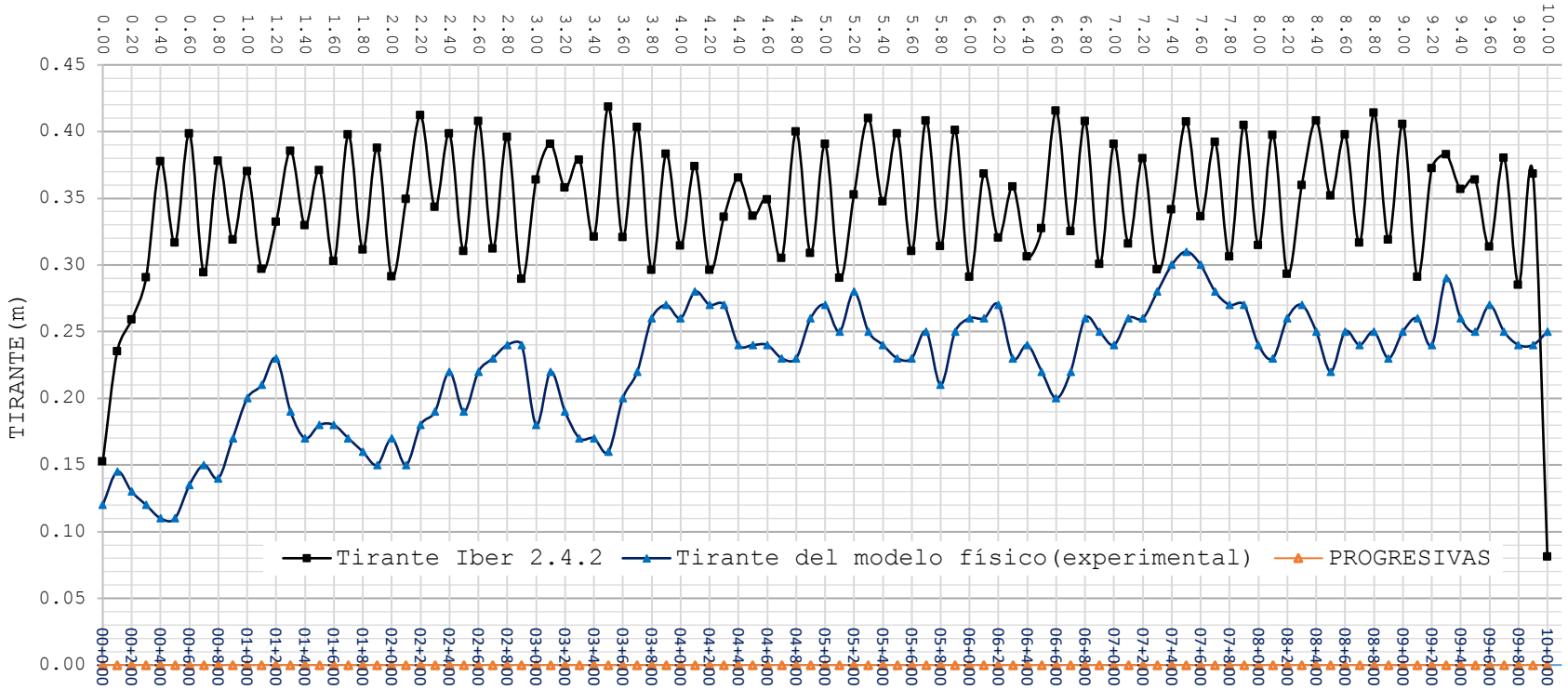


Figura 154. Tirantes medidos en el modelo físico y calculados en el modelo numérico (Iber) en el canal de tipo S45_P45_0.20b (canal con pantallas deflectoras).

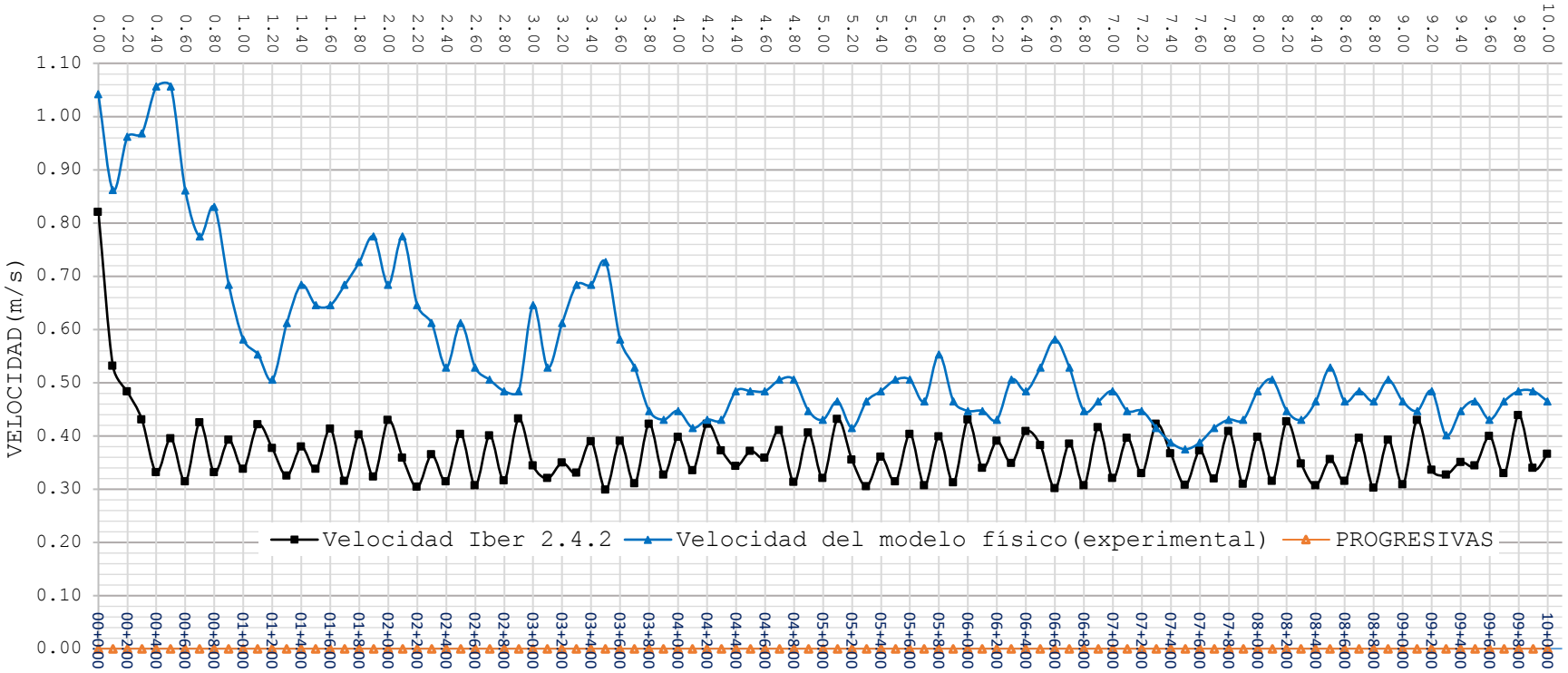


Figura 155. Velocidad calculada en el modelo físico y numérico (Iber) en el canal de tipo S45_P45_0.20b (canal con pantallas deflectoras).

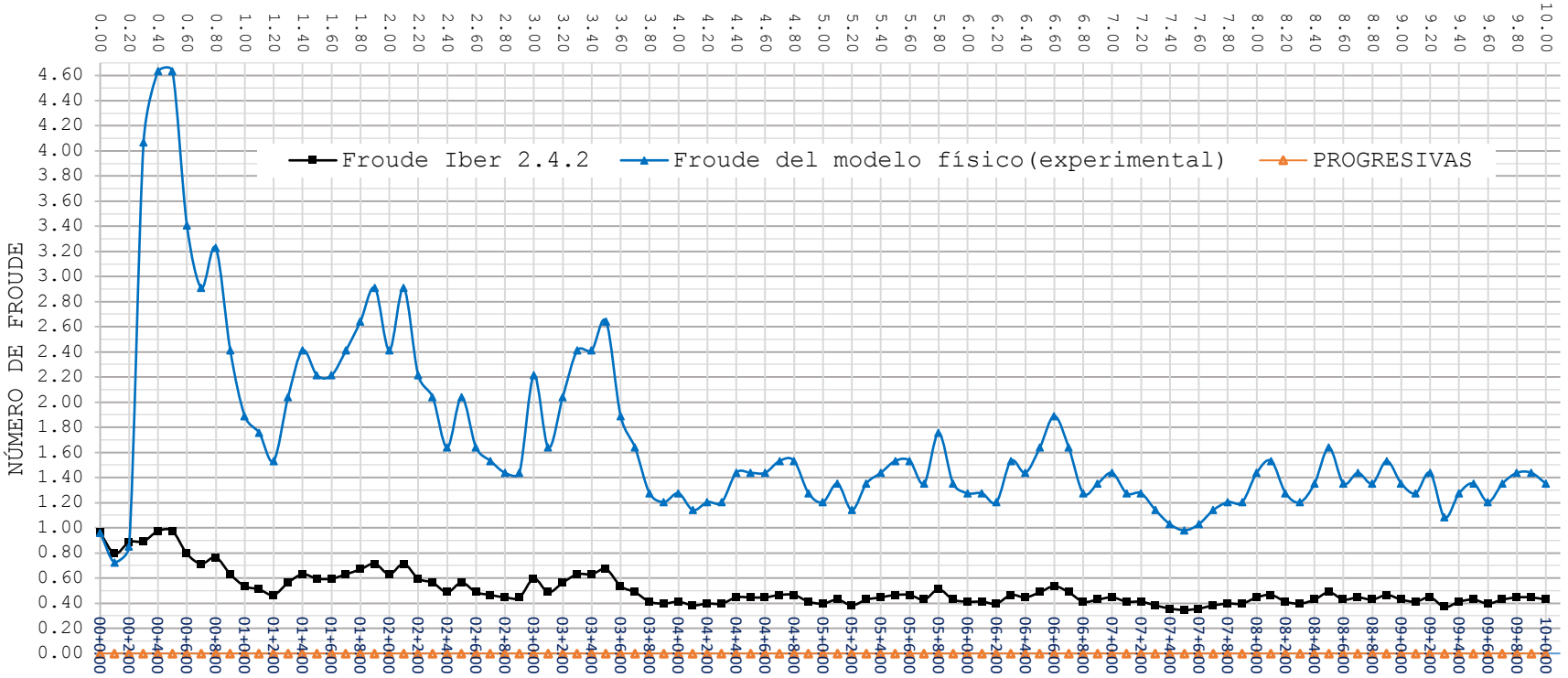


Figura 156. Número de Froude en el modelo físico y numérico (Iber) en el canal de tipo S45_P45_0.20b (canal con pantallas deflectoras).

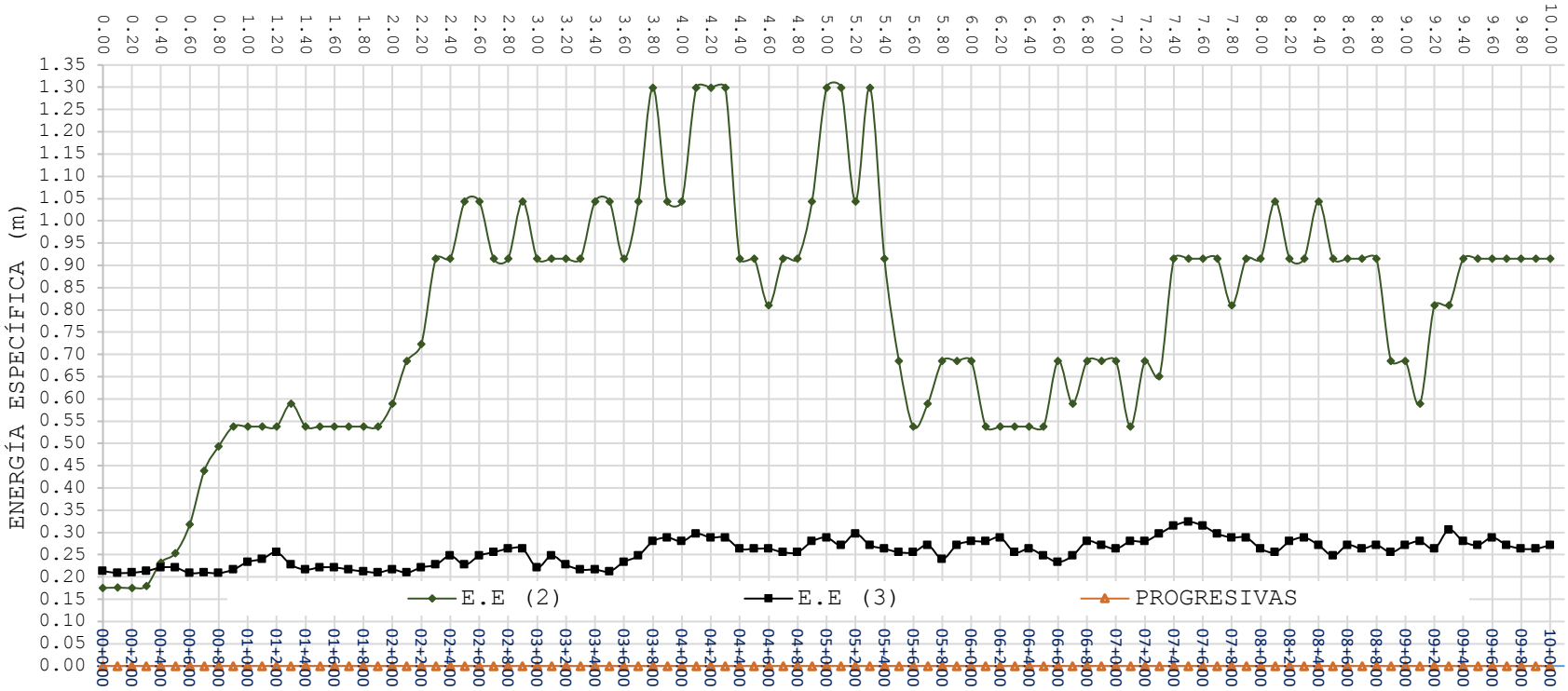


Figura 157. Energía Específica: Donde E.E (2) es la energía específica del flujo sin la presencia de pantallas deflectoras y la EE (3) es la energía específica del flujo con pantallas deflectoras, ambos en un canal de 10.00 m de largo y una pendiente de 100%.

B) Prueba de hipótesis.

1) Planteamiento de la hipótesis nula y alternativa.

-Hipótesis nula (H_0).

H_0 =La disipación de energía específica del flujo de agua no es significativamente diferente en canales de concreto de 100% de pendiente con pantallas deflectoras en comparación con canales de concreto de 100% de pendiente sin pantallas deflectoras.

Donde:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

y:

μ_2, media de la energía específica en canales con pantallas deflectoras.

μ_1, media de la energía específica en canales sin pantallas deflectoras.

-Hipótesis alterna (H_1).

$H_1 =$ La disipación de energía específica del flujo de agua es significativamente diferente en canales de concreto de 100% de pendiente con pantallas deflectoras en comparación con canales de concreto de 100% de pendiente sin pantallas deflectoras.

Donde:

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

2) Nivel de Significancia y determinación de la zona de aceptación y rechazo de la hipótesis Nula.

La máxima cantidad de error que se aceptó para dar como válido la hipótesis de investigación (alterna) es de un $\alpha/2=0.0025$ y $\alpha=5.00\%$. La zona de aceptación y rechazo de la hipótesis Nula se muestra en la Figura 158.

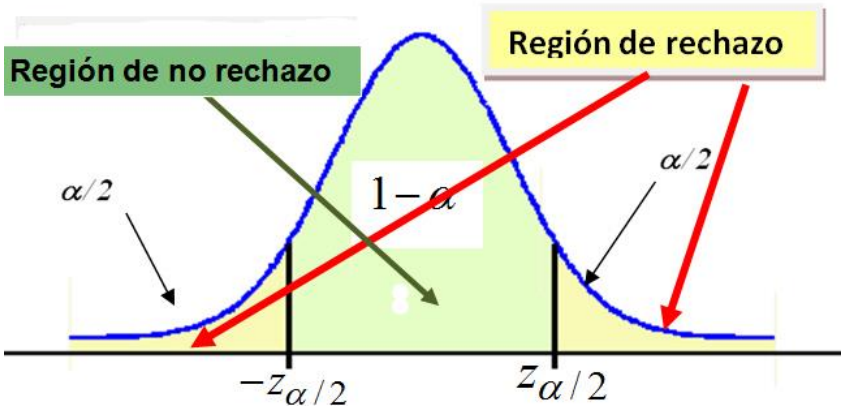


Figura 158. Zona de aceptación y rechazo de la hipótesis Nula. Dónde: $-Z_{\alpha/2}= -1.96$ y $Z_{\alpha/2}= 1.96$, para un $\alpha=0.05$ y $\alpha=0.025$. Prueba de hipótesis con contraste bilateral.

Por el tipo de variable fija, el estudio es longitudinal con muestras relacionadas. Es decir, se comparó las muestras de los datos calculados de la energía específica del flujo antes y después de usar las pantallas deflectoras en el canal de concreto de 100% de pendiente.

La aeración del flujo en el canal sin pantallas deflectoras (S45_P00_0.20b) se despreció debido a que el flujo no alcanzado más de 7.00 m/s indicado por la teoría.

Los tirantes del flujo medidos en el canal con pantallas deflectoras (S45_P45_0.20b), por su turbulencia han sido considerados como un tirante con 90% de aire.

Los cálculos y las consideraciones para determinar la energía específica del flujo y la eficiencia en la disipación de energía específica de las pantallas deflectoras se detallan en el diagrama de la Figura 159.

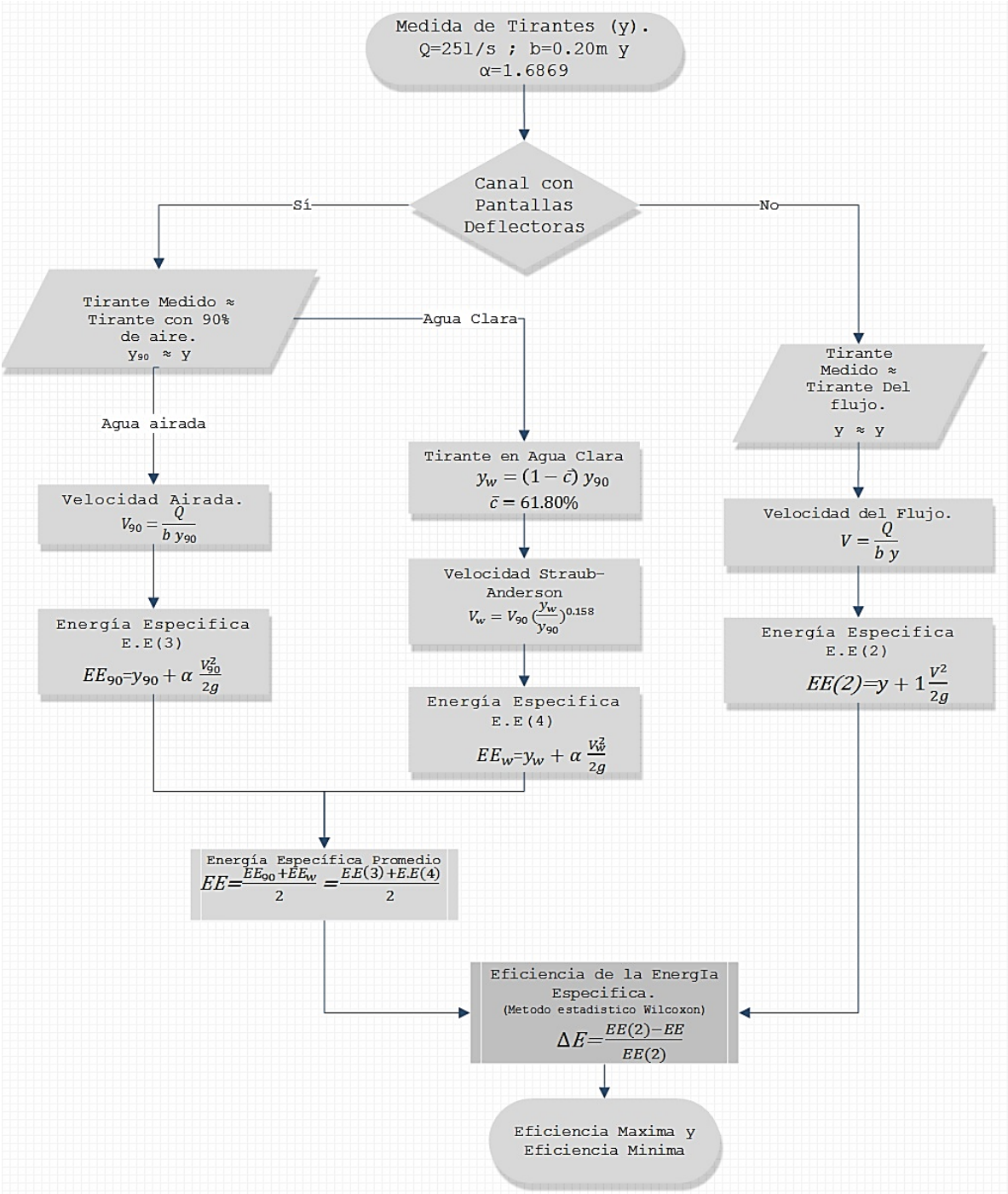


Figura 159. Diagrama del cálculo de la energía específica y calculo la eficiencia con el uso de pantallas deflectoras (Ver *Figura 160*).

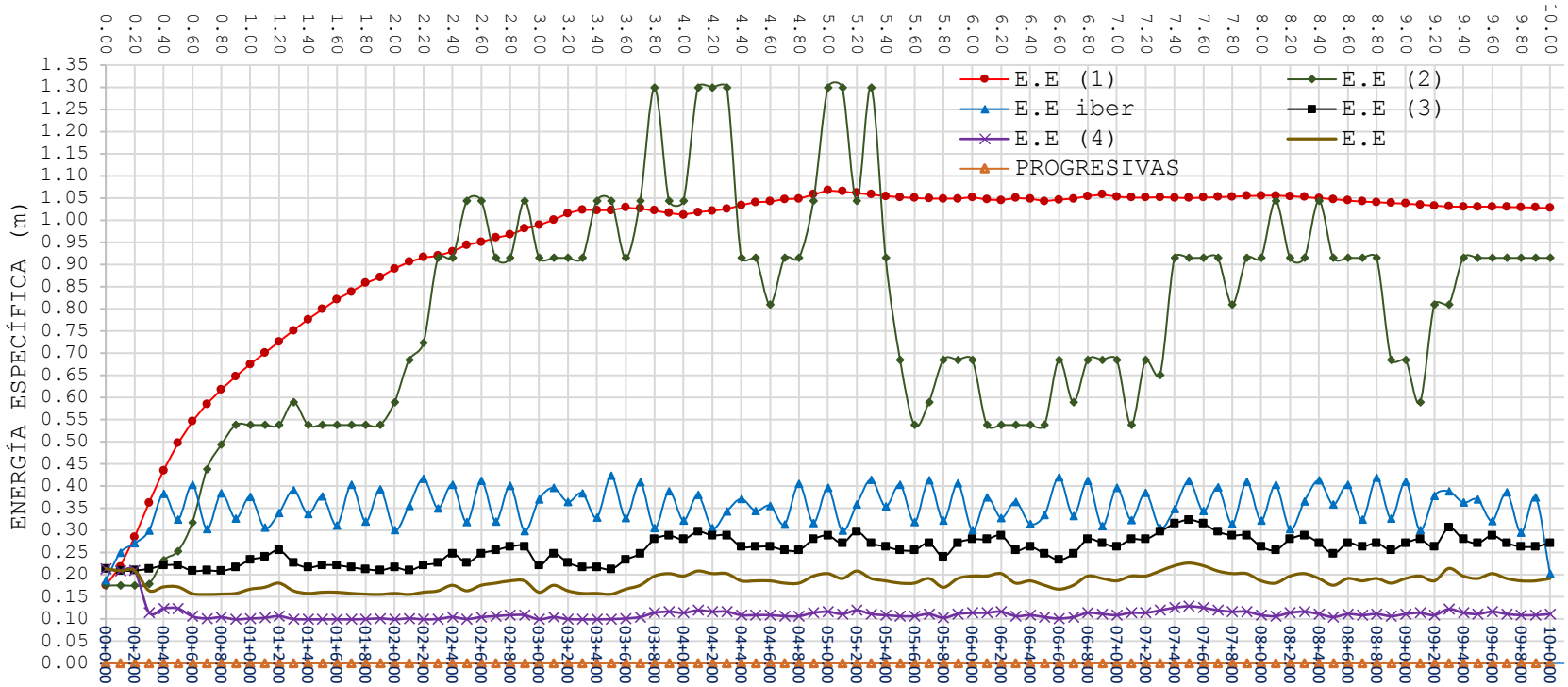


Figura 160. Energía Específica del flujo de agua a lo largo del canal de concreto de 100% de pendiente y pantallas deflectoras de 45° (S45_P45_0.20b).

Dónde: E.E(1), es la Energía Específica sin pantallas deflectoras con el software Iber 2.4.2; E.E(2), es la Energía Específica sin pantallas deflectoras medidos; E.E Iber, es la Energía Específica estimado con el software Iber 2.4.2 con pantallas deflectoras; E.E (3), es la Energía Específica aparente airada medido con pantallas deflectoras; E.E(4), es la Energía Específica estimado en agua clara según Straub-Anderson; E.E, es la Energía Específica media de E.E(3) y E.E(4). Se ha considerado la concentración de aire media de $\bar{C}$=61.18%, presentado por Naudascher.

3) Prueba de normalidad.

Se usó la prueba Kolmogorov-Smirnov debido a que la muestra contiene más de 30 individuos.

Se calculó el P-valor de la energía específica antes y después de usar pantallas deflectoras en el canal de 100% de pendiente, teniendo en consideración que el intervalo de confianza para la media de 95.00%.

Los resultados se detallan en la Tabla 10.

Tabla 10: Pruebas de normalidad.

Pruebas de normalidad							
	Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk			Gráfico
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.	
E.E_S45_P00_0.20b	0.204	101	0.000	0.938	101	0.000	Figura 173
E.E_S45_P45_0.20b	0.096	101	0.022	0.960	101	0.004	Figura 174

a. Corrección de significación de Lilliefors

De la Tabla 10 se tiene que el P-valor de la distribución de la densidad de datos de la energía específica en el canal sin pantallas deflectoras (E.E_S45_P00_0.20b) y del canal con pantallas deflectoras(E.E_S45_P45_0.20b) es de 0.00 y 0.022 respectivamente, los que a su vez son menores al nivel de significación establecido α=0.005, por lo tanto la densidad de datos de la energía específica en los canales no refleja una distribución normal. En la Figura 157 se puede observar que las muestras presentan un patrón ciclito a través del largo del canal (progresiva), lo que nos puede indicar que los datos no forman una muestra aleatoria (Navidi, 2006, pág. 311).

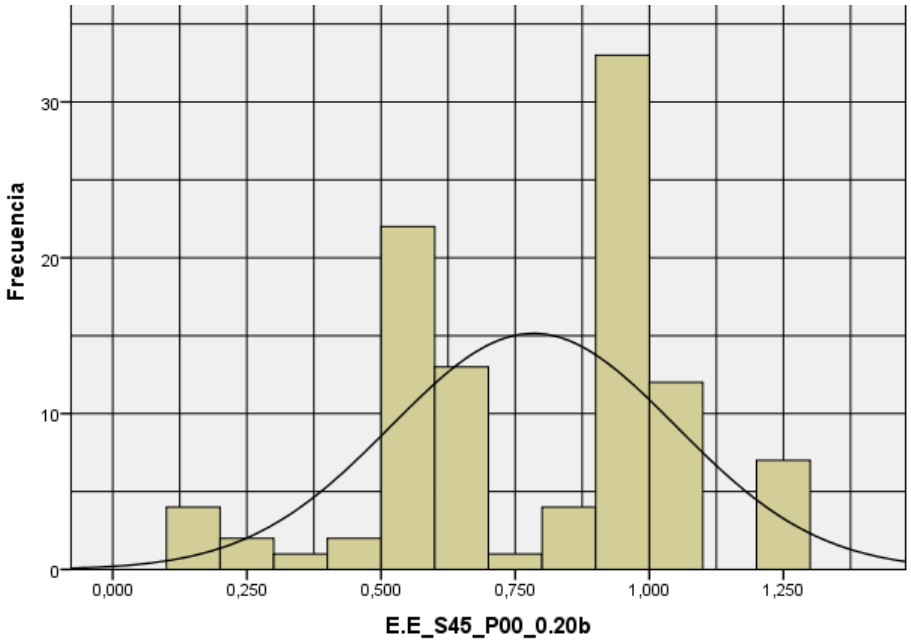


Figura 161. Distribución de la Energía Específica en el canal S45_P00_0.20b

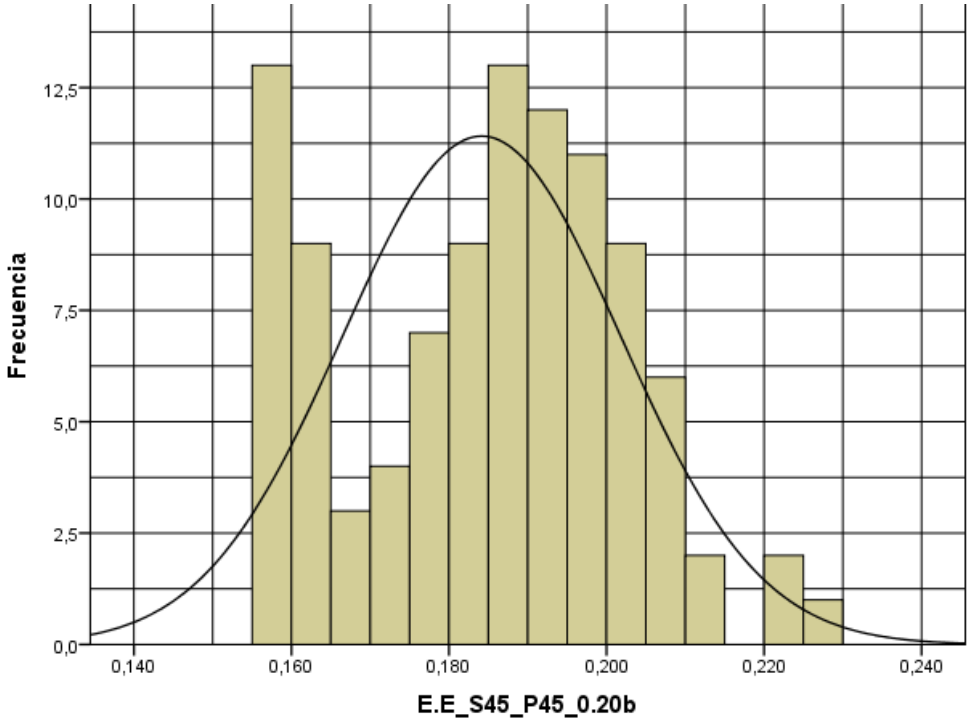


Figura 162. Distribución de la Energía Específica en el canal S45_P45_0.20b

El análisis descriptivo de la energía específica calculados a partir de los datos tomados en campo de los canales S45_P00_0.20b y S45_P45_0.20b se detallan en la Tabla 11.

Tabla 11: Características descriptivas estadísticas de la energía específica.

			Estadístico	Error estándar
E.E_S45_P00_0.20b	Media		0.78402	0.026469
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	0.73151	
		Límite superior	0.83653	
	Media recortada al 5%		0.78850	
	Mediana		0.91500	
	Varianza		0.071	
	Desviación estándar		0.266015	
	Mínimo		0.175	
	Máximo		1.299	
	Rango		1.124	
	Rango intercuartil		0.377	
	Asimetría		-0.241	0.240
	Curtosis		-0.096	0.476
E.E_S45_P45_0.20b	Media		0.18414	0.001757
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	0.18065	
		Límite superior	0.18762	
	Media recortada al 5%		0.18379	
	Mediana		0.18600	
	Varianza		0.000	
	Desviación estándar		0.017653	
	Mínimo		0.156	
	Máximo		0.226	
	Rango		0.070	
	Rango intercuartil		0.028	
	Asimetría		0.009	0.240
	Curtosis		-0.790	0.476

Debido a que las distribuciones de las energías específicas no obedecen una distribución paramétrica (distribución normal), se realizó pruebas no paramétricas de hipótesis.

4) Prueba de hipótesis para las poblaciones relacionadas.

Se probó que los valores de la energía específica del flujo de agua en canales con pantallas deflectoras y sin pantallas deflectoras son

significativamente diferentes, con una confiabilidad mínima de 95.00%, mediante la prueba del rango con signo de Wilcoxon.

Para calcular el valor de Z, se usaron los datos de la energía específica del flujo en canales sin pantallas deflectoras (S45_P00_0.20b) y canales con pantallas deflectoras (S45_P45_0.20b).

El valor Z calculado para que la H_0 sea rechaza no debe encontrarse en el intervalo $[-1.96\,;1.96]$, los detalles se consignan en la Tabla 12.

$$Z \notin [-1.96\,;1.96] \rightarrow H_0, se\ rechaza.$$

Tabla 12: Prueba de hipótesis de la diferencia significativa de la energía específica.

Estadísticos de Prueba[a]	
	E.E_S45_P45_0.20b/ E.E_S45_P00_0.20b
Z	-8.695[b]
Sig. asintótica (bilateral)	$3.4596x10^{-8}$

a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon
b. Se basa en rangos positivos.

Para n>20, se normaliza y se recomienda usar la Tabla Z:

$$Z = -4.3475 \sim N(0,1)$$

$$P(Z) = 2xP(-4.3475) = 3.4596x10^{-18} \approx 0.00 = 0.00\%$$

$$Z = -4.3475 < -Z_{\alpha/2} = -1.96$$

C) Eficiencia de las pantallas deflectoras en la disipación de energía específica.

Para calcular la eficiencia de en la disipación de energía, con una confiabilidad mínima de 95.00%. La máxima cantidad de error que se aceptó para dar como valido la hipótesis de investigación (alterna) es de un α=0.005 o α=5.00%.

a) La energía específica del flujo en el canal sin pantallas deflectoras es mayor que la energía específica del flujo en el canal con pantallas deflectoras.

Sea:

μ_1, la energía específica en canales sin pantallas deflectoras (E.E_S45_P00_0.20b).

μ_2, la energía específica en canales con pantallas deflectoras (E.E_S45_P45_0.20b).

Se plantea las hipótesis:

La energía específica del flujo en el canal de tipo S45_P00_0.20b es significativamente mayor a la energía específica del flujo en el canal de tipo S45_P45_0.20b.

Hipótesis nula: H_0: $\mu_1 - \mu_2 = 0 \ \vee \ \mu_1 = \mu_2$

Hipótesis alterna: H_1: $\mu_1 - \mu_2 > 0 \ \vee \ \mu_1 > \mu_2$

Debido a que las dispersiones de datos no se comportan como una distribución normal (paramétrica), se realizó la prueba de hipótesis mediante la suma de rango de Wilcoxon o también llamado prueba de Mann-Whitney. Como se consigna en la Tabla 13

Tabla 13: Prueba de hipótesis: H_1: $\mu_1 - \mu_2 > 0$

Método	Valor W	Valor p
No ajustado para empates	15071.00	0.000
Ajustado para empates	15071.00	0.000

W, coeficiente de Wilcoxon.

De la Tabla 13, de tiene que el P-Valor=0.00, es menor a α=0.005, entonces se acepta la hipótesis alternativa (H_1) y se rechaza la hipótesis nula (H_0).

$$P_{Valor} = 0.00 < 0.005 \rightarrow H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0 \ \vee \ \mu_1 > \mu_2$$

Entonces, la energía específica en el canal de tipo S45_P45_0.20b es significativamente menor a la energía específica del flujo en el canal de tipo S45_P00_0.20b.

b) Se calculó los valores máximos y mínimos de la energía específica con una confiabilidad de 95.00% por el método estadístico Wilcoxon, del flujo en el canal de tipo S45_P00_0.20b y S45_P45_0.20b según corresponda, a fin de poder determinar la eficiencia máxima, mínima y media en la disipación de energía de las corrientes de agua en canales de concreto de 100% de pendiente empleando pantallas deflectoras.

- El máximo valor de la energía específica en el canal de tipo S45_P00_0.20b, considerando las siguientes hipótesis:

  -Hipótesis nula : H_0: $\mu_1 > z_1$

  -Hipótesis alterna : H_1: $\mu_1 \leq z_1$

  Se calculó el valor de $z_1 = 0.82\, m$.

- El mínimo valor de la energía específica en el canal de tipo S45_P00_0.20b, considerando las siguientes hipótesis:

  -Hipótesis nula : H_0: $\mu_1 < z_2$

  -Hipótesis alterna : H_1: $\mu_1 \geq z_2$

  Se calculó el valor de $z_2 = 0.726\, m$.

- El máximo valor de la energía específica en el canal de tipo S45_P45_0.20b, considerando las siguientes hipótesis:

  -Hipótesis nula : H_0: $\mu_2 > z_3$

  -Hipótesis alterna : H_1: $\mu_2 \leq z_3$

  Se calculó el valor de $z_3 = 0.18\, m$.

- El mínimo valor de la energía específica en el canal de tipo S45_P45_0.20b, considerando las siguientes hipótesis:

  -Hipótesis nula : H_0: $\mu_2 < z_4$

  -Hipótesis alterna : H_1: $\mu_2 \geq z_4$

  Se calculó el valor de $z_4 = 0.18\,m$.

Estas cuatro hipótesis se pueden resumir en la Tabla 14.

c) Determinación de la eficiencia de la disipación de energía específica de las corrientes de agua.

Usando la Ecuación (31), con los valores de la Tabla 14 y teniendo como referencia la Figura 163.

- Eficiencia máxima de la disipación de energía específica.

  Se tiene:

$$H_1 = 0.820\,m$$

$$H_2 = 0.180\,m$$

Se reemplazó en la Ecuación (31).

$$\Delta E = \frac{H_1 - H_2}{H_1} x100\%$$

$$\Delta E_{max} = \frac{H_1 - H_2}{H_1} x100\%$$

$$\Delta E_{max} = \frac{0.820 - 0.180}{0.820} x100\%$$

$$\Delta E_{max} = 0.7805 x100\%$$

$$\Delta E_{max} = 78.05\%$$

- Eficiencia mínima de la disipación de energía específica.

  Se tiene:

$$H_1 = 0.726\ m$$

$$H_2 = 0.180\ m$$

Se reemplazó en la Ecuación (31).

$$\Delta E = \frac{H_1 - H_2}{H_1} x100\%$$

$$\Delta E_{min} = \frac{H_1 - H_2}{H_1} x100\%$$

$$\Delta E_{min} = \frac{0.726 - 0.180}{0.726} x100\%$$

$$\Delta E_{min} = 0.7521 x100\%$$

$$\Delta E_{min} = 75.21\%$$

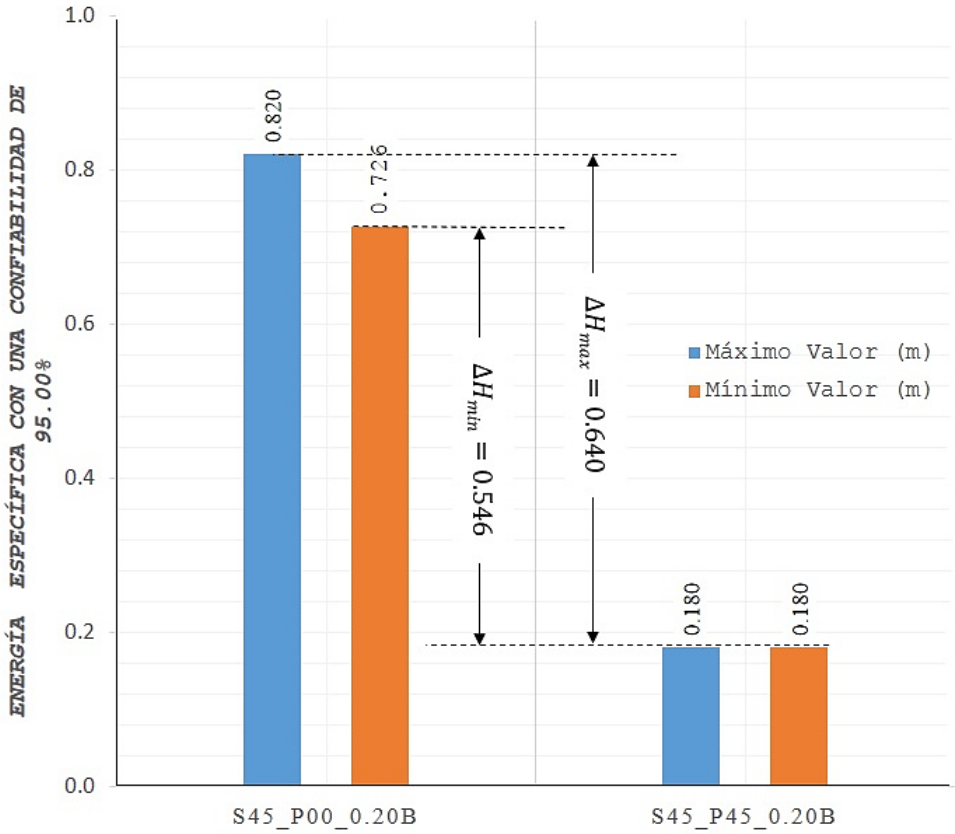


Figura 163. Energía específica máxima y mínima con un intervalo de confianza de 95.00% del flujo de agua en el canal con pantallas deflectoras y canal sin pantallas deflectoras (Ver también *Figura 157*).

Tabla 14: Pruebas de hipótesis para determinar los máximos y mínimos valores de la energía específica.

Población-Muestra	Hipótesis	W	Z_i	P-Valor	
E.E_S45_P00_0.20b[1]	H_0: $\mu_1 \geq Z_1$	2020	0.820	0.030	H_0: $\mu_1 \geq 0.820$; Se rechaza
	H_1: $\mu_1 < Z_1$				H_1: $\mu_1 < 0.820$; Se acepta
E.E_S45_P00_0.20b[2]	H_0: $\mu_1 \leq Z_2$	3611	0.726	0.000	H_0: $\mu_1 \geq 0.726$; Se rechaza
	H_1: $\mu_1 < Z_2$				H_1: $\mu_1 < 0.726$; Se acepta
E.E_S45_P45_0.20b[3]	H_0: $\mu_2 \geq Z_3$	2059	0.180	0.040	H_0: $\mu_2 \geq 0.180$; Se rechaza
	H_1: $\mu_2 < Z_3$				H_1: $\mu_2 < 0.180$; Se acepta
E.E_S45_P45_0.20b[4]	H_0: $\mu_2 \leq Z_4$	2059	0.180	0.013	H_0: $\mu_2 \geq 0.180$; Se rechaza
	H_1: $\mu_2 < Z_4$				H_1: $\mu_2 < 0.180$; Se acepta

Donde en todos los casos, el número de valores para cada muestra es 101 (n=101) y una significación estadística de 5.0% (α=0.05) y "W" es el Estadístico de Wilcoxon.

[1] el máximo valor de la energía específica en el canal sin pantallas deflectoras es Z_1 (Z_1=0.820m)

[2] el mínimo valor de la energía específica en el canal sin pantallas deflectoras es Z_2 (Z_2=0.726m)

[3] el máximo valor de la energía específica en el canal con pantallas deflectoras es Z_3 (Z_3=0.180m)

[4] el mínimo valor de la energía específica en el canal con pantallas deflectoras es Z_4 (Z_4=0.180m)

Se estimó la eficiencia media como el valor promedio de la eficiencia máxima y mínima.

$$\Delta E_{media} = \frac{\Delta E_{max} + \Delta E_{min}}{2}$$

$$\Delta E_{media} = \frac{\Delta E_{max} + \Delta E_{min}}{2}$$

$$\Delta E_{media} = \frac{78.05\% + 75.21\%}{2}$$

$$\Delta E_{media} = 76.63\%$$

Adicionalmente se determinó los valores máximos y mínimos del tirante, velocidad y Número de Froude del flujo en los canales de tipo S45_P00_0.20b y S45_P45_0.20b, con una confiabilidad de 95.00% usando el Método de Wilcoxon. Ver Figura 164, Figura 165 y Figura 166.

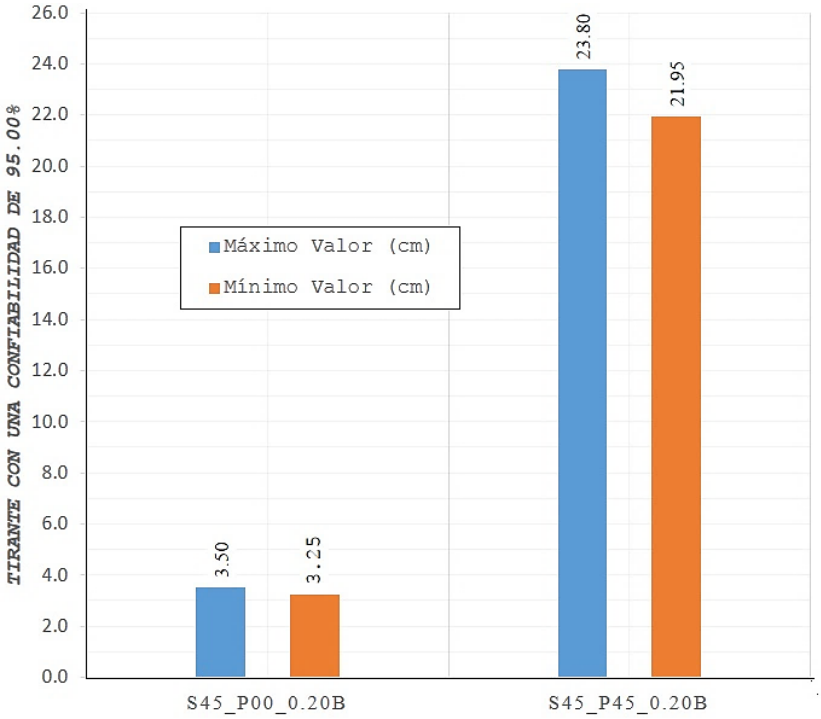


Figura 164. Tirante máxima y mínima con un intervalo de confianza de 95.00% del flujo de agua en el canal con pantallas deflectoras y canal sin pantallas deflectoras (Ver también *Figura 151* y *Figura 154*).

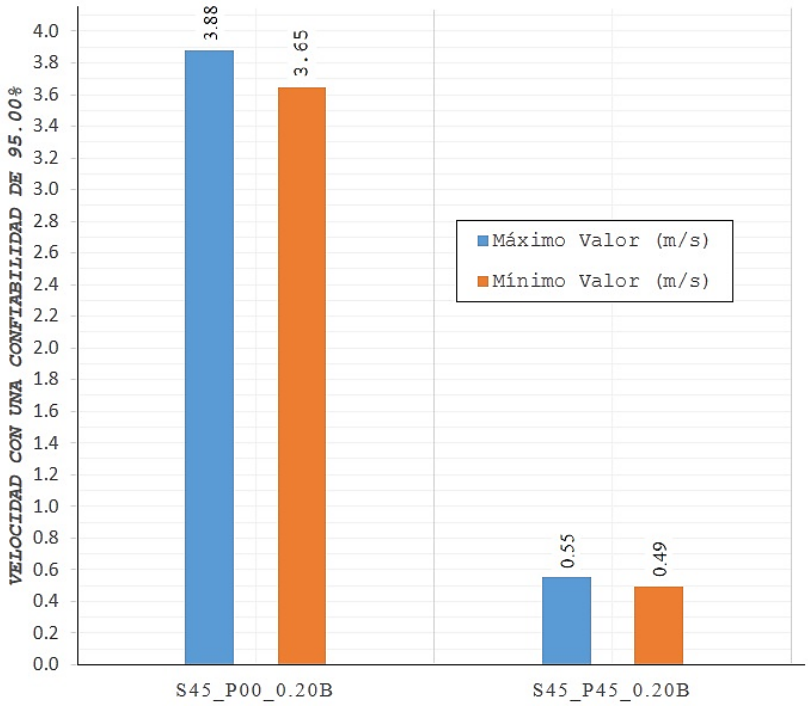


Figura 165. Velocidad máxima y mínima con un intervalo de confianza de 95.00% del flujo de agua en el canal con pantallas deflectoras y canal sin pantallas deflectoras (Ver también *Figura 152* y *Figura 155*).

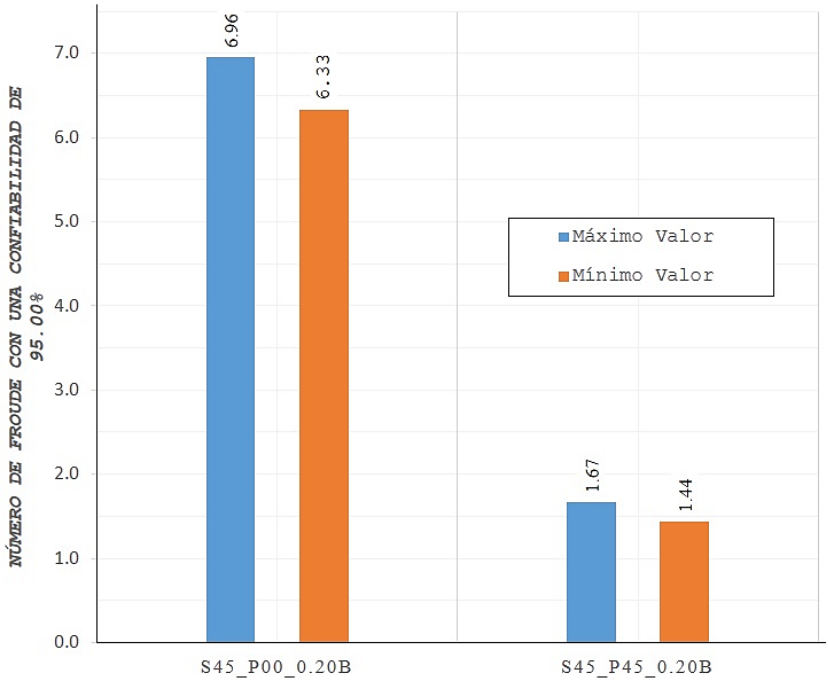


Figura 166. Número de Froude máxima y mínima con un intervalo de confianza de 95.00% del flujo de agua en el canal con pantallas deflectoras y canal sin pantallas deflectoras (Ver también *Figura 153* y *Figura 156*).

D) Descripción de fenómenos locales.

- Formación de Ondas.

  En el canal con pantallas deflectoras el flujo presentan oleadas de borde turbulentos con crestas separadas y regiones agitadas a lo largo del canal. Estas olas presentan un comportamiento cíclico y son denominadas ondas estacionarias.

  Las ondas estacionarias son pronunciadas y por su comportamiento hacen que haya perdida de agua por salpicadura a lo largo del canal.

  En la Figura 167 se presenta el comportamiento ondulatorio de flujo a lo largo del canal.

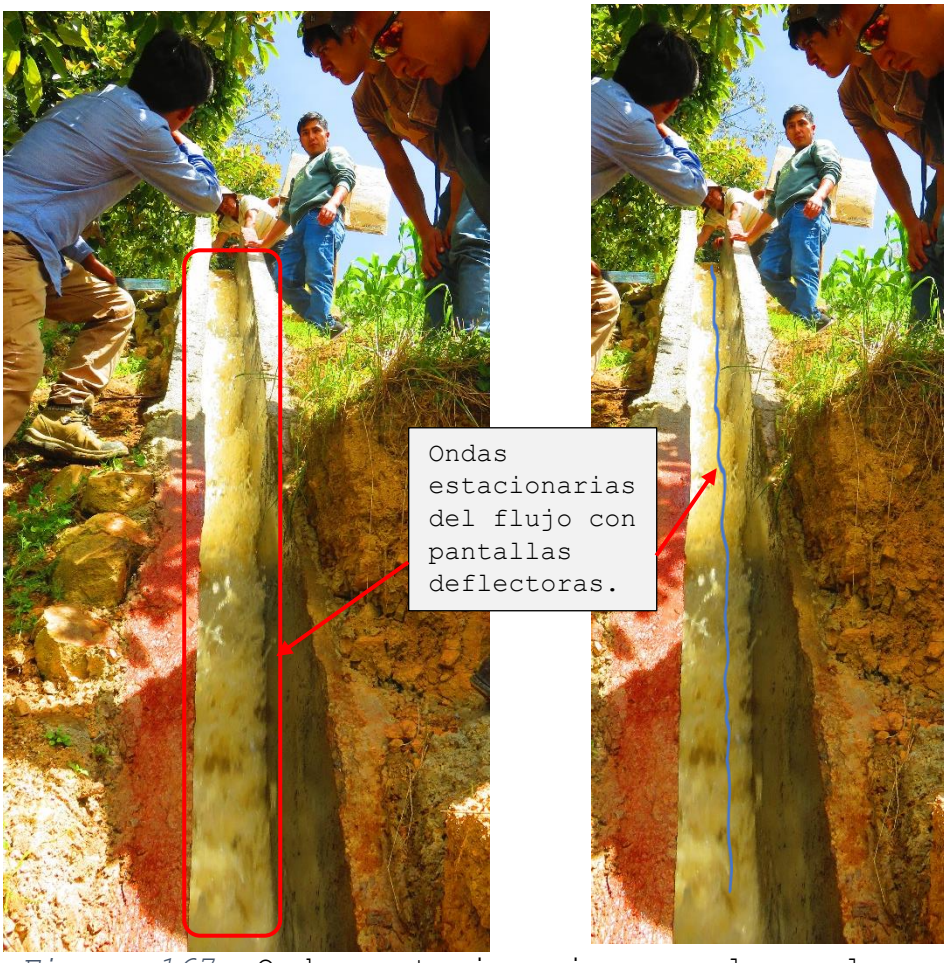


Figura 167. Ondas estacionarias en el canal con pantallas deflectoras.

No hay presencia de ondas en el canal sin pantallas deflectoras, sin embargo se puede apreciar una perturbación en los tirantes a partir de la progresiva 05+3.00 m, donde los tirantes llegan a su mayor dimensión, midiendo hasta 4.00 cm, y se puede ver en la Figura 151, es en este punto donde la velocidad mínima puede llegar a ser 3.12m/s, y se puede ver en la Figura 152.

Figura 168. Tirante del flujo en el canal sin pantallas deflectoras.

La presencia de ondas estacionarias debido a las pantallas deflectoras a lo largo de canal, hacen que el flujo presente diferentes velocidades en cada sección transversal del canal, por ello para

se estimó el valor del coeficiente de Coriolis a partir de las velocidades encontradas en la simulación numérica y presentadas en la Figura 154, de donde para los cálculos efectuados en la presente investigación se ha considerado tomar el valor de $\alpha = 1.6809$.

- Aireación.
  La aireación se presenta a lo largo del canal con pantallas deflectoras, como se puede apreciar en la Figura 169 y Figura 170. Dicha aireación es casi nula en el canal con pantallas deflectoras, aunque es preciso mencionar que a partir de la progresiva 05+3.00 es posible observar mayor cantidad de burbujas de aire.

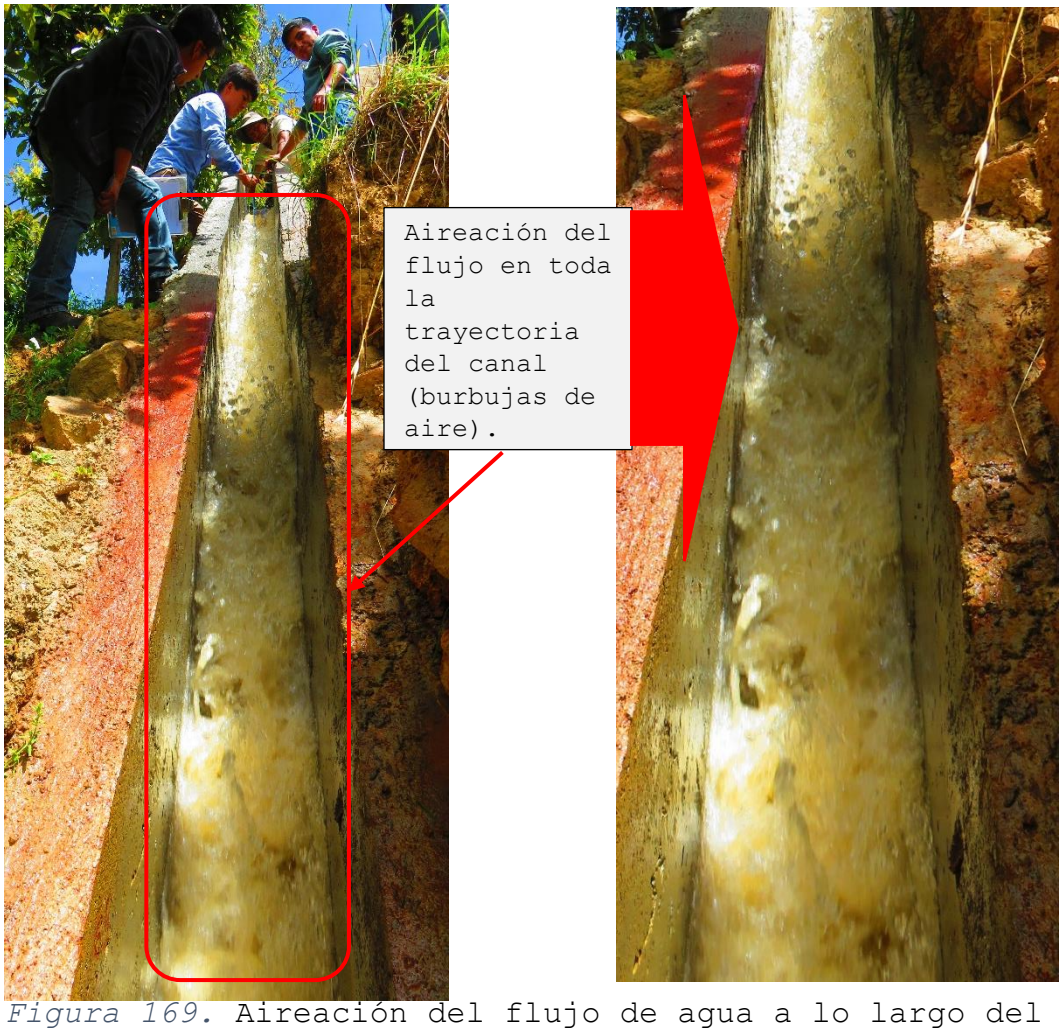


Figura 169. Aireación del flujo de agua a lo largo del canal con pantallas deflectoras.

La aireación en el canal de tipo S45_P45_0.20b se presenta de manera constante a partir de la progresiva 00+2.00 m, la concentración media del aire atrapado en el flujo a lo largo del canal se estimó según visto en marco teórico, en la Figura 23, donde Straub demostró experimentalmente que para pendientes de 45°, la concentración de aire media $\bar{c} = 0.618$ (Tabla 15), para los cálculos realizados en la presente investigación se consideró la concentración de aire media de 61.80%.

La aireación del flujo en el canal con pantallas deflectoras se presenta en la Figura 169 *y* Figura 170.

Tabla 15: Distribución de la concentración media de aire.

Pendiente del canal	Concentración Media*
75.00°	0.715
60.00°	0.675
45.00°	0.618
37.50°	0.560
30.00°	0.410
22.50°	0.302
15.00°	0.245
7.50°	0.137

*en función del ángulo de inclinación de la rápida.

Figura 170. Presencia de burbujas de aire a lo largo del canal con pantallas deflectoras.

- Cavitación.

  No fue posible poder observar el fenómeno denominado cavitación, debido a que el concreto es un material opaco, pero no se puede descartar la presencia de este fenómeno, debido a que a la disposición y configuración de las pantallas deflectoras y errores constructivos. Es posible que el agua que pasa a gran velocidad por la arista afilada (pantalla deflectora) haya producido una zona de baja presión que haya llegan a igualar a la presión del aire.

5.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

- La determinación experimental de la diferencia significativa en la disipación de energía en el canal de concreto de 100% de pendiente con pantallas deflectoras y sin pantallas deflectoras de una longitud de 10.00 m y con un caudal de 25.00 l/s, se aprecia a priori en la Figura 157, donde las curvas de las energías específicas del flujo fueron calculados a partir de la medida de los tirantes (Tabla N°2 y Tabla N°3 del Anexo 3) en canales con pantallas deflectoras y en canales sin pantallas.

  La diferencia significativa, se determinó estadísticamente usando el Método de Wilcoxon, esto debido al comportamiento no paramétrico de la muestra cuyos detalles se aprecian en la Tabla 10 y Tabla 11. La prueba de hipótesis bilateral con el método de Wilcoxon (Tabla 12) fijo una P-Valor=0.00 (Z=-4.3475), el cual es menor al valor significativo de $\alpha = 0.05\ (Z = -1.96)$, por lo que la hipótesis nula fue rechaza y la hipótesis de estudio es aceptada.

- Los valores máximos y mínimos de la energía específica con una confiabilidad de 95.00% se presenta en la Tabla 14 y Figura 163, donde el máximo y mínimo valor de la energía específica en un canal sin pantallas deflectoras (S45_P00_0.20b) es de 0.820 m y 0.726 respectivamente.

  En el canal con pantallas deflectoras (S45_P45_0.20b) la energía específica máxima y mínima es de 0.180 para ambos casos, este último resultado consignado indica que la energía específica en los canales con pantallas deflectoras pueden ser constantes, y esto también se observa en los tirantes (Figura 164), velocidad (Figura 165) y

en el Número de Froude (Figura 166) del flujo en los canales de tipo S45_P45_0.20b.

Con los valores máximos y mínimos determinados en los canelas de tipo S45_P00_0.20b y S45_P45_0.20b se determinó la eficiencia máxima, mínima y media en la disipación de energía específica del flujo los cuales son $\Delta E_{max} = 78.05\%$, $\Delta E_{min} = 75.21\%$ y $\Delta E_{media} = 76.63\%$, respectivamente. La disipación de la energía específica en el canal con pantallas deflectoras demuestra que las pantallas deflectoras influyen en la velocidad y tirante del flujo de agua, y que estas se ven reflejadas en la energía específica del flujo, según la ecuación (33).

Mejía Fernández (2003), en su investigacion de denominado estructuras de vertimiento de aguas en laderas de media a fuerte pendiente, propuso que la velocidad de los flujos en canales con pantallas deflectoras es constante (para pendientes de 10%-50%), el cual concuerda con los resultados de la presente investigacion donde la velocidad del flujo es casi constante, oscilando entre 0.49 m/s y 0.55 m/s (amplitud de 0.06m/s), como se aprecia en la Figura 155.

- La distribución de las muestras de los tirantes (Figura 154), velocidades (Figura 155), Número de Froude (Figura 156) y la energía específica (Figura 157) a lo largo del canal con pantallas deflectoras presentan un comportamiento cíclico por lo que no pueden ser tratados como muestras aleatorias y por lo tanto no presentan una distribución estadística paramétrica, por ello es preciso señalar que el análisis estadístico usado para la presente investigación es del tipo no paramétrico, denominado el método Wilcoxon.

- Las ondas estacionaria que se presentan en el canal con pantallas deflectoras pueden llegar a tener una amplitud de 1.85cm (tirante en agua clara), según la Figura 164 y una longitud de onda estimada de 1.40 a 1.60 m como se ve en la Figura 154. Este tipo de comportamiento también lo observó Pachas Norabuena (2015) en su investigación. En cuanto el flujo en el canal sin pantallas deflectoras, aparecen pertubaciones a partir de la progresiva 05+3.00 m, sin que se pueda presenciar la aparición de ondas, este comportamiento se puede apreciar en la Figura 151.
- La aireación en el canal con pantallas deflectoras se presenta a lo largo del canal, este fenómeno también fue observado por la investigación realizada por Pachas Norabuena (2015) y los estudios experimentales de Straub (1960), sin embargo a diferencia de las observaciones de Pachas Norabuena, en cuanto a los canales sin pantallas deflectoras, se observo notoriamente la airacion por las presencia de burbujas de aire a partir de la progresiva 05+3.00m, en donde se alcanza la velocidad máxima del flujo, como se puede tambien la Figura 152.

CONCLUSIONES.

- El uso de pantallas deflectoras tiene una buena eficiencia como disipador de energía en un canal de 100% de pendiente, pudiendo alcanzar en promedio un valor de 76.63%, en comparación a un canal sin pantallas deflectoras. Esta eficiencia y diferencia de la energía específica en los canales estudiados, confirma que la hipótesis alterna es correcta y ha sido contrastada.
- Es necesario que el borde libre del canal con pantallas deflectoras tenga una altura mayor a lo planteado en la presente investigación, o en rediseñar las dimensiones en forma y disposiciones de las pantallas deflectoras a fin de evitar la pérdida de agua por salpicaduras originados por el choque de las corrientes de agua con las pantallas deflectoras.
- El uso de pantallas deflectoras en un canal de 100% de pendiente, puede incrementar el tirante medio del flujo de 3.375cm a 22.875cm en comparación con un canal de 100% de pendiente, sin pantallas deflectoras, siendo esto beneficioso para disminuir la velocidad media de 3.765 m/s a 0.52 m/s y en consecuencia poder garantizar una mayor vida útil del revestimiento o superficie de contacto de la estructura hidráulica con el flujo.
- Experimentalmente se comprobó que existe una alta concentración de aire en el flujo turbulento experimentado al largo del canal con pantallas deflectoras.

RECOMENDACIONES.

- Se recomienda ampliar la investigación con nuevas configuraciones, disposiciones y formas de las pantallas deflectoras en una pendiente de canal de 45°, a fin de poder conseguir la menor cantidad de pérdida de agua por salpicadura.
- Se recomienda usar modelamientos hidráulicos numéricos con softwares que simulen el flujo en tres dimensiones, a fin de observar su comportamiento interno y comparar la generación de ondas, tirantes, velocidades, etc.
- Se recomienda realizar un estudio de costo-eficiencia técnica del uso de pantallas deflectoras como disipadores de energía específica comparado con otro tipo de estructuras hidráulicas que comúnmente se usan para disipar la energía específica como son las pozas disipadoras, canal con tapas, etc.
- Se recomienda ampliara la investigación con canales con pantallas deflectoras que presenten pantallas deflectoras dispuestas en ángulos de 15°,30°,45°,60° y 75° con respecto al eje longitudinal para cada canal a fin poder correlacionar estos ángulos de deflexión con la concentración de aire en el flujo.
- Se recomienda realizar investigaciones como del problable uso de pantallas deflectoras en aplicaciones al tratamiento de aguas residuales referidos al DBO (Demanda biológica de oxígeno), debido a que el uso de pantallas deflectoras generan una considerable concentración de aire en el flujo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alvarado Córdova, F., "cinemática de los fluidos" (s.f.) URL:http://slideplayer.es/slide/7620463/release/woothee# [consulta 02 de mayo de 2018].

2. Canizales Casillas, R.,"Apuntes sobre teoría de modelos de obras hidráulicas a superficie libre", Revista CONRICYT de la Universidad de Sonora, 1988. URL:http://www.bidi.uson.mx/TesisIndice.aspx?tesis=2565 [consulta 28 de abril de 2018].

3. Chereque Moran, W.,"Mecanica de Fluidos 2", Pontificia Universidad Católica del Perú,Perú (s.f)

4. Depaz Blácido, R.,"Análsis de Estructuras Hidráulicas Bajo Régime Supercrítico para el Diseño Asistido de Rápidas", Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo, Huaraz-Perú 2008.

5. Escuela de Ingeniería de Antioquia,"Mecánica de fluidos", 2009. URL:http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/confinado/capa limite.htm [consulta 09 de mayo de 2018].

6. Espinosa García, J., & Mera Tobar, J., "Análisis Experimental de Disipación de Energía, Distribución de Presiones y Resistencia al Flujo de Una Rapida con Fondo Escalonado con Relación Altura (h)-Longitud de Garda (l) DE h/l=0.10", Tesis, Quito, 2007. URL:http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/520 [consulta 08 de mayo de 2018].

7. Gsagua, "Hidráulica Inca", 2017 URL:https://hidraulicainca.com/cajamarca/canal-cumbemayo/ [consulta 07 de mayo de 2018].

8. Ingenieria Civil , T., "Curso de Diseño de Canales Con Régimen Uniforme", 2012 URL:http://ingenieriacivil.tutorialesaldia.com/mini-curso-de-diseno-de-canales-con-regimen-uniforme-parte-iv-calculo-de-la-altura-normal/ [consulta 07 de mayo de 2018].

9. Jiménez Medina, O., "Fórmulas Generales Para los Coeficientes de Chézy y de Manning", Revista Scielo,2015. URL:http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v6n3/v6n3a3.pdf [consulta 010 de mayo de 2018].

10. Leon Cashpa, "Río Santa", 2014 URL:http://mapio.net/pic/p-47645883/ [consulta 07 de mayo de 2018].

11. Machuca, E., "Clasificación del Flujo en Canales", 2014. URL:https://www.youtube.com/watch?v=xnMe08rF1cQ [consulta 05 de mayo de 2018].

12. Mejía Fernández, F.,"Canal de Pantallas Deflectoras (CPD) y Canal de Rápidas con Tapa y Columpio (CRTC)", Universidad Nacional de Colombia, Manizales-Colombia,2003.

13. Naudascher, E., "*Hidráulica de Canales*". Editorial Limusa, México 2002.

14. Navidi, W., "Estadística para ingenieros y científicos", Editorial McGrae Hill, México 2006.

15. Pachas Norabuena, J., "Influencia del Ángulo de Inclinación de Pantallas, en una Rápida Tipo Canal

con Pantallas Deflectoras con Pendientes entre 10% y 20%", Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo, Huaraz-Perú 2015.

16. Rocha Felices, A., "Hidráulica de Tuberías y Canales". Lima-Perú 2007.

17. Salas La Cruz, J., "Resistencia al Flujo en Canales con Elementos Rugosos Grandes", *Boletín Técnico N°4-008*, 23., Universidad Nacional de Ingeniería. URL:https://es.slideshare.net/malpasonino/resistencia-al-flujo-en-canales-con-elementos-rugosos-grandes [consulta 16 de mayo de 2018].

18. U.S Bureau of Reclamations, "Desing of Small Dams", (s.f.). URL:https://www.usbr.gov/ [consulta 31 de mayo de 2018].

19. Ven Te Chow. (1998). *Hidráulica de Canales Abiertos.* (J. Saldarriaga, Trad.) Colombia: McGRAW-HILL.

ANEXOS

Anexo 1: Planos del modelo hidráulico.

Lámina CSPD, Canal de Concreto de 100% de Pendiente Sin Pantallas Deflectoras.

Lámina CPD30, Canal de Concreto de 100% de Pendiente con Pantallas Deflectoras de 30° con Respecto al Respecto al Eje Longitudinal.

Lámina CPD45, Canal de Concreto de 100% de Pendiente con Pantallas Deflectoras de 45° con Respecto al Respecto al Eje Longitudinal.

Lámina CPD60, Canal de Concreto de 100% de Pendiente con Pantallas Deflectoras de 60° con Respecto al Respecto al Eje Longitudinal.

Lámina CPD75, Canal de Concreto de 100% de Pendiente con Pantallas Deflectoras de 75° Con Respecto al Respecto al Eje Longitudinal.

Lámina CPD, Canal de Concreto de 100% de Pendiente con Pantallas Deflectoras.

Lámina CCPD45,

Lámina CCPD,

Anexo 2: Gráficos del modelo numérico.

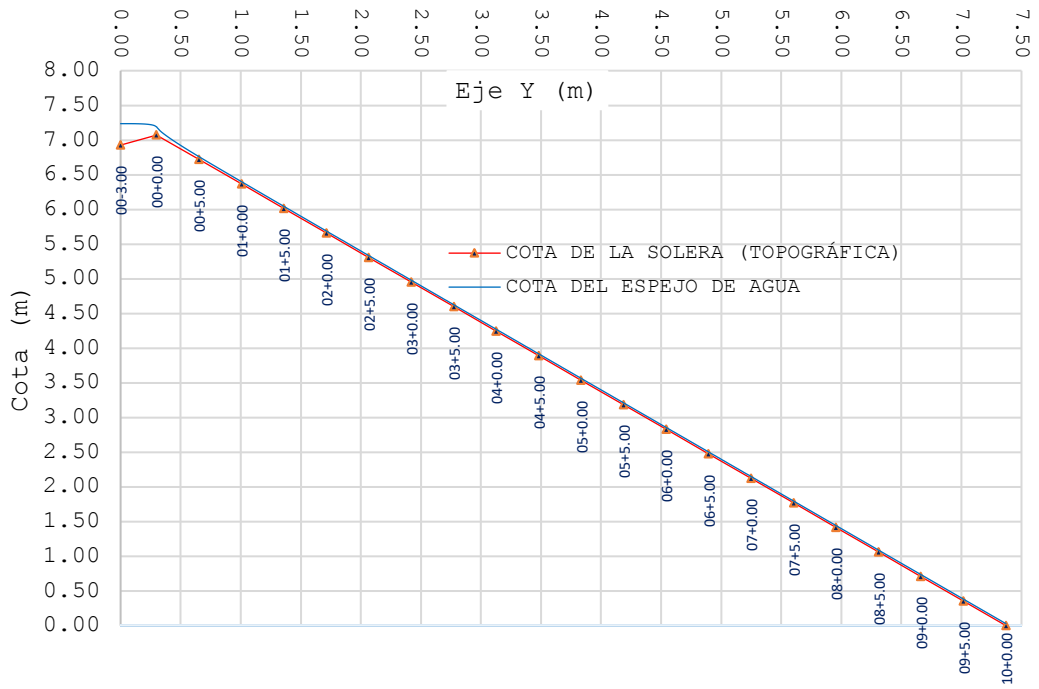


Gráfico 1. Perfil de la cota del espejo de agua y cota de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a lo largo del canal S45_P00_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

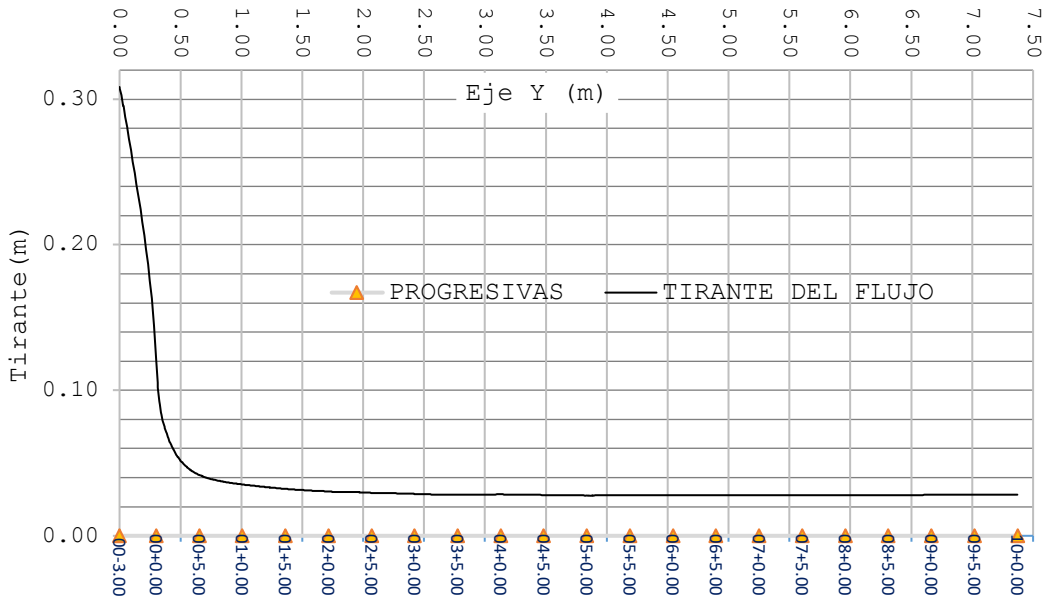


Gráfico 2. Perfil del tirante del flujo en la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P00_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (Figura 53).

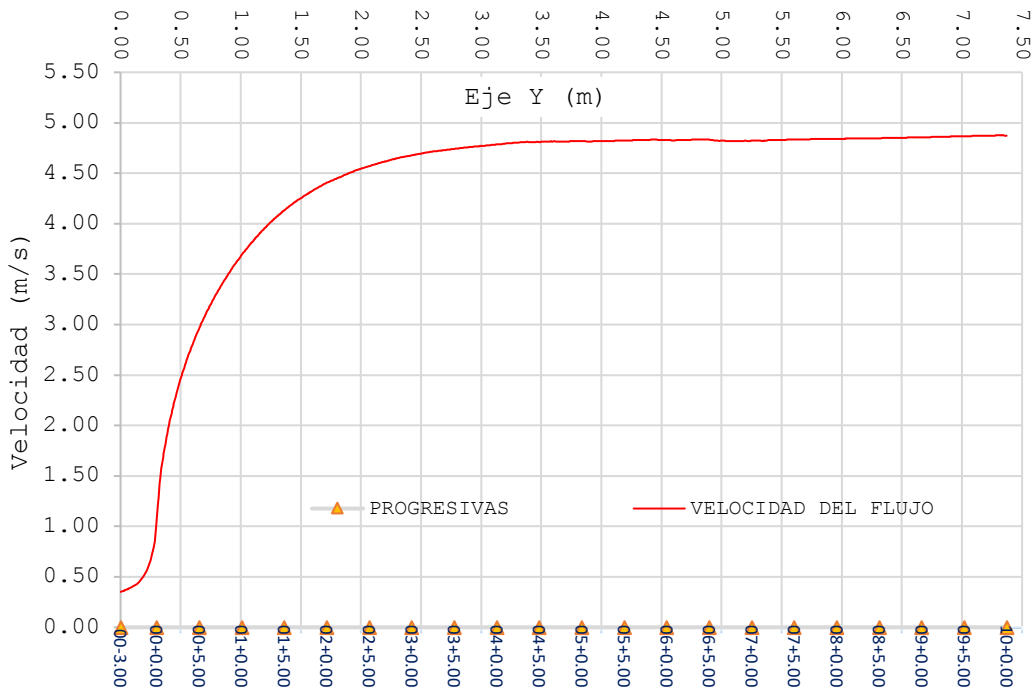


Gráfico 3. Perfil de la velocidad del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P00_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

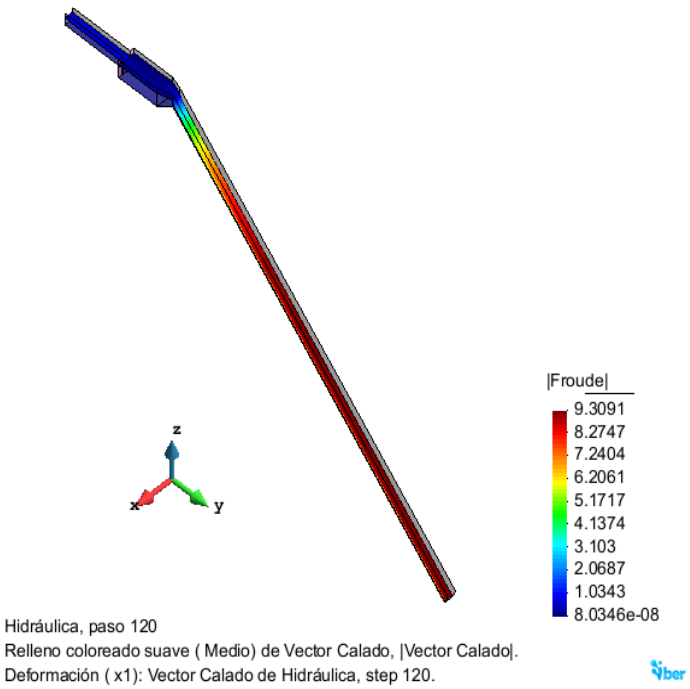


Gráfico 4. Rango del Número de Froude del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal S45_P00_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m.

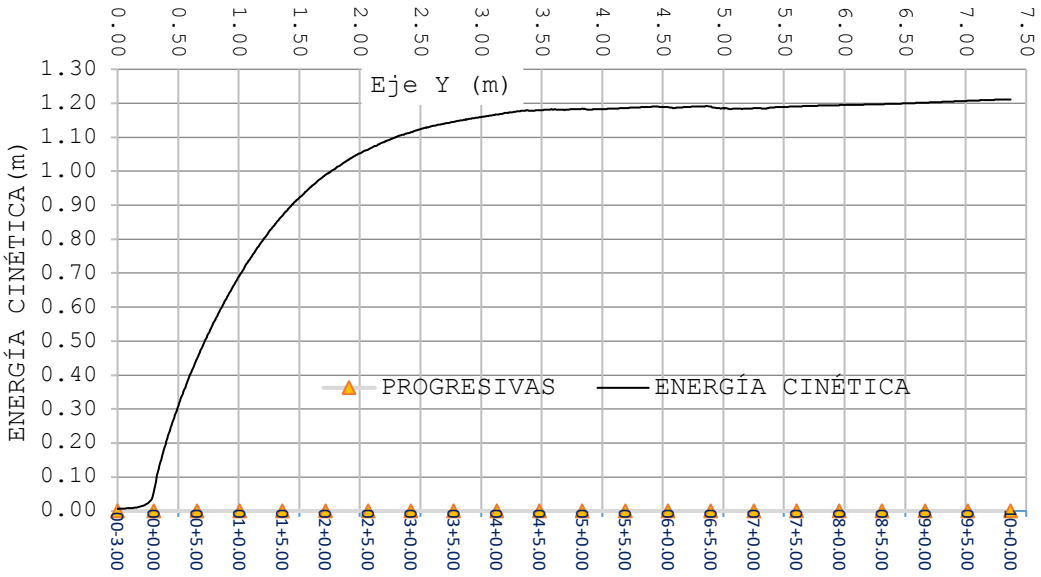


Gráfico 5. Perfil de la energía cinética del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P00_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53). La energía cinética se calculado a partir de la Ecuación: $\alpha \frac{V^2}{2g}$, donde $\alpha = 1$.

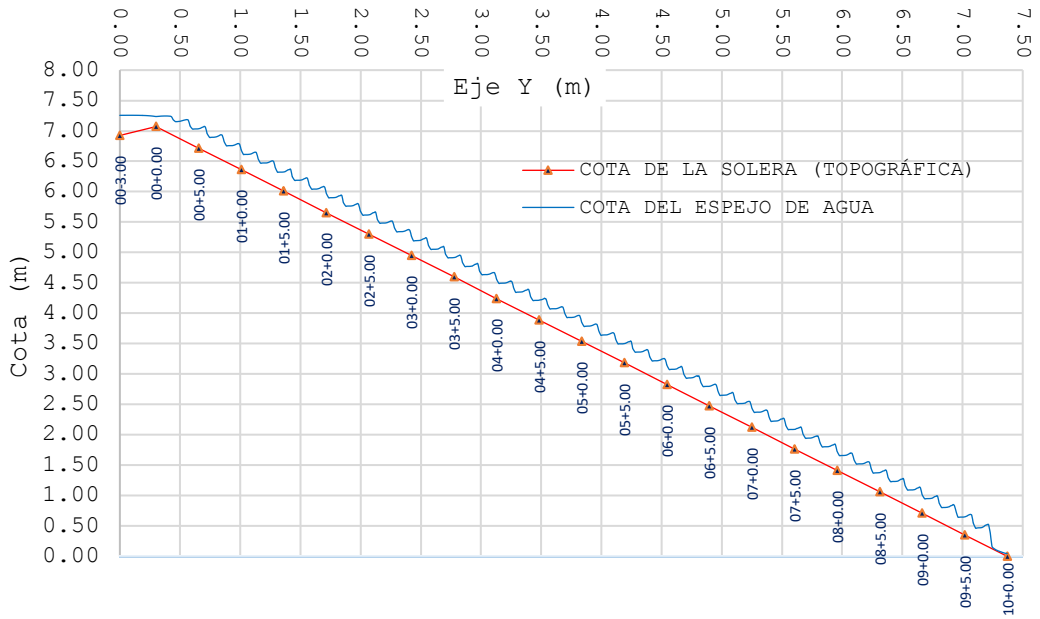


Gráfico 6. Perfil de la cota del espejo de agua y cota de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a lo largo del canal S45_P30_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

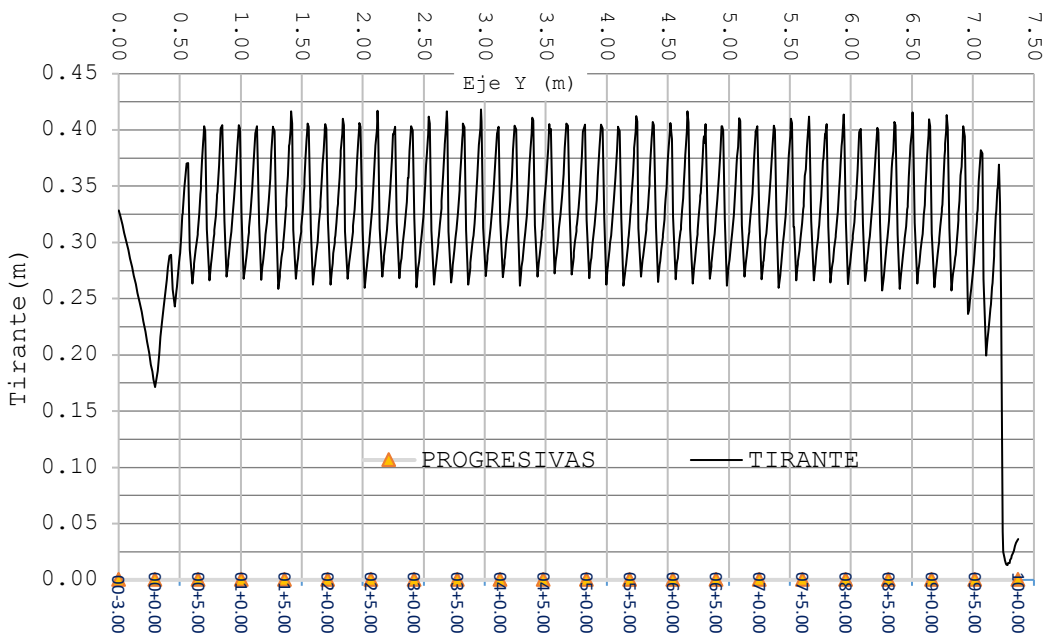


Gráfico 7. Perfil del tirante del flujo en la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P30_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (Figura 53).

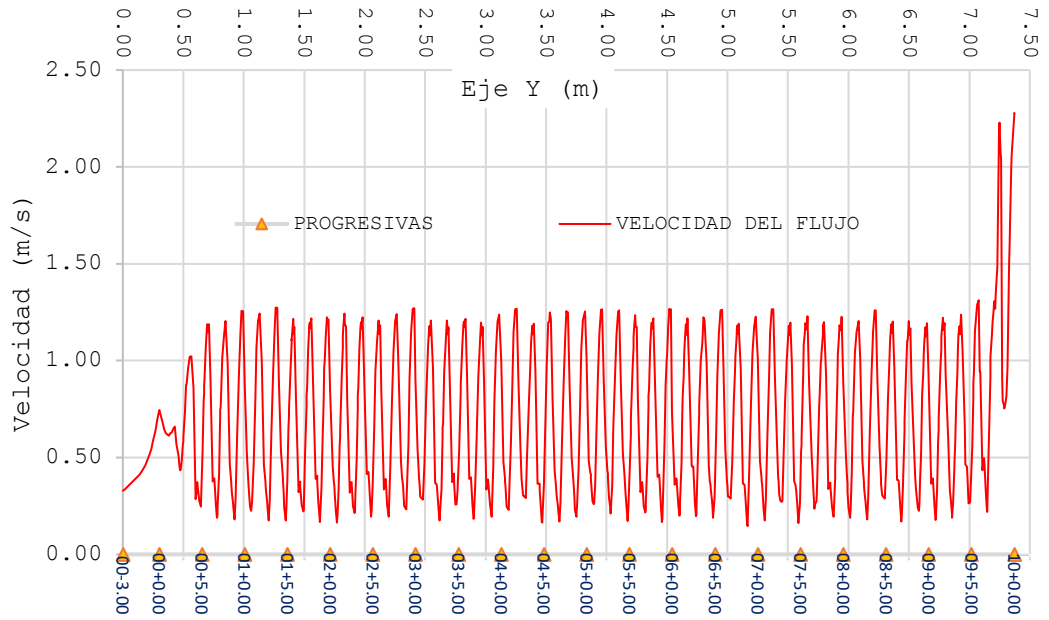


Gráfico 8. Perfil de la velocidad del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P30_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (Figura 53).

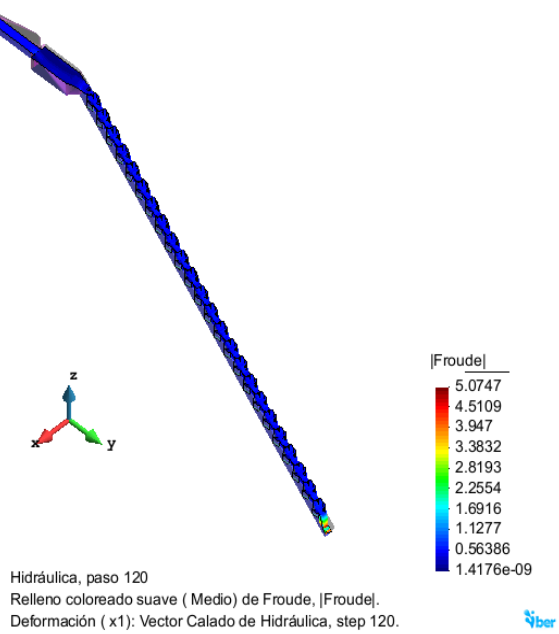


Gráfico 9. Rango del Número de Froude del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal S45_P30_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m.

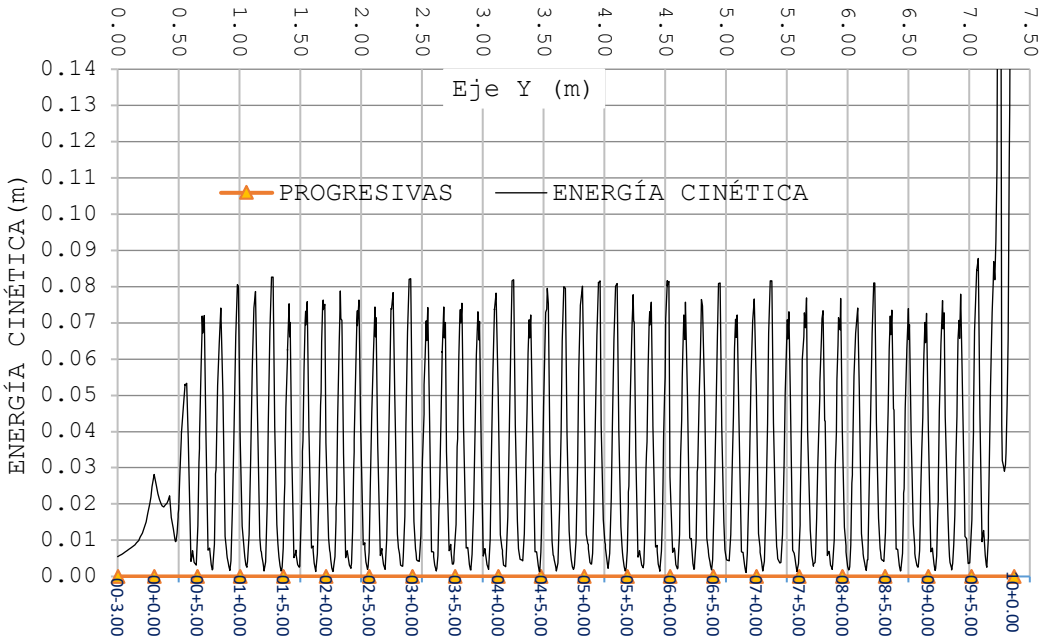


Gráfico 10. *Perfil de la energía cinética del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P30_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53). La energía cinética se calculado a partir de la Ecuación:* $\alpha \frac{V^2}{2g}$, *donde* $\alpha = 1$.

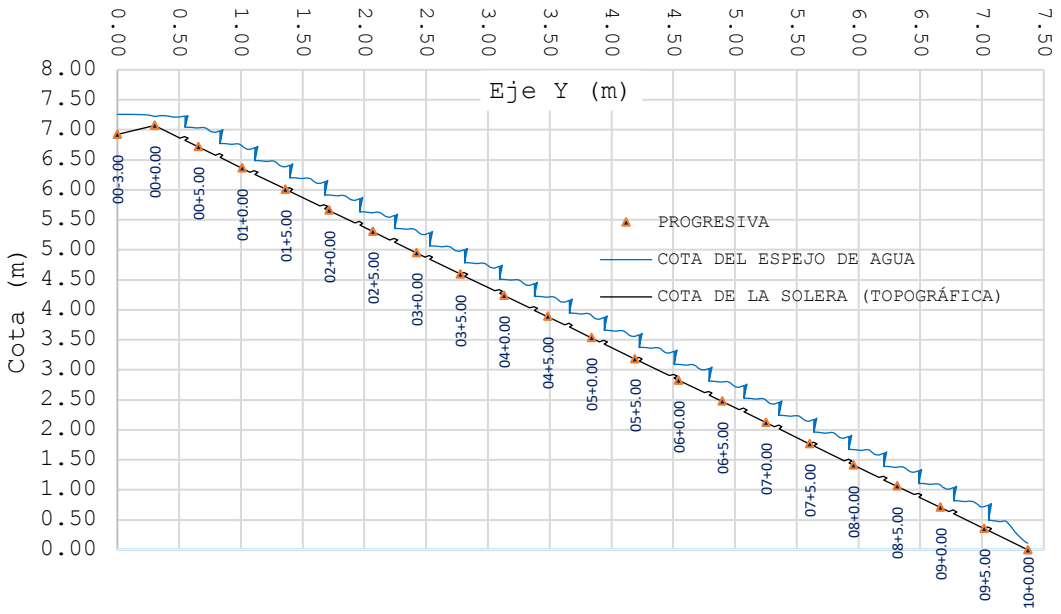


Gráfico 11. Perfil de la cota del espejo de agua y cota de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a lo largo del canal S45_P30_0.20b y sección longitudinal 0+0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

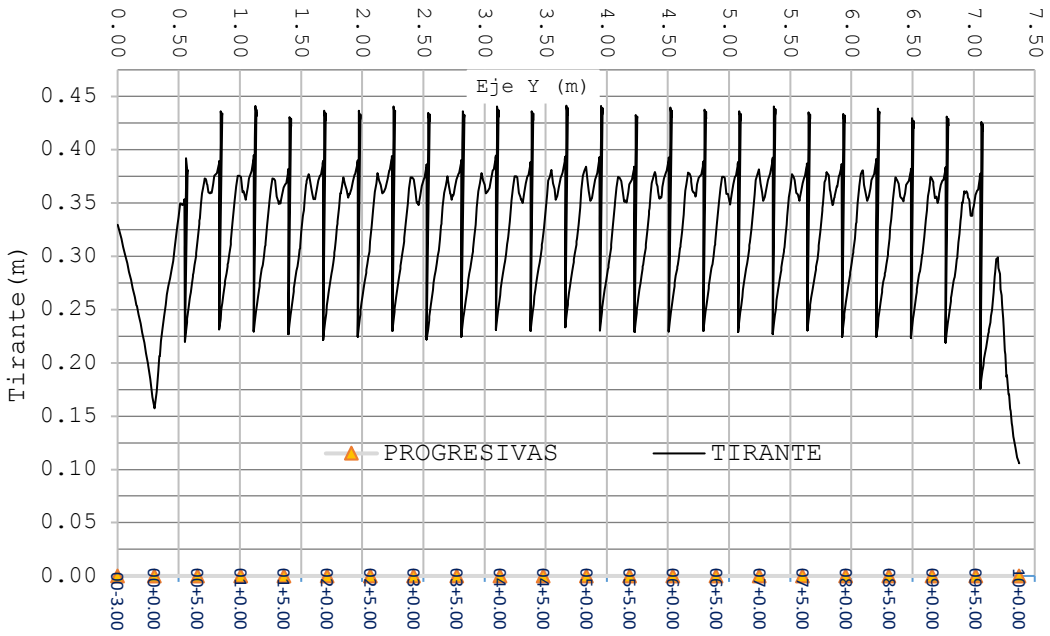


Gráfico 12. Perfil del tirante del flujo en la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P30_0.20b y sección longitudinal 0+0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

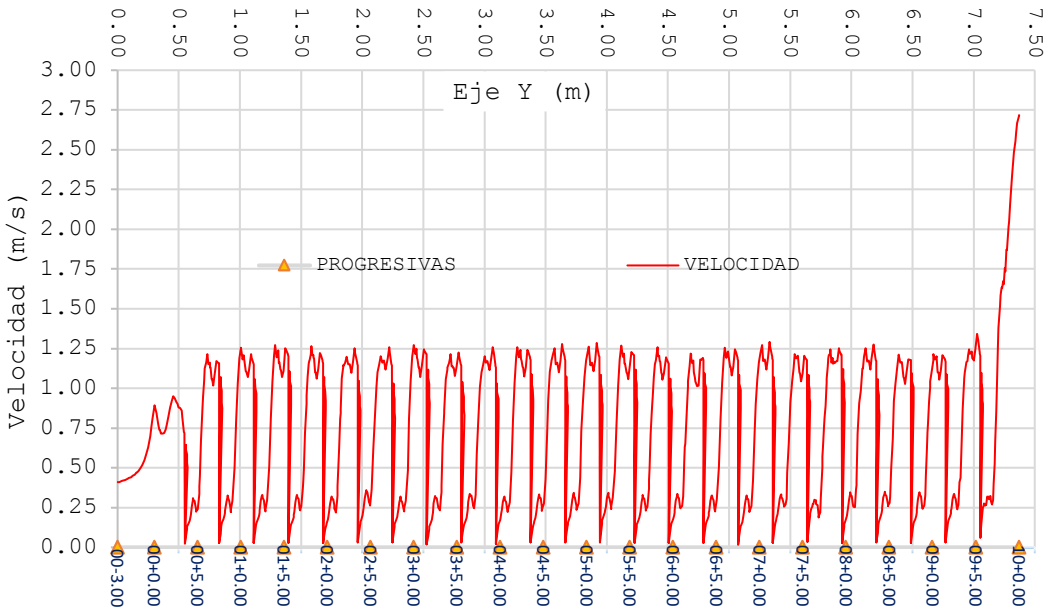


Gráfico 13. Perfil de la velocidad del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P30_0.20b y sección longitudinal 0+0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (Figura 53).

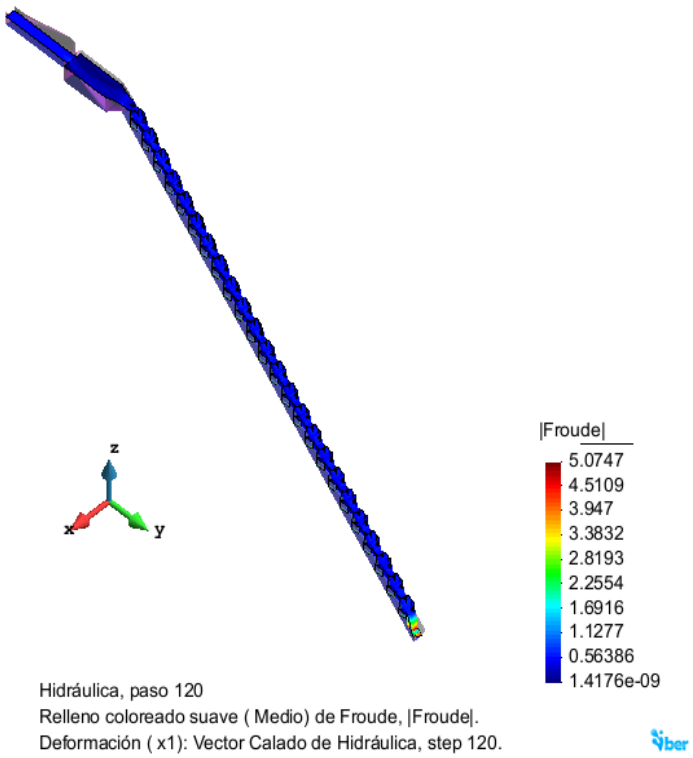


Gráfico 14. Rango del Número de Froude del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal S45_P30_0.20b y sección longitudinal 0+0.060m.

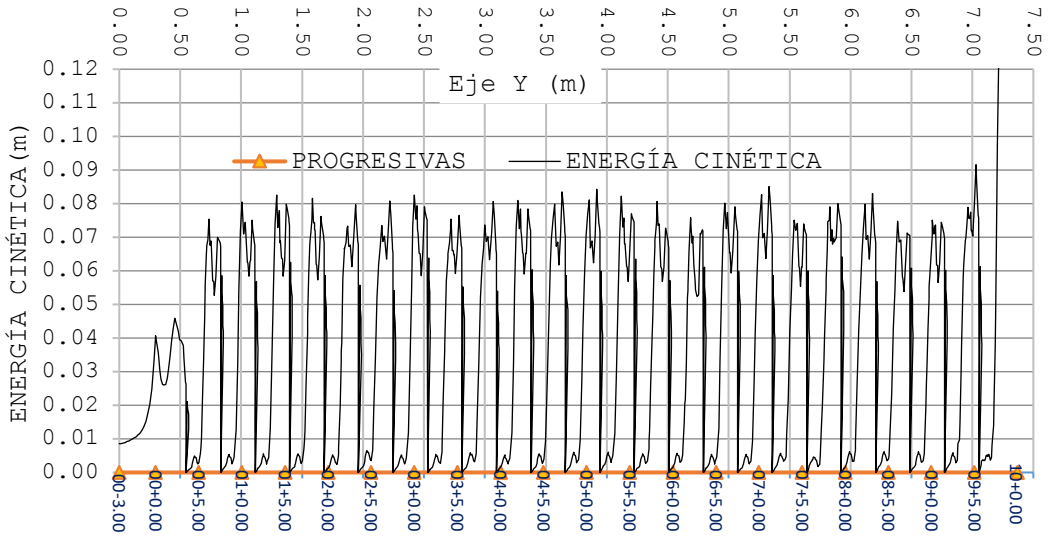


Gráfico 15. Perfil de la energía cinética del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal S45_P30_0.20b y sección longitudinal 0+0.060m(ver Figura 53). La energía cinética se calculado a partir de la Ecuación: $\alpha \frac{V^2}{2g}$, donde $\alpha = 1$

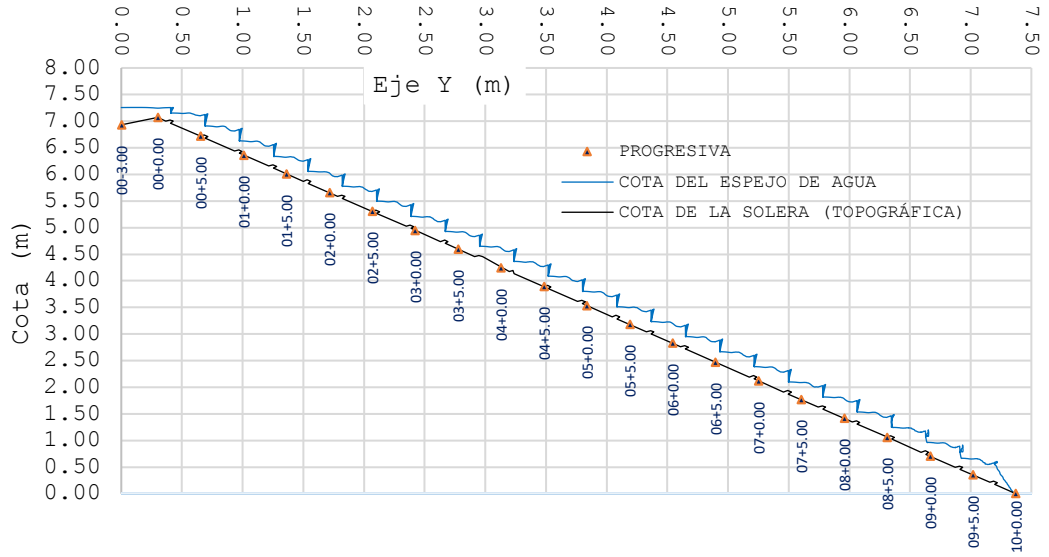


Gráfico 16. Perfil de la cota del espejo de agua y cota de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a lo largo del canal S45_P30_0.20b y sección longitudinal 0-0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (Figura 53).

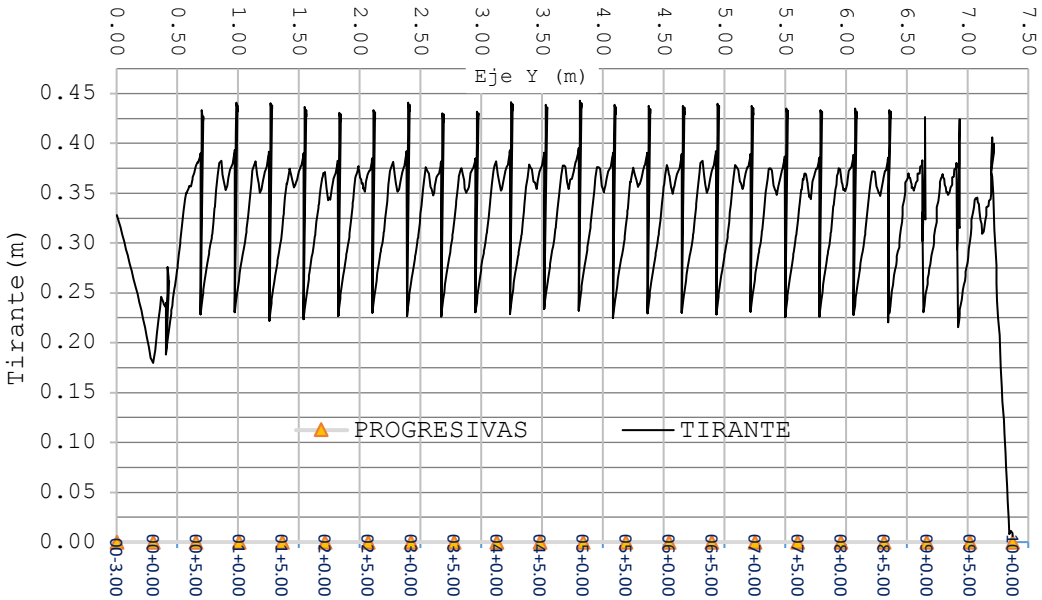


Gráfico 17. Perfil del tirante del flujo en la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P30_0.20b y sección longitudinal 0-0.060, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (Figura 53).

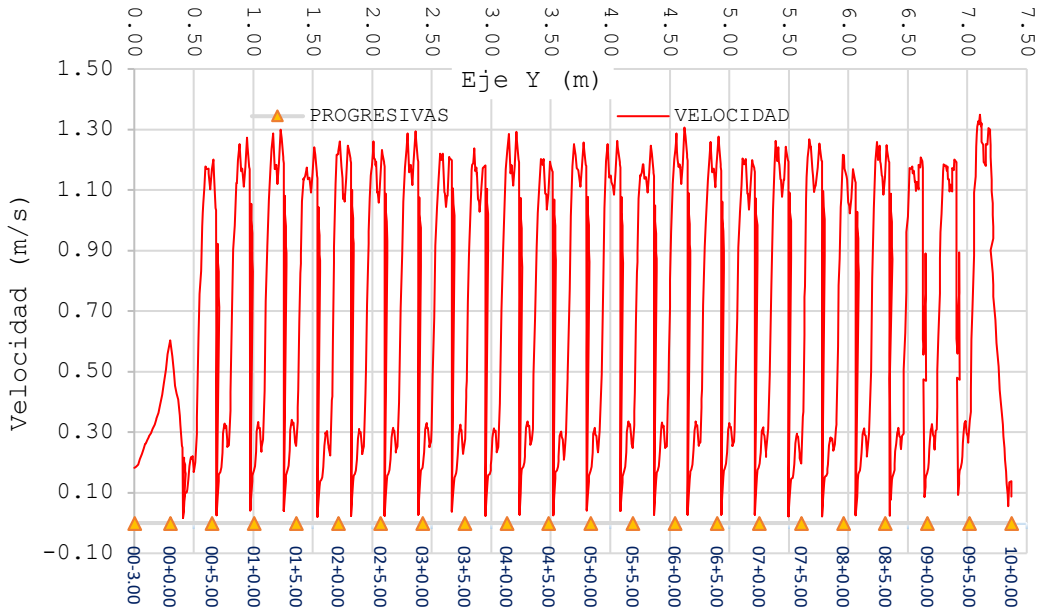


Gráfico 18. Perfil de la velocidad del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P30_0.20b y sección longitudinal 0-0.060, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (Figura 53).

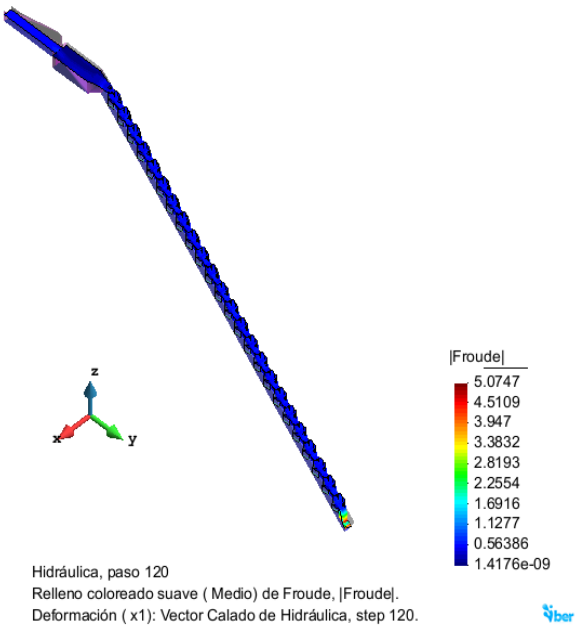


Gráfico 19. Rango del Número de Froude del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal S45_P30_0.20b y sección longitudinal 0-0.060m.

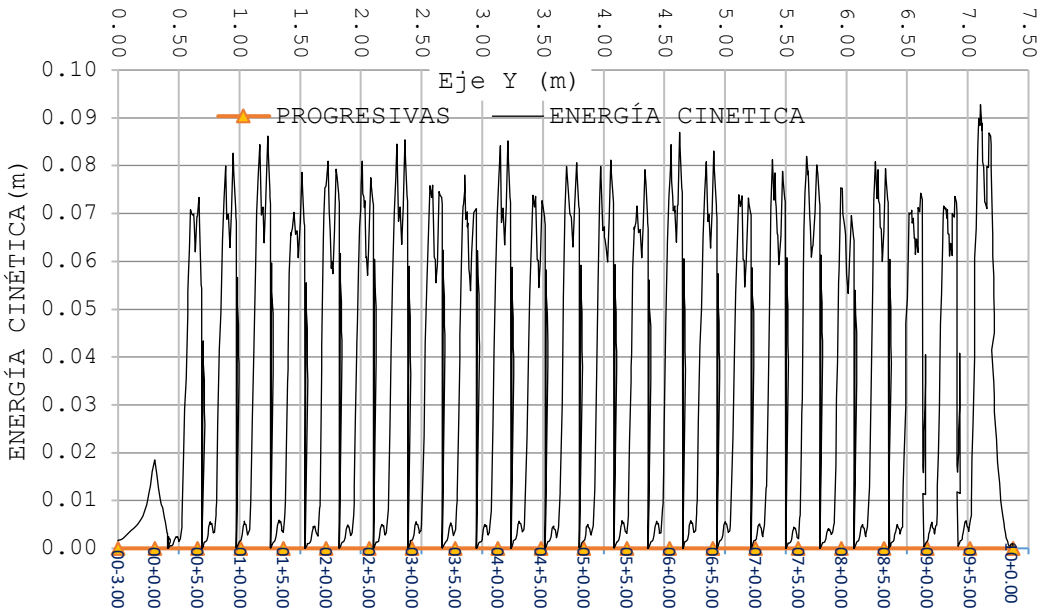


Gráfico 20. *Perfil de la energía cinética del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P30_0.20b* y sección longitudinal 0-0.060m, *desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53). La energía cinética se calculado a partir de la Ecuación:* $\alpha \frac{V^2}{2g}$, *donde* $\alpha = 1$

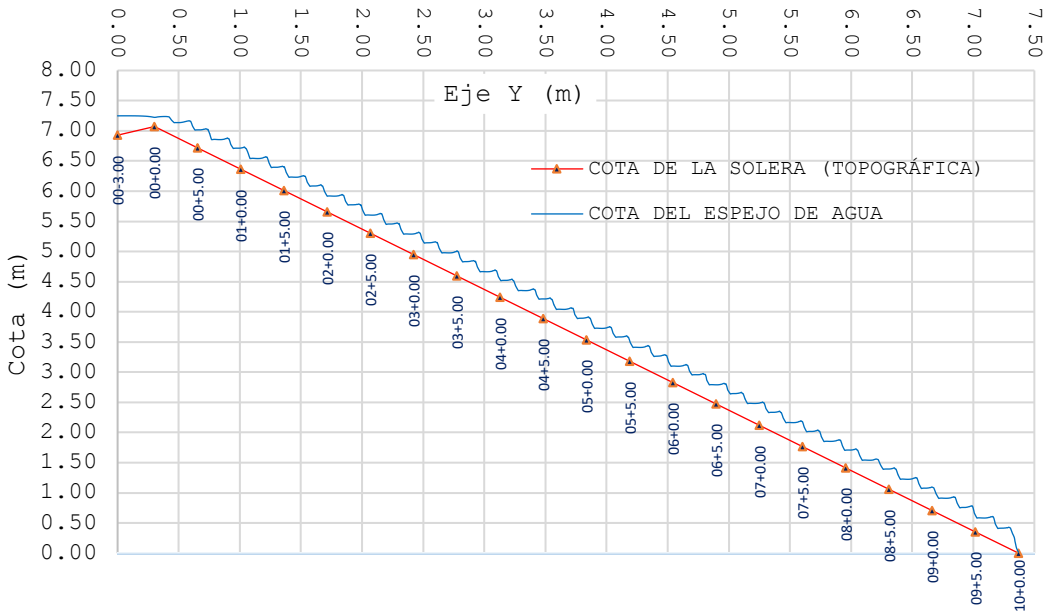


Gráfico 21. Perfil de la cota del espejo de agua y cota de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a lo largo del canal S45_P45_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

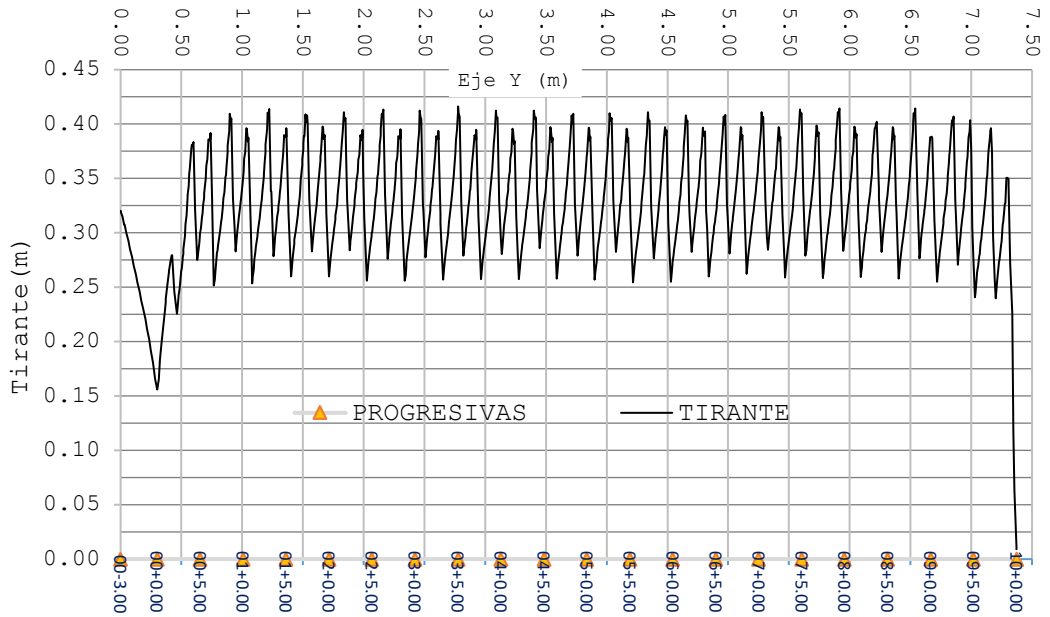


Gráfico 22. Perfil del tirante del flujo en la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P45_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

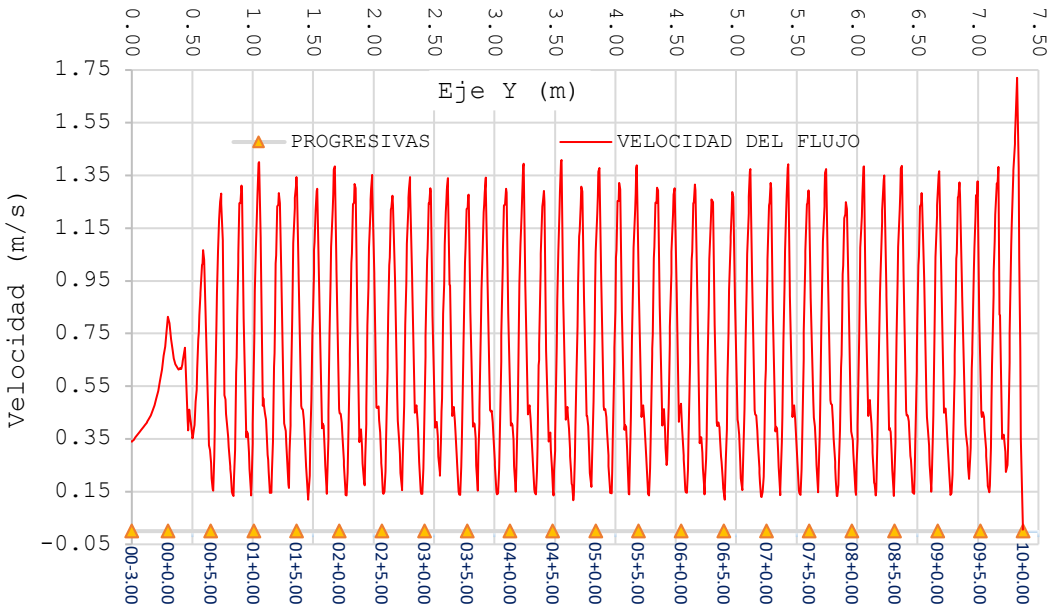


Gráfico 23. Perfil de la velocidad del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P45_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (Figura 53).

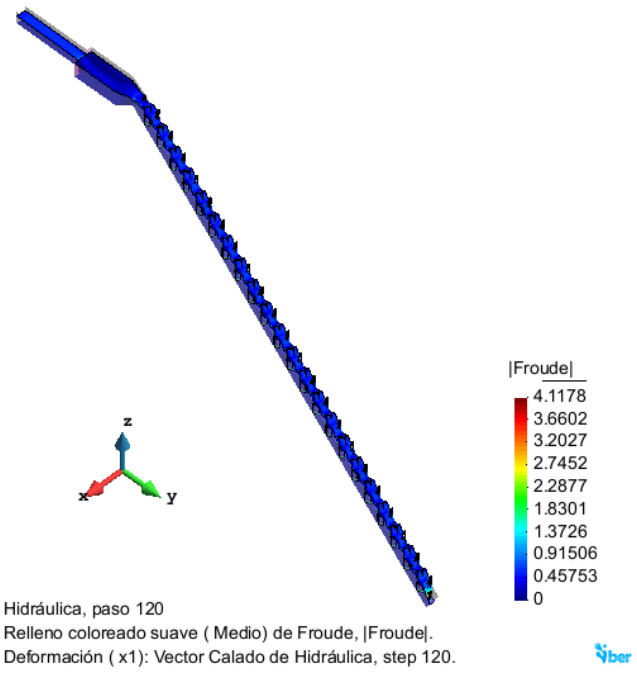


Gráfico 24. Rango del Número de Froude del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal S45_P45_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m.

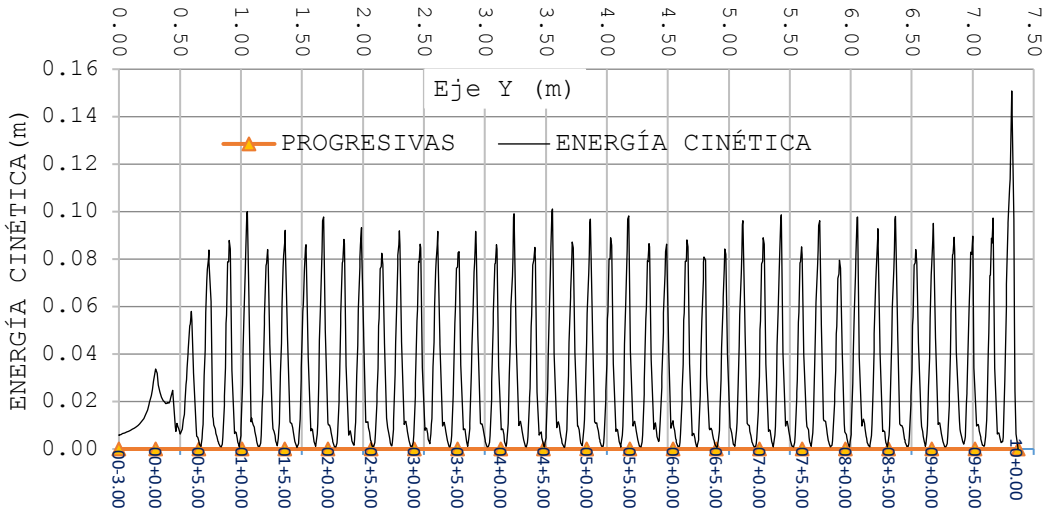


Gráfico 25. Perfil de la energía cinética del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P45_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53). La energía cinética se calculado a partir de la Ecuación: $\alpha \frac{V^2}{2g}$, donde $\alpha = 1$

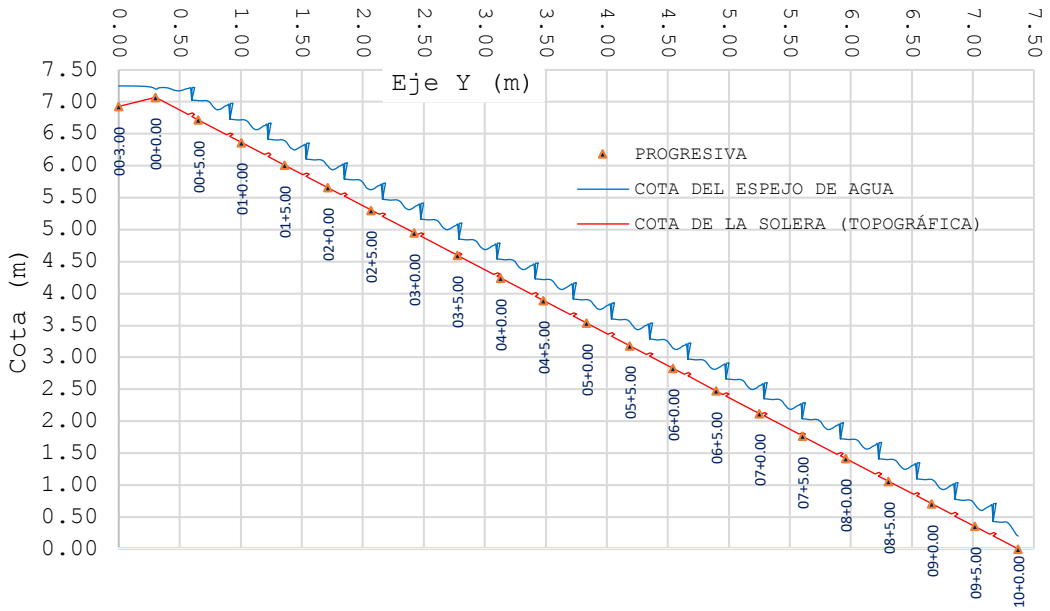


Gráfico 26. Perfil de la cota del espejo de agua y cota de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a lo largo del canal S45_P45_0.20b y sección longitudinal 0+0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

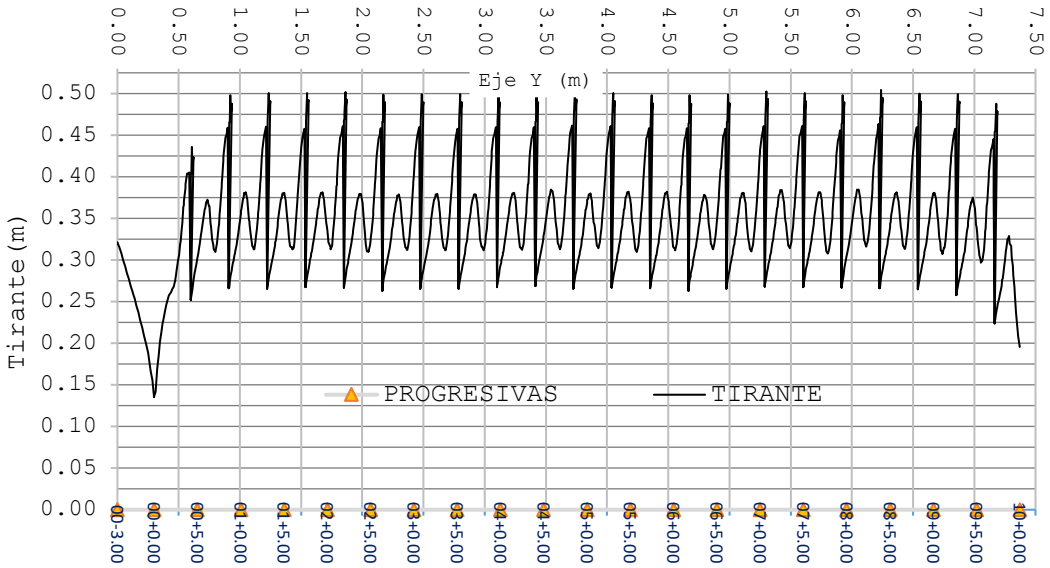


Gráfico 27. Perfil del tirante del flujo en la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P45_0.20b y sección longitudinal 0+0.060m, desde 0-3.00m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (Figura 53).

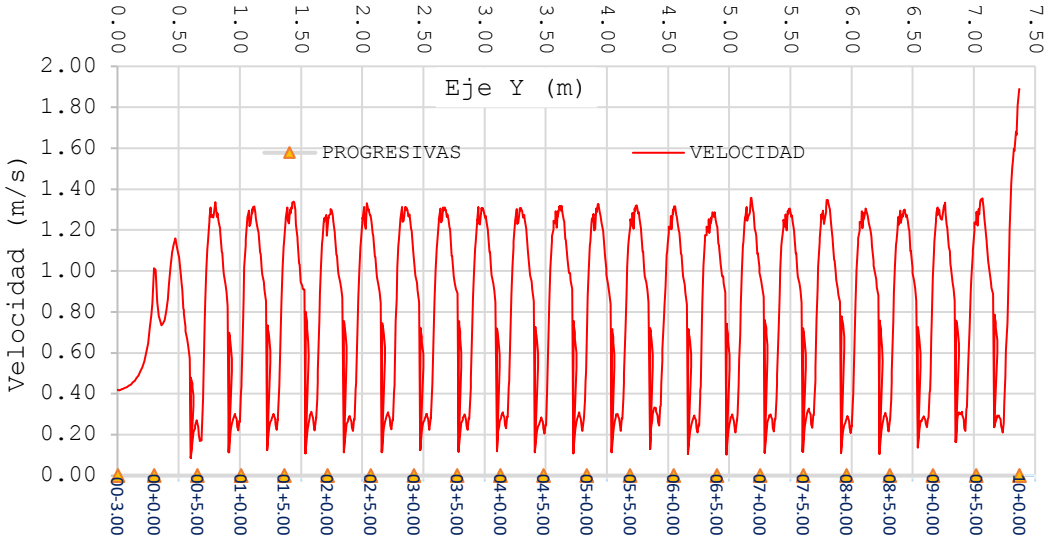


Gráfico 28. Perfil de la velocidad del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P45_0.20b y sección longitudinal 0+0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (Figura 53).

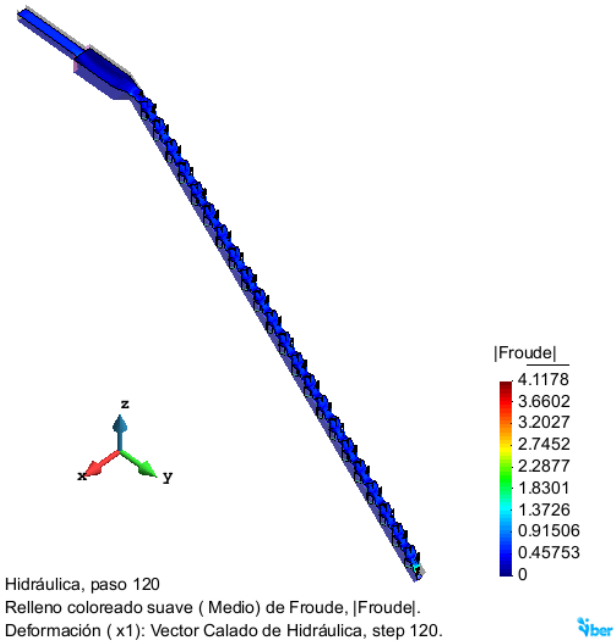


Gráfico 29. Rango del Número de Froude del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal S45_P45_0.20b y sección longitudinal 0+0.060m.

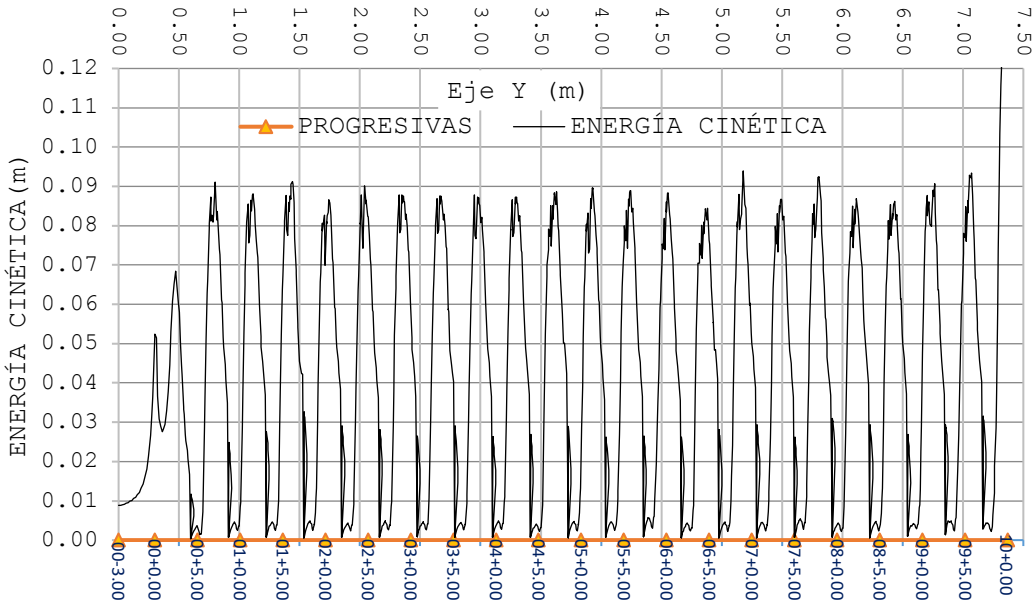


Gráfico 30. Perfil de la energía cinética del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P45_0.20b y sección longitudinal 0+0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53). La energía cinética se calculado a partir de la Ecuación: $\alpha\frac{V^2}{2g}$, donde $\alpha = 1$

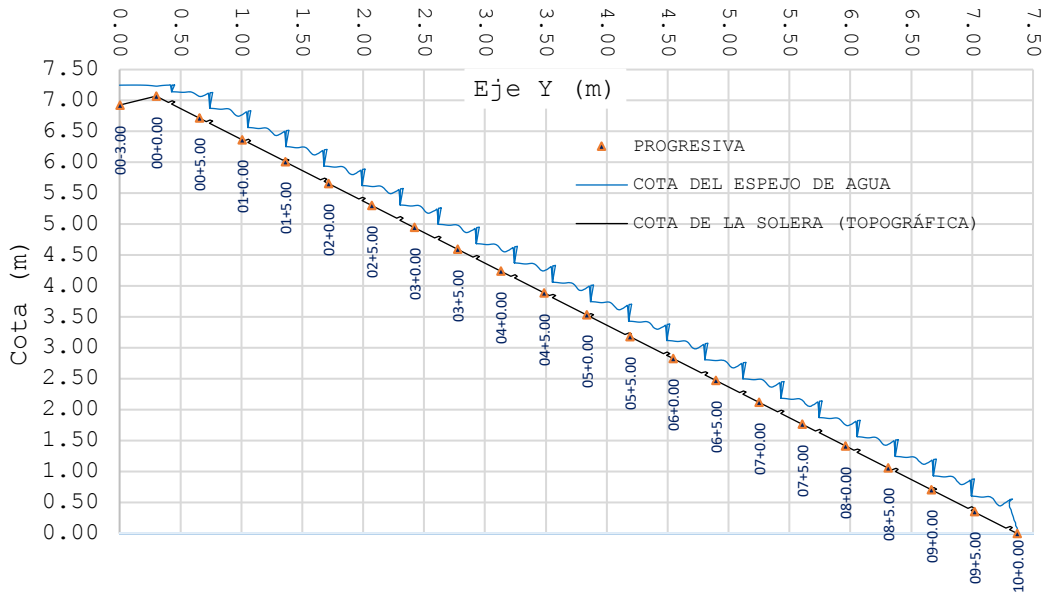


Gráfico 31. Perfil de la cota del espejo de agua y cota de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a lo largo del canal S45_P45_0.20b y sección longitudinal 0-0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

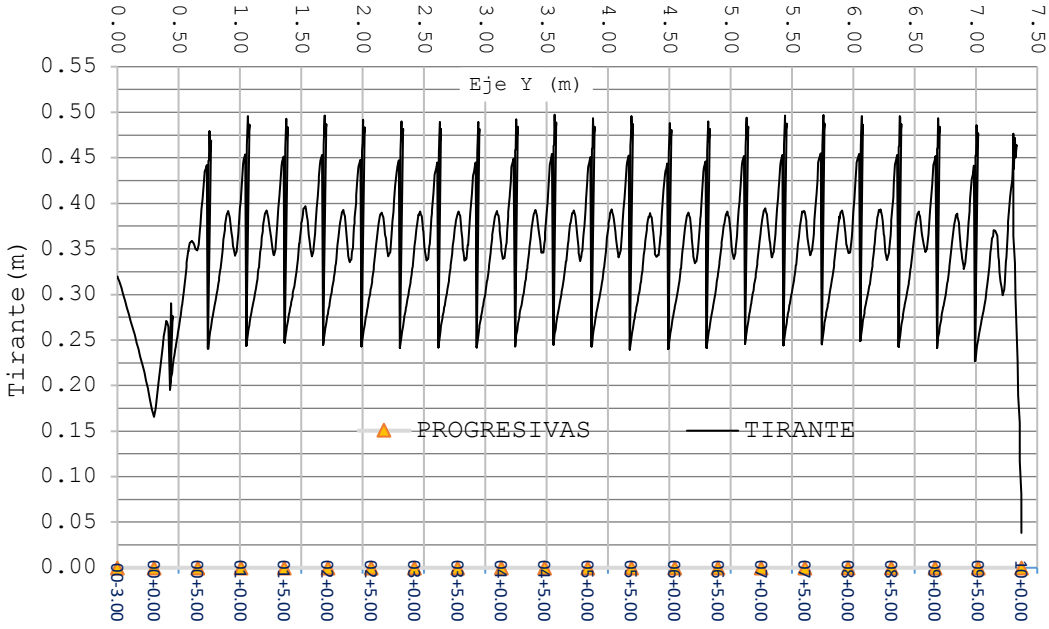


Gráfico 32. Perfil del tirante del flujo en la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P45_0.20b y sección longitudinal 0-0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

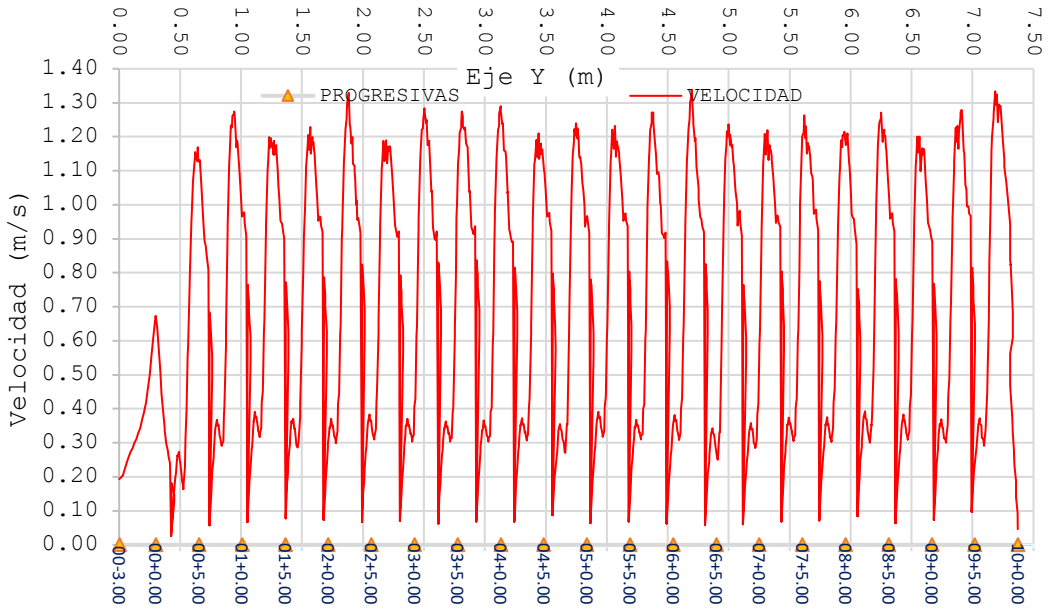


Gráfico 33. Perfil de la velocidad del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P45_0.20b y sección longitudinal 0-0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (Figura 53).

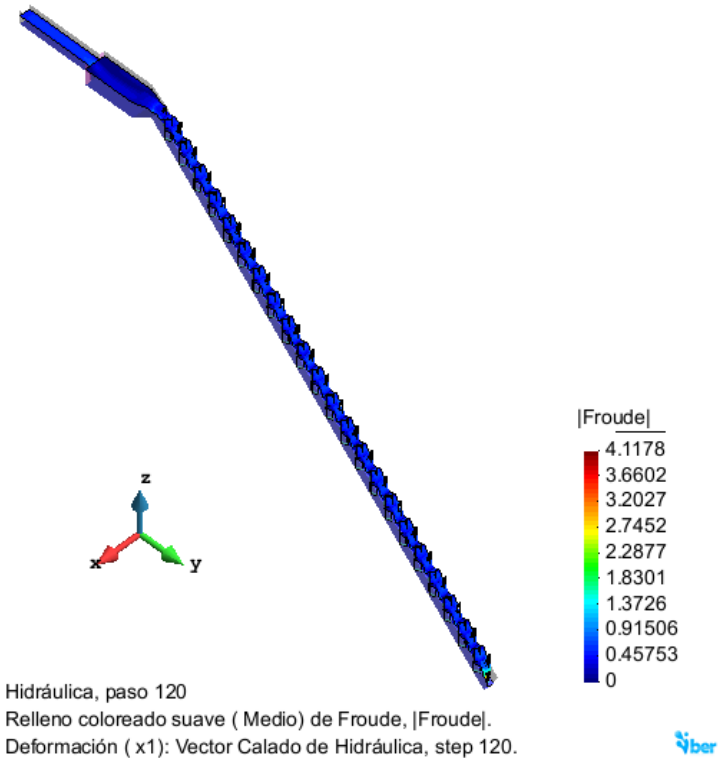


Gráfico 34. Rango del Número de Froude del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal S45_P45_0.20b y sección longitudinal 0-0.060m.

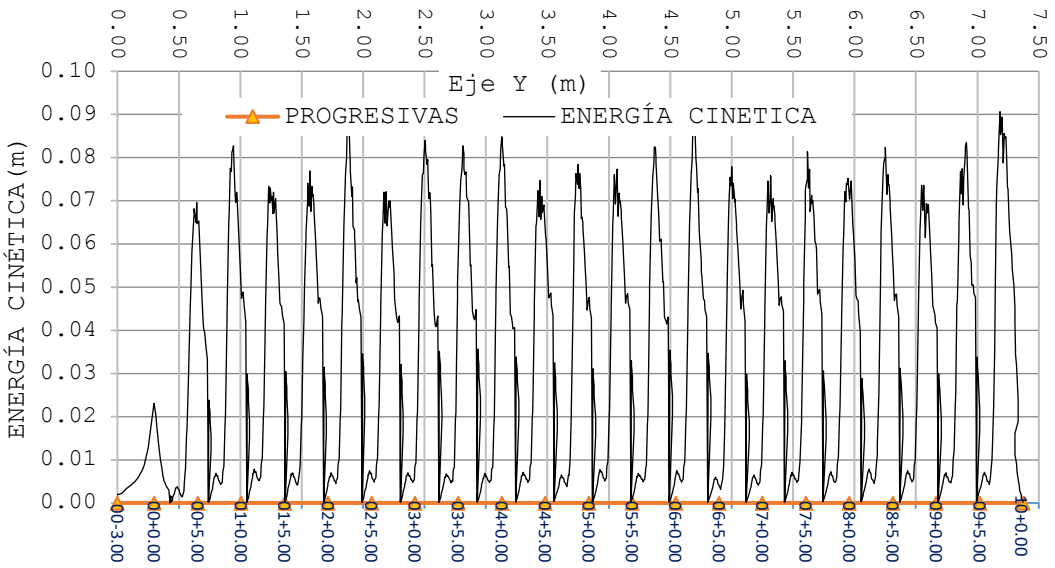


Gráfico 35. Perfil de la energía cinética del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P45_0.20b y sección longitudinal 0-0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53). La energía cinética se calculado a partir de la Ecuación: $\alpha \frac{V^2}{2g}$, donde $\alpha = 1$.

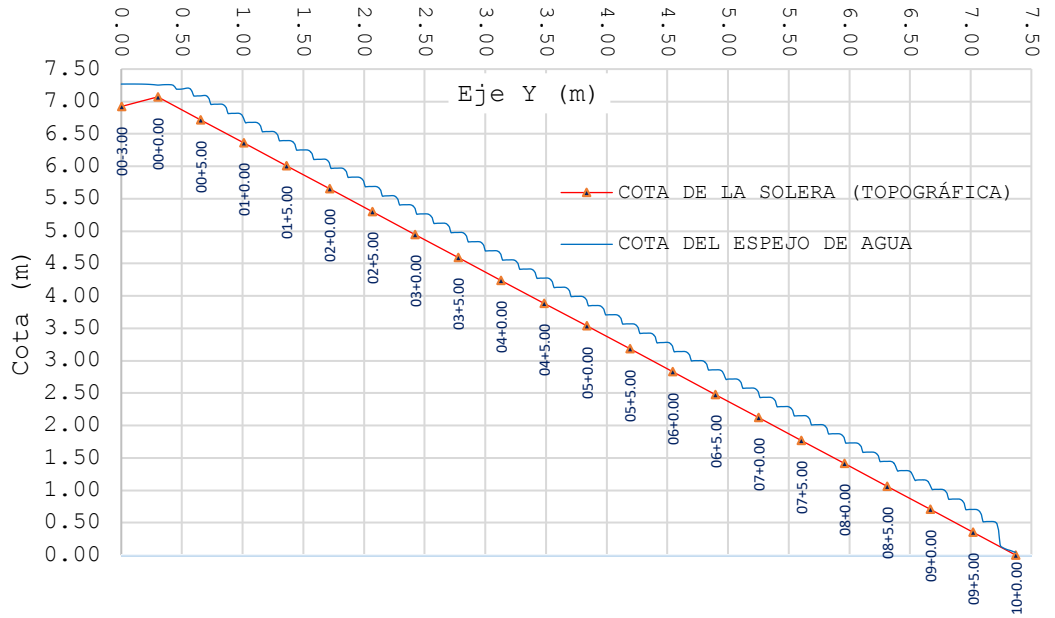


Gráfico 36. Perfil de la cota del espejo de agua y cota de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a lo largo del canal S45_P60_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

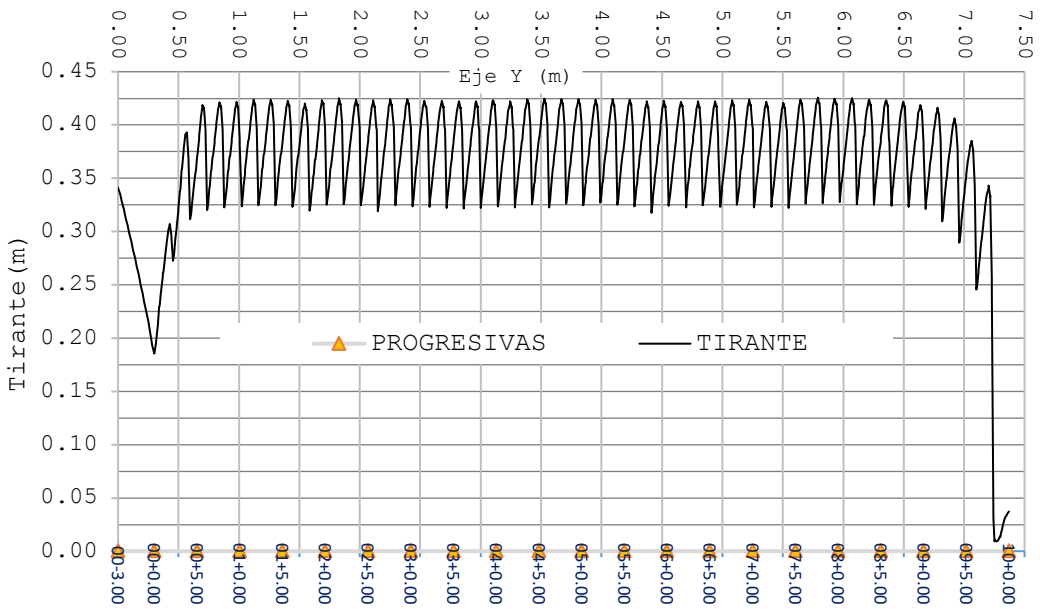


Gráfico 37. Perfil del tirante del flujo en la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P60_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (Figura 53).

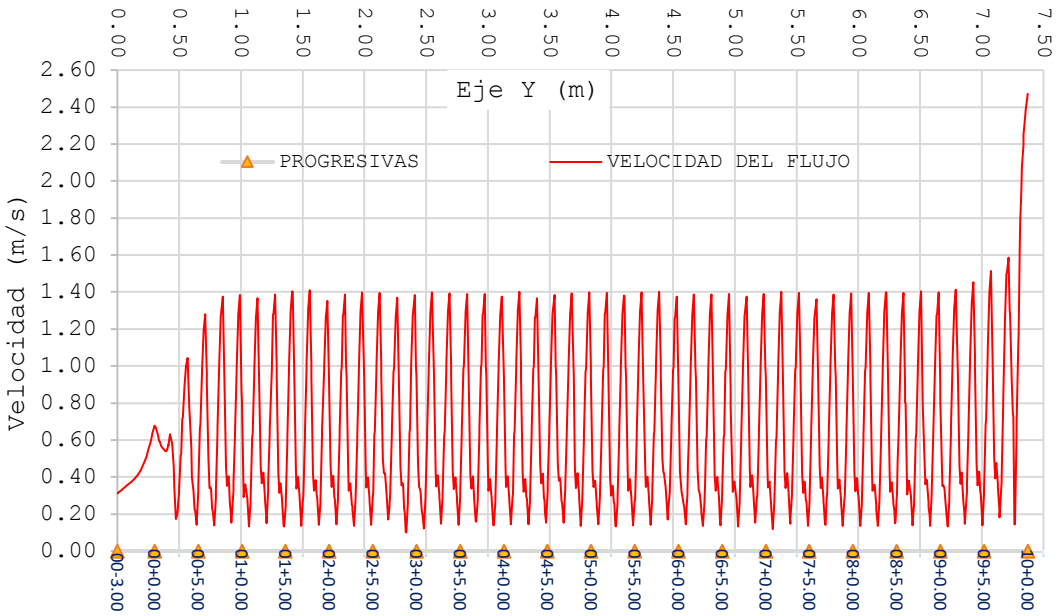


Gráfico 38. Perfil de la velocidad del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P60_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

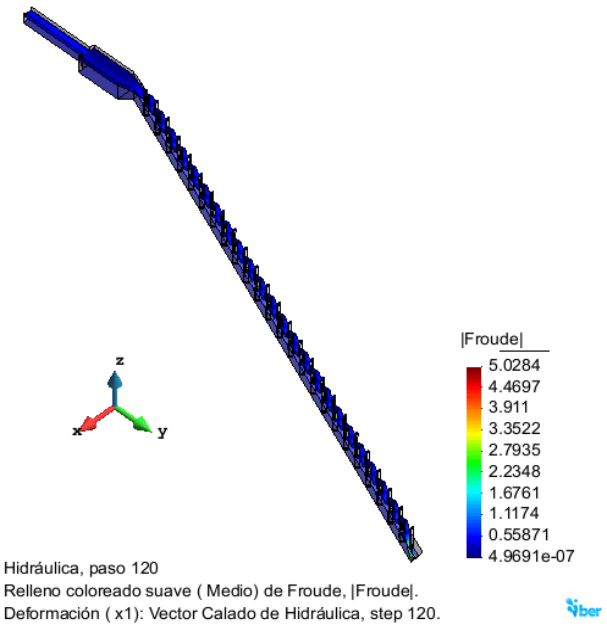


Gráfico 39. Rango del Número de Froude del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal S45_P60_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m.

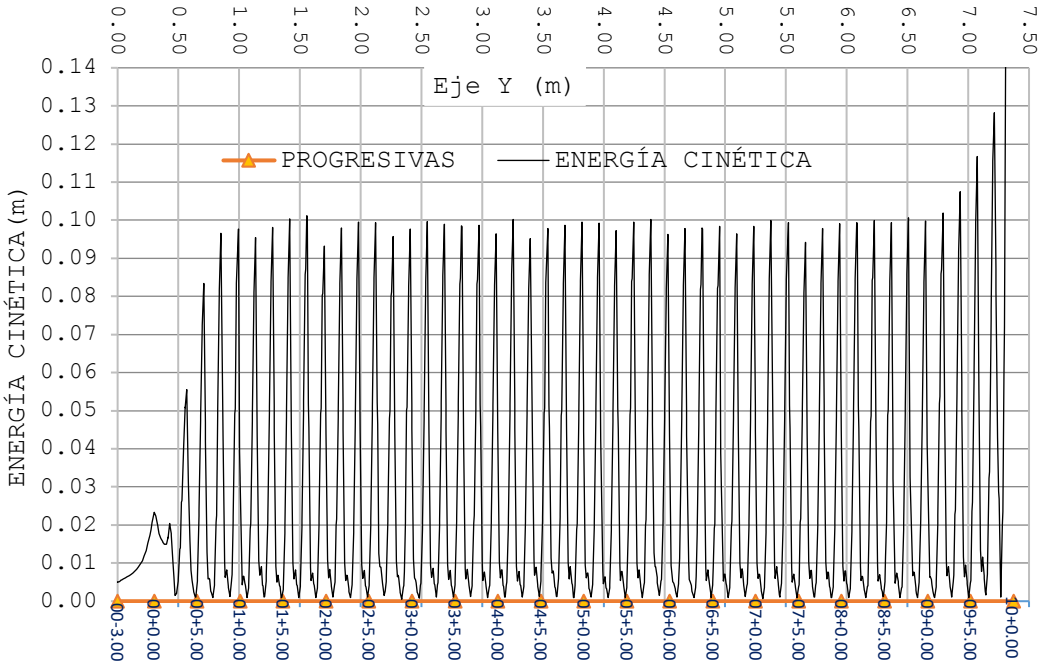


Gráfico 40. Perfil de la energía cinética del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P60_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

La energía cinética se calculado a partir de la Ecuación: $\alpha\frac{V^2}{2g}$, donde $\alpha = 1$

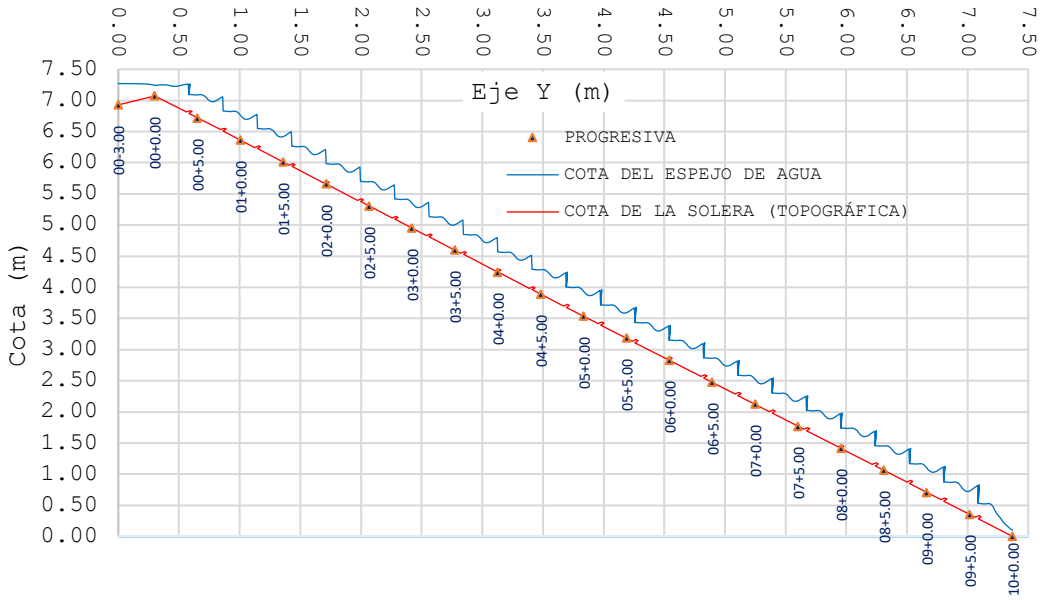


Gráfico 41. Perfil de la cota del espejo de agua y cota de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a lo largo del canal S45_P60_0.20b y sección longitudinal 0+0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

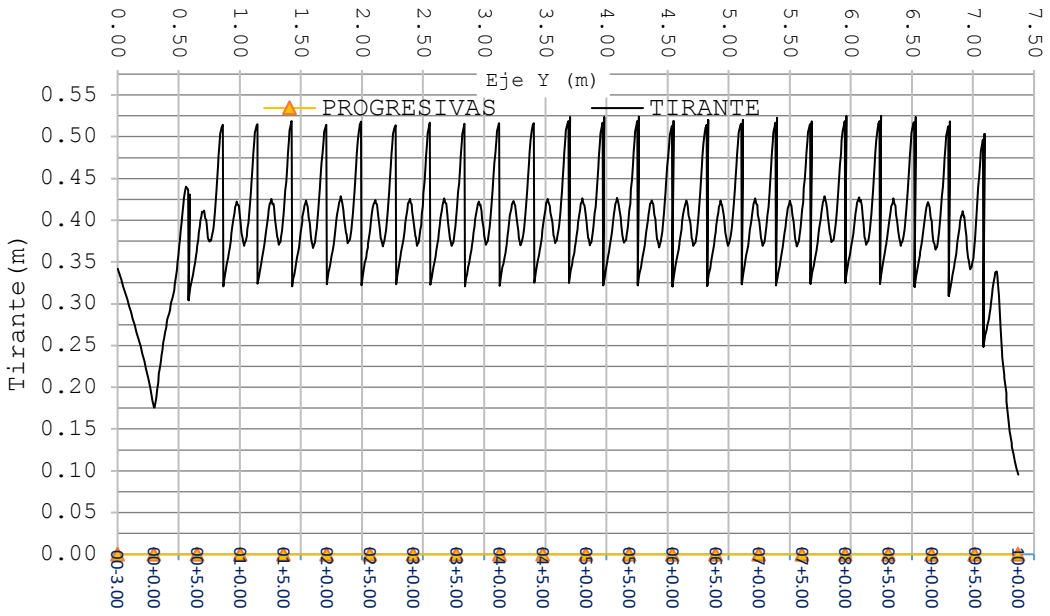


Gráfico 42. Perfil del tirante del flujo en la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P60_0.20b y sección longitudinal 0+0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (Figura 53).

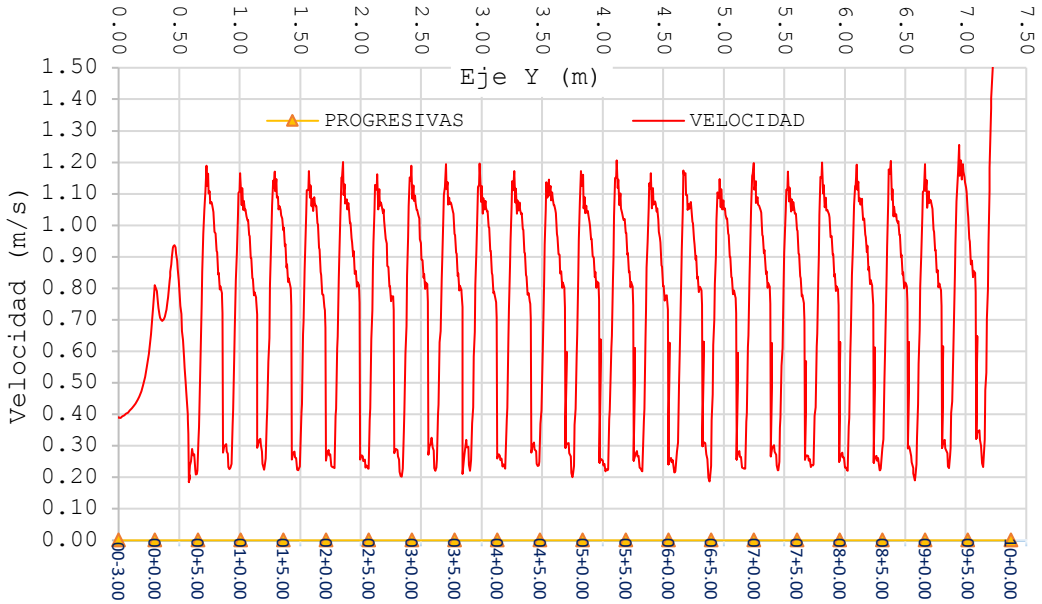


Gráfico 43. Perfil de la velocidad del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P60_0.20b y sección longitudinal 0+0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (Figura 53).

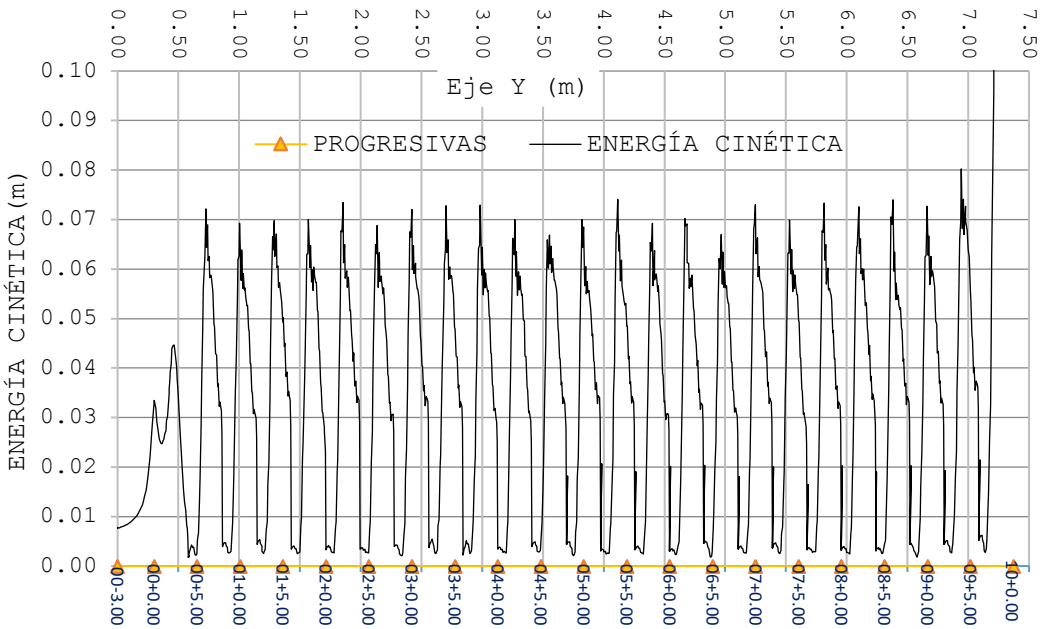


Gráfico 44. Perfil de la energía cinética del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P60_0.20b y sección longitudinal 0+0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

La energía cinética se calculado a partir de la Ecuación: $\alpha \frac{V^2}{2g}$, donde $\alpha = 1$

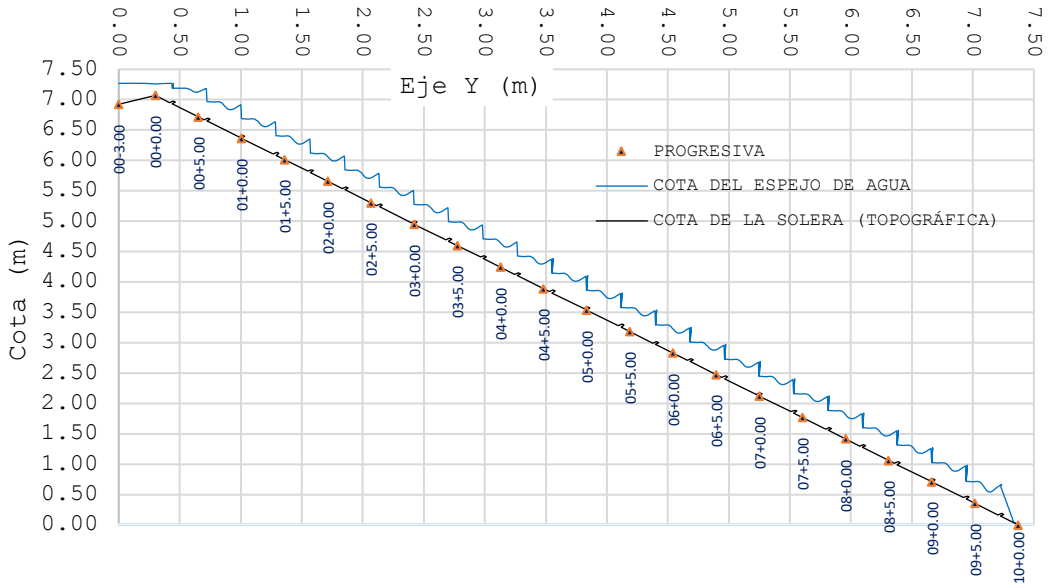


Gráfico 45. Perfil de la cota del espejo de agua y cota de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a lo largo del canal S45_P60_0.20b y sección longitudinal 0-0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

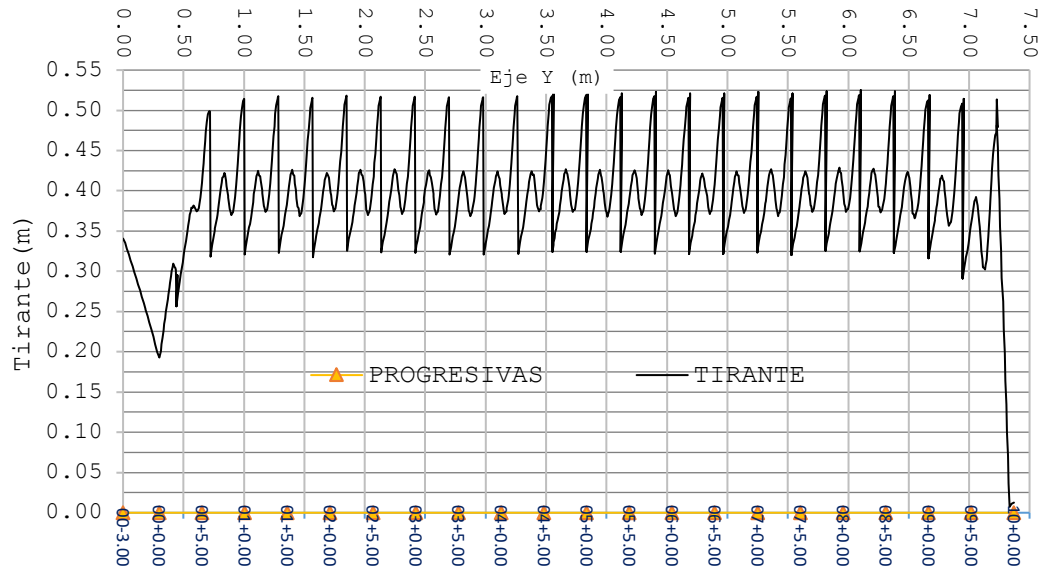


Gráfico 46. Perfil del tirante del flujo en la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P60_0.20b y sección longitudinal 0-0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (Figura 53).

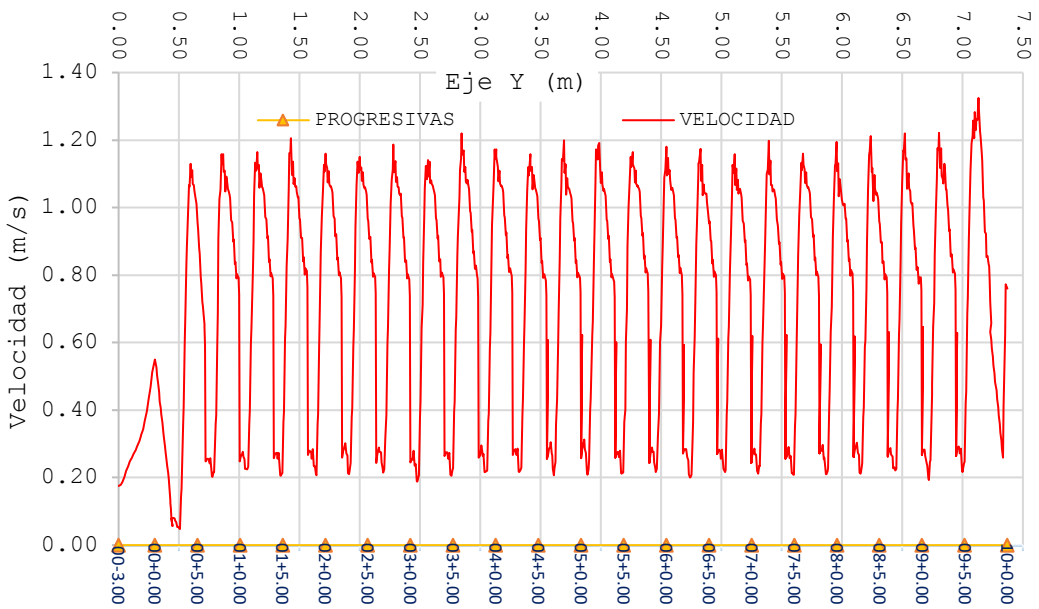


Gráfico 47. Perfil de la velocidad del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P60_0.20b y sección longitudinal 0-0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

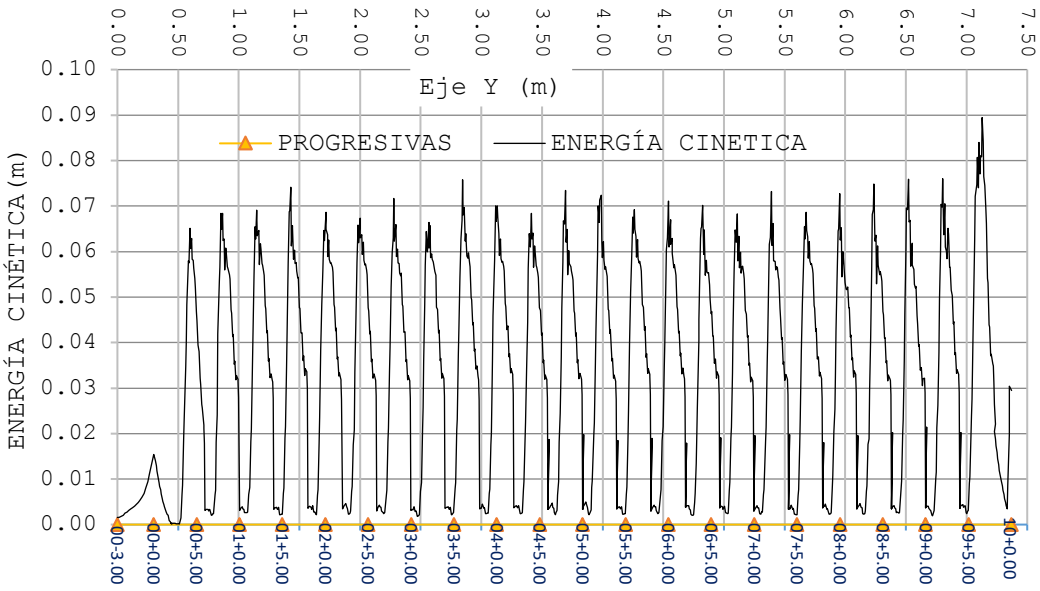


Gráfico 48. Perfil de la energía cinética del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P60_0.20b y sección longitudinal 0-0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

La energía cinética se calculado a partir de la Ecuación: $\alpha \frac{V^2}{2g}$, donde $\alpha = 1$

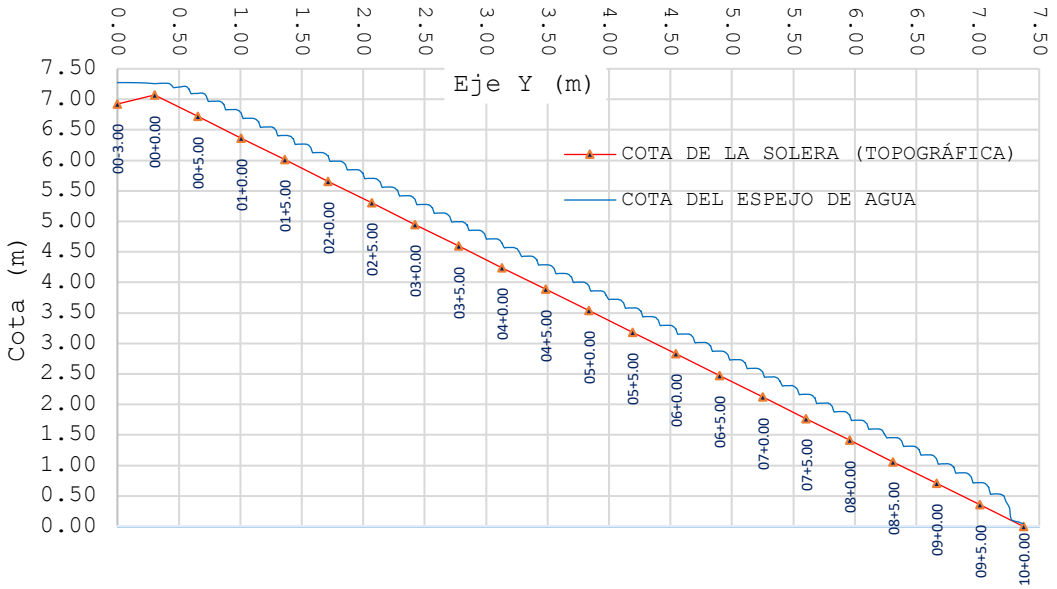


Gráfico 49. Perfil de la cota del espejo de agua y cota de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a lo largo del canal S45_P75_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

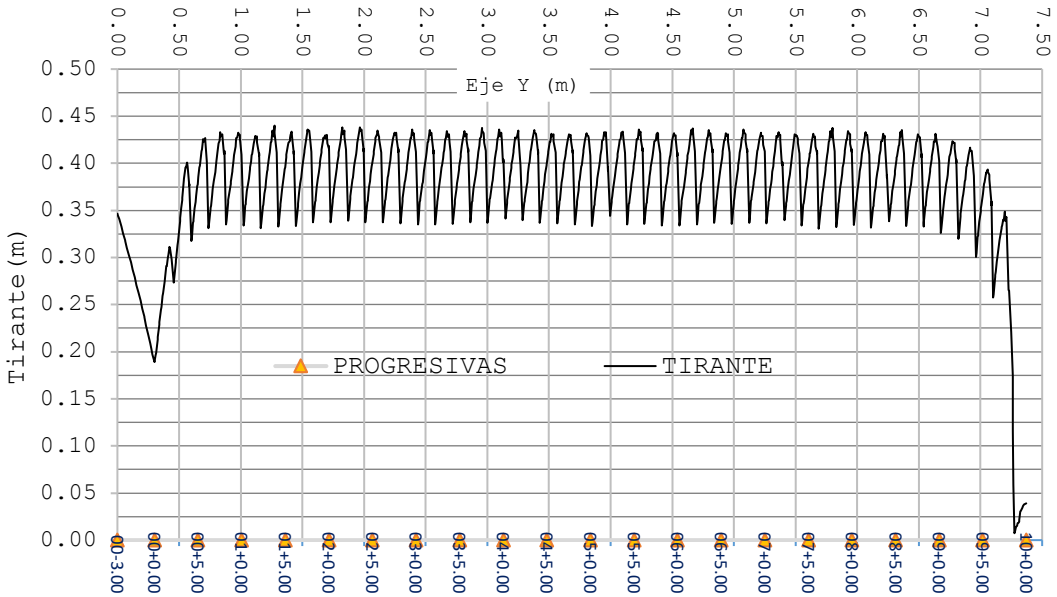


Gráfico 50. Perfil del tirante del flujo en la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P75_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (Figura 53).

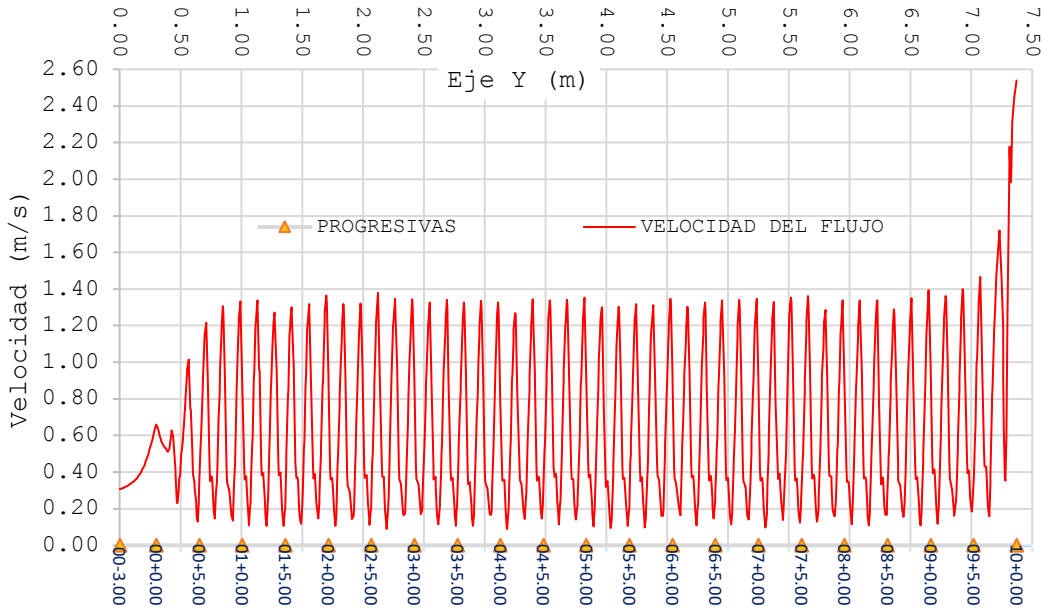


Gráfico 51. Perfil de la velocidad del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P75_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (Figura 53).

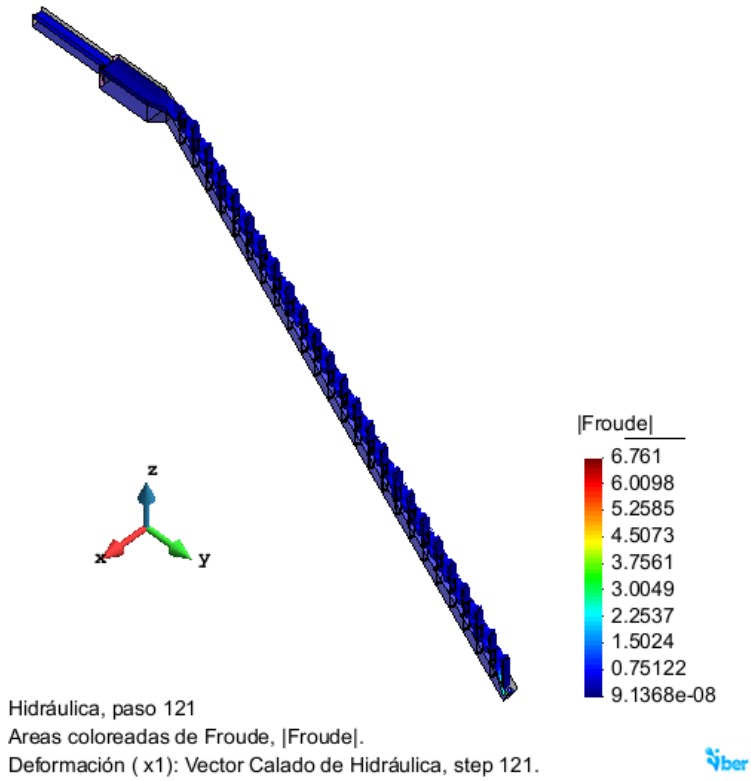


Gráfico 52. Rango del Número de Froude del flujo en el paso 120 (t=120s) del canal S45_P75_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m.

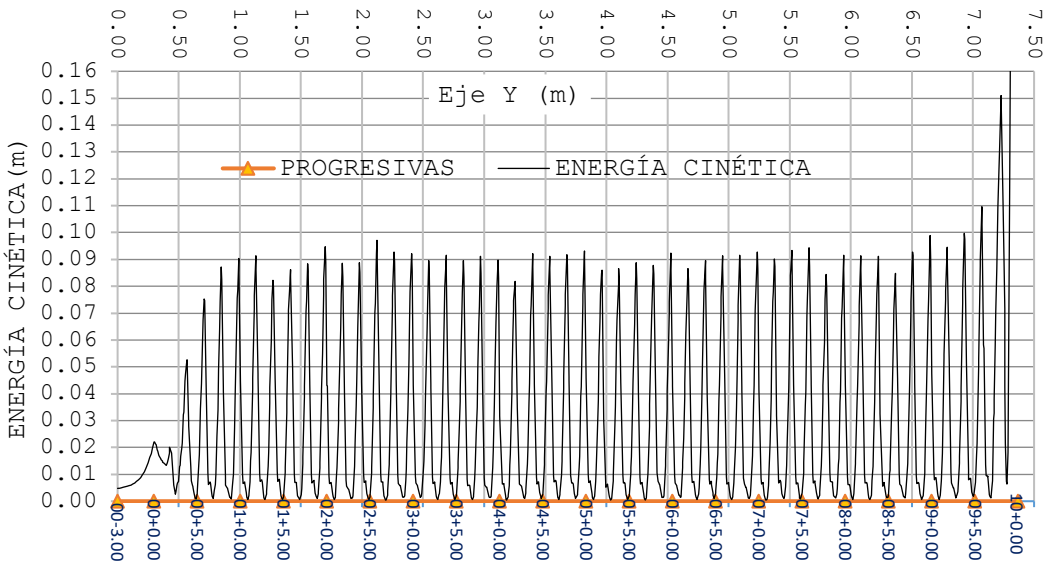


Gráfico 53. Perfil de la energía cinética del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P75_0.20b y sección longitudinal 0+0.00m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

La energía cinética se calculado a partir de la Ecuación: $\alpha \frac{V^2}{2g}$, donde $\alpha = 1$

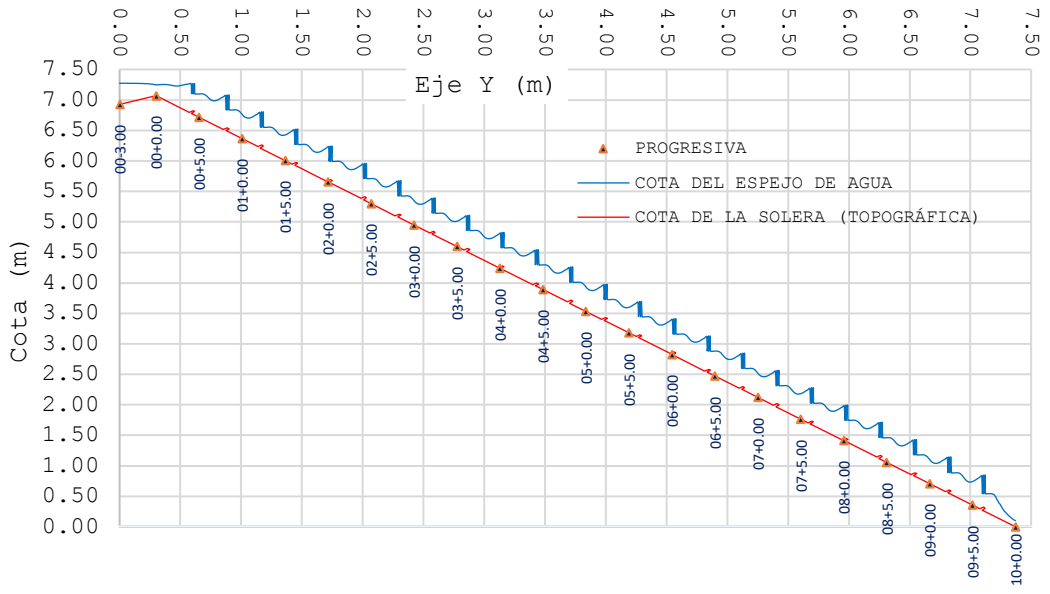


Gráfico 54. Perfil de la cota del espejo de agua y cota de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a lo largo del canal S45_P75_0.20b y sección longitudinal 0+0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

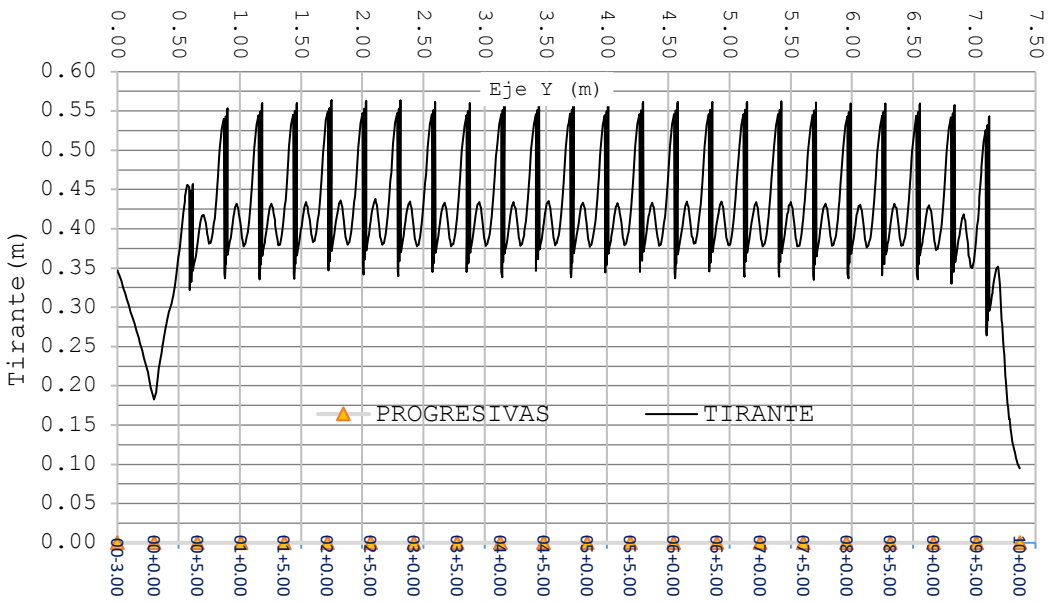


Gráfico 55. Perfil del tirante del flujo en la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P75_0.20b y sección longitudinal 0+0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (Figura 53).

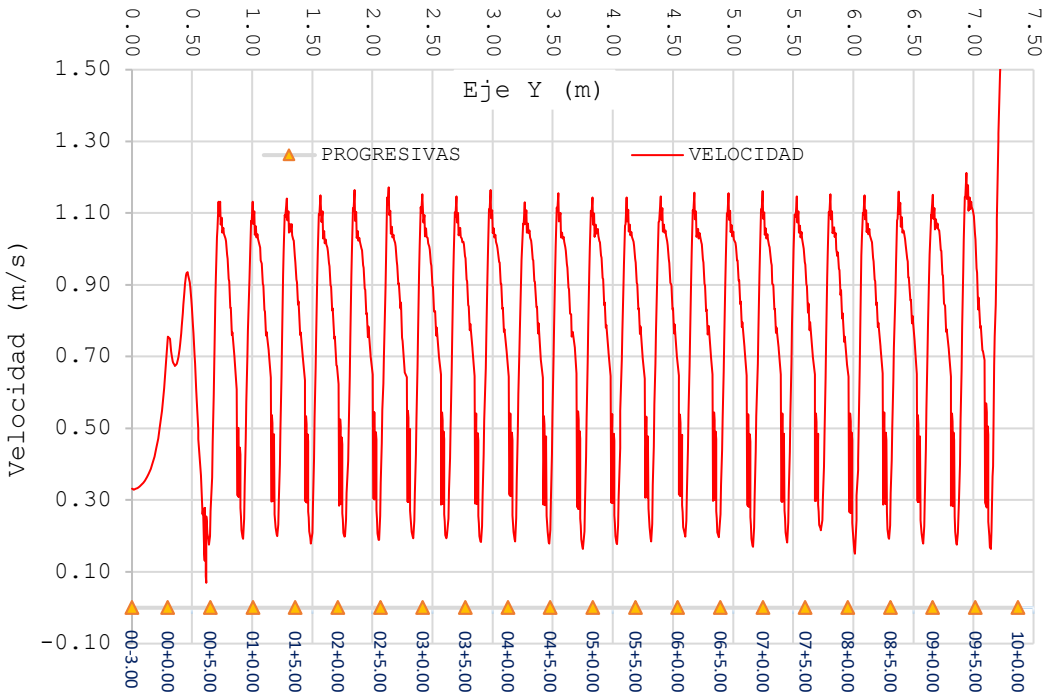


Gráfico 56. Perfil de la velocidad del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P75_0.20b y sección longitudinal 0+0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (Figura 53).

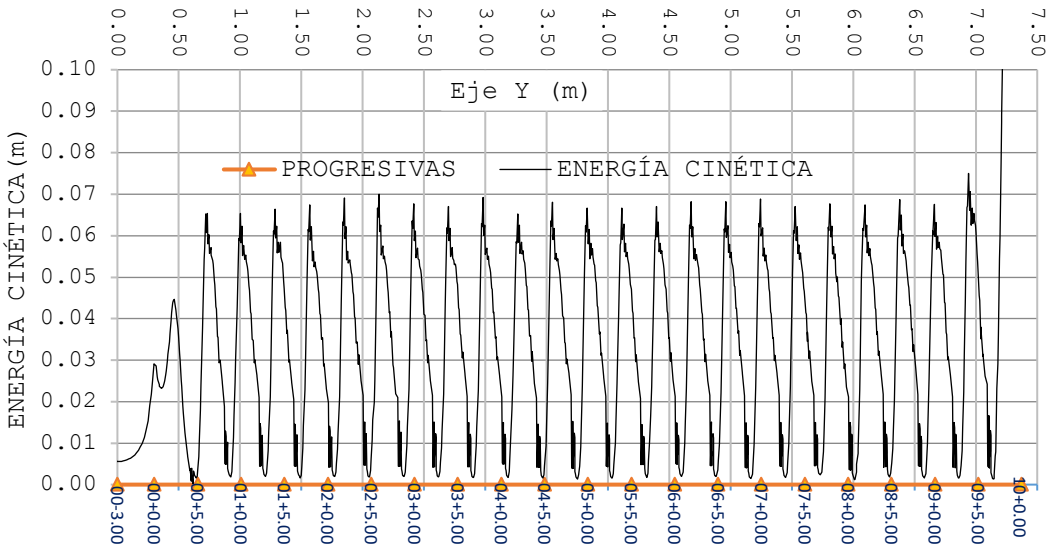


Gráfico 57. Perfil de la energía cinética del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P75_0.20b y sección longitudinal 0+0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53). La energía cinética se calculado a partir de la Ecuación: $\alpha \frac{V^2}{2g}$, donde $\alpha = 1$

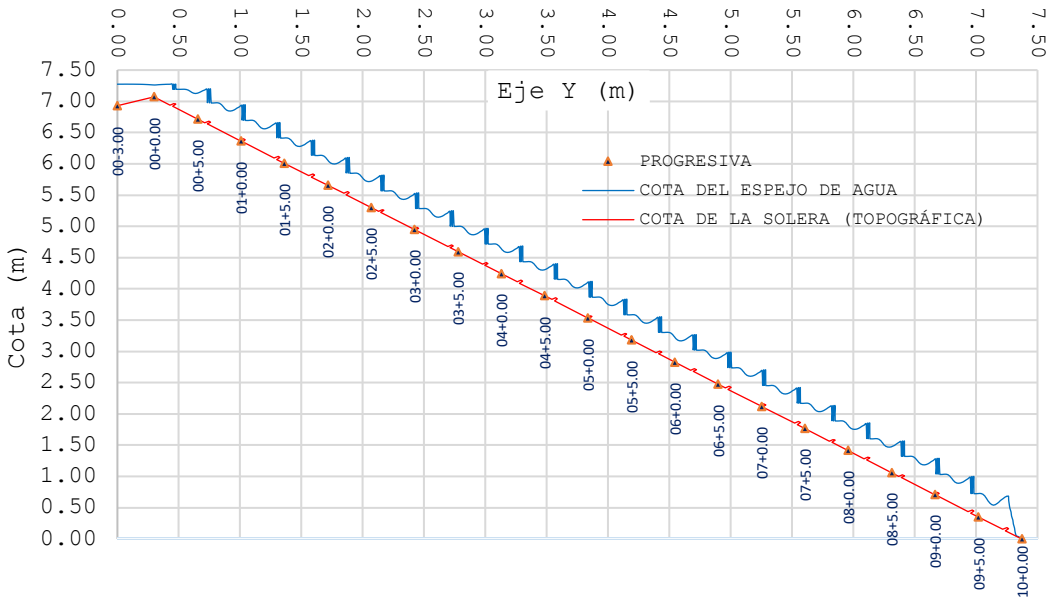


Gráfico 58. Perfil de la cota del espejo de agua y cota de la solera de la rápida y las progresivas correspondiente a lo largo del canal S45_P75_0.20b y sección longitudinal 0-0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

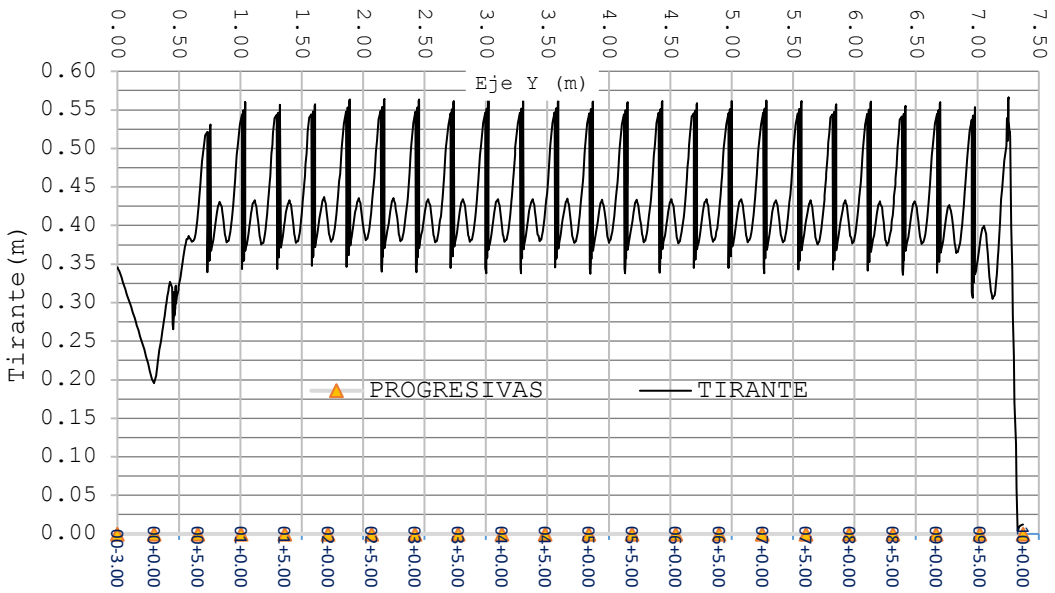


Gráfico 59. Perfil del tirante del flujo en la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P75_0.20b y sección longitudinal 0-0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (Figura 53).

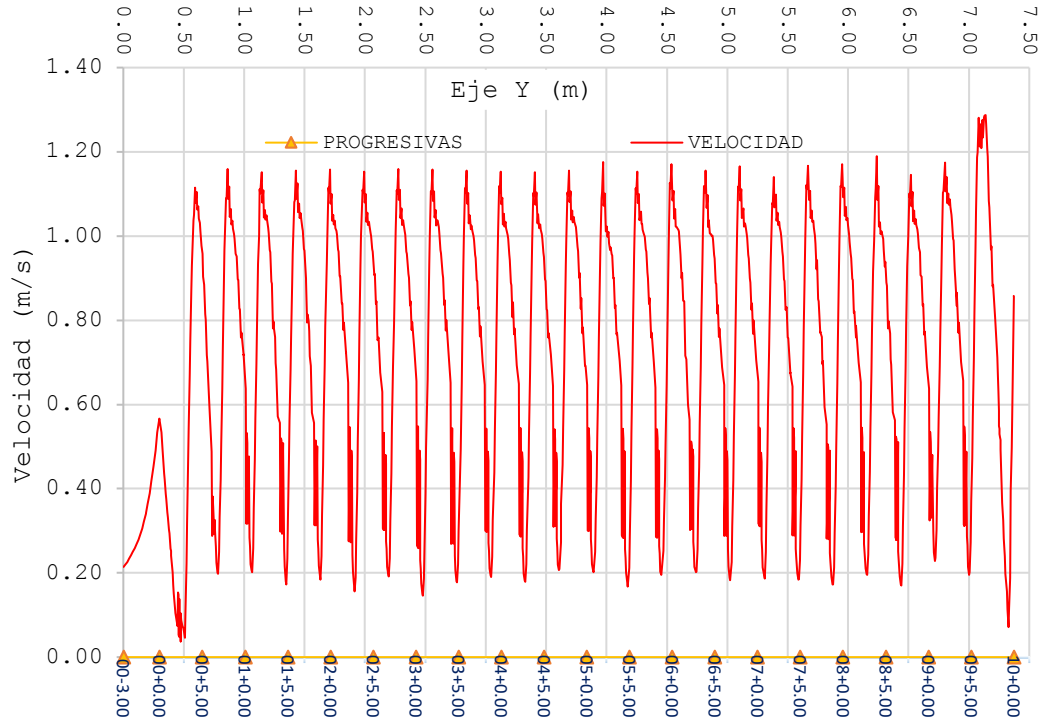


Gráfico 60. Perfil de la velocidad del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P75_0.20b y sección longitudinal 0-0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (Figura 53).

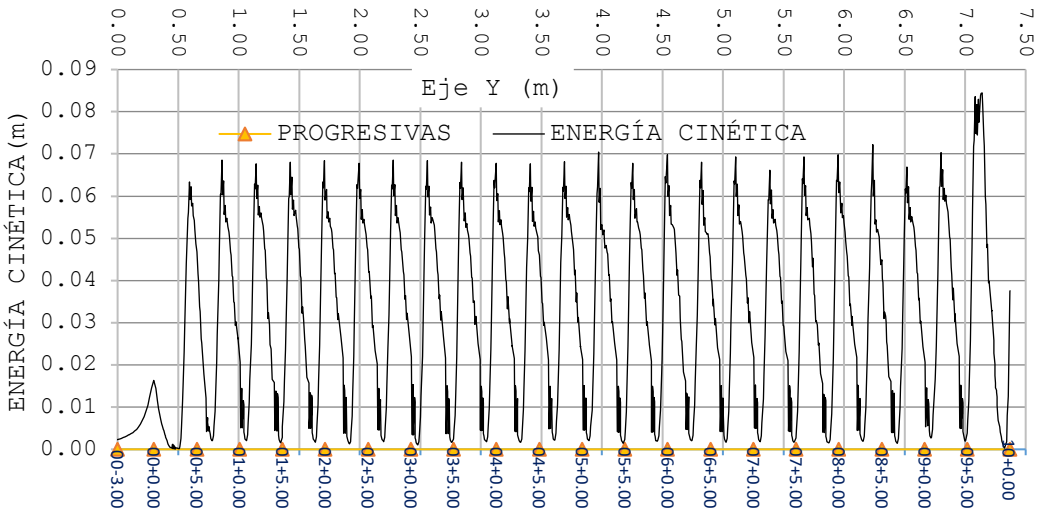


Gráfico 61. Perfil de la energía cinética del flujo de la rápida y las progresivas correspondiente al largo del canal S45_P75_0.20b y sección longitudinal 0-0.060m, desde 0-3.00 m a 10+0.00m, desde un nivel de referencia tomado en la salida del canal (ver Figura 53).

La energía cinética se calculado a partir de la Ecuación: $\alpha\frac{V^2}{2g}$, donde $\alpha = 1$

Anexo 3: Registro de datos y análisis estadístico del tirante del flujo.

Tabla N°1, Análisis estadístico del tirante extraídos del Iber 2.4.2 del canal S45_P45_0.20b

Estadísticos

TIRANTE_S45_P45_0.20b

N	Válido	3508
	Perdidos	0
Media		0,35017
Error estándar de la media		0,001093
Mediana		0,34523
Moda		0,266[a]
Desviación estándar		0,064750
Varianza		0,004
Asimetría		0,265
Error estándar de asimetría		0,041
Curtosis		-0,209
Error estándar de curtosis		0,083
Rango		0,369
Mínimo		0,135
Máximo		0,504
Percentiles	10	0,26768
	50	0,34523
	60	0,36197
	70	0,37882
	75	0,38774
	80	0,39477
	90	0,45245

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

Tabla N°2, Registro de tirantes medidos en el canal sin pantallas deflectoras.

CÓDIGO DEL CANAL: S45_P00_0.25b FECHA: 11/04/2019

UTM: N: 8 982 269.5651m, E: 207 659.2808m, Cota 2 800.00 msnm y Zona 18L.

TRAMO (m)	TIRANTE (cm)	TRAMO (m)	TIRANTE (cm)	TRAMO (m)	TIRANTE (cm)
0.00	12.00	3.40	2.80	6.80	3.50
0.10	12.50	3.50	2.80	6.90	3.50
0.20	12.00	3.60	3.00	7.00	3.50
0.30	10.00	3.70	2.80	7.10	4.00
0.40	7.00	3.80	2.50	7.20	3.50
0.50	6.50	3.90	2.80	7.30	3.60
0.60	5.50	4.00	2.80	7.40	3.00
0.70	4.50	4.10	2.50	7.50	3.00
0.80	4.20	4.20	2.50	7.60	3.00
0.90	4.00	4.30	2.50	7.70	3.00
1.00	4.00	4.40	3.00	7.80	3.20
1.10	4.00	4.50	3.00	7.90	3.00
1.20	4.00	4.60	3.20	8.00	3.00
1.30	3.80	4.70	3.00	8.10	2.80
1.40	4.00	4.80	3.00	8.20	3.00
1.50	4.00	4.90	2.80	8.30	3.00
1.60	4.00	5.00	2.50	8.40	2.80
1.70	4.00	5.10	2.50	8.50	3.00
1.80	4.00	5.20	2.80	8.60	3.00
1.90	4.00	5.30	2.50	8.70	3.00
2.00	3.80	5.40	3.00	8.80	3.00
2.10	3.50	5.50	3.50	8.90	3.50
2.20	3.40	5.60	4.00	9.00	3.50
2.30	3.00	5.70	3.80	9.10	3.80
2.40	3.00	5.80	3.50	9.20	3.20
2.50	2.80	5.90	3.50	9.30	3.20
2.60	2.80	6.00	3.50	9.40	3.00
2.70	3.00	6.10	4.00	9.50	3.00
2.80	3.00	6.20	4.00	9.60	3.00
2.90	2.80	6.30	4.00	9.70	3.00
3.00	3.00	6.40	4.00	9.80	3.00
3.10	3.00	6.50	4.00	9.90	3.00
3.20	3.00	6.60	3.50	10.00	3.00
3.30	3.00	6.70	3.80		

(Ver también Figura 151)

Tabla N°3, Registro de tirantes medidos en el canal con pantallas deflectoras.

CÓDIGO DEL CANAL: S45_P45_0.25b FECHA: 17/04/2019

UTM: N: 8 982 269.5651m, E: 207 659.2808m, Cota 2 800.00 msnm y Zona 18L.

TRAMO(m)	TIRANTE (cm)	TRAMO(m)	TIRANTE (cm)	TRAMO(m)	TIRANTE (cm)
0.00	12.00	3.40	17.00	6.80	26.00
0.10	14.50	3.50	16.00	6.90	25.00
0.20	13.00	3.60	20.00	7.00	24.00
0.30	12.00	3.70	22.00	7.10	26.00
0.40	11.00	3.80	26.00	7.20	26.00
0.50	11.00	3.90	27.00	7.30	28.00
0.60	13.50	4.00	26.00	7.40	30.00
0.70	15.00	4.10	28.00	7.50	31.00
0.80	14.00	4.20	27.00	7.60	30.00
0.90	17.00	4.30	27.00	7.70	28.00
1.00	20.00	4.40	24.00	7.80	27.00
1.10	21.00	4.50	24.00	7.90	27.00
1.20	23.00	4.60	24.00	8.00	24.00
1.30	19.00	4.70	23.00	8.10	23.00
1.40	17.00	4.80	23.00	8.20	26.00
1.50	18.00	4.90	26.00	8.30	27.00
1.60	18.00	5.00	27.00	8.40	25.00
1.70	17.00	5.10	25.00	8.50	22.00
1.80	16.00	5.20	28.00	8.60	25.00
1.90	15.00	5.30	25.00	8.70	24.00
2.00	17.00	5.40	24.00	8.80	25.00
2.10	15.00	5.50	23.00	8.90	23.00
2.20	18.00	5.60	23.00	9.00	25.00
2.30	19.00	5.70	25.00	9.10	26.00
2.40	22.00	5.80	21.00	9.20	24.00
2.50	19.00	5.90	25.00	9.30	29.00
2.60	22.00	6.00	26.00	9.40	26.00
2.70	23.00	6.10	26.00	9.50	25.00
2.80	24.00	6.20	27.00	9.60	27.00
2.90	24.00	6.30	23.00	9.70	25.00
3.00	18.00	6.40	24.00	9.80	24.00
3.10	22.00	6.50	22.00	9.90	24.00
3.20	19.00	6.60	20.00	10.00	25.00
3.30	17.00	6.70	22.00		

(Ver también Figura 154)

Tabla 4: Registro de la medida de la pendiente del canal.

TRAMO(m)	PENDIENTE (%)		GRADOS SEXAGESIMALES
0.00	90.00		41.99°
0.50	102.00		45.57°
1.00	100.00		45.00°
1.50	100.00		45.00°
2.00	95.00		43.53°
2.50	98.00		44.42°
3.00	96.00		43.83°
3.50	99.00		44.71°
4.00	99.00		44.71°
4.50	99.00		44.71°
5.00	99.00		44.71°
5.50	99.00		44.71°
6.00	99.00		44.71°
6.50	99.00		44.71°
7.00	102.00		45.57°
7.50	100.00		45.00°
8.00	102.00		45.57°
8.50	97.00		44.13°
9.00	106.00		46.67°
9.50	106.00		46.67°
10.00	106.00		46.67°
PROMEDIO=	**99.67**	=	**44.90°**

Tabla N°5, Estimación del Coeficiente de Chezy y el factor de forma.

Número de Froude		8.38	0.39	0.37	0.35	0.33
i) Datos						
Velocidad (P 60)[1]	v (m/s)	4.821	1.057	0.993	0.941	0.944
Tirante (P 60)[2]	d (m)	0.028	0.359	0.362	0.402	0.417
Ancho del canal	b (m)	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
Pendiente	m/m	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Radio Hidráulico[#]	R (m)	0.022	0.0782	0.0784	0.0801	0.0807
ii)RELACIÓN ENTRE EL COEFICIENTE DE CHEZY Y EL RADIO HIDRAULICO Y FACTOR DE FORMA						
COEFICIENTE DE CHEZY	C	$C=V/(R^{1/2}S^{1/2})$				
		32.4547	3.7816	3.5477	3.3259	3.3248
REGRESIÓN LINEAL[$]		$C/g^{1/2}=A_2\log(R/\chi)+B_2$				
-Cálculos previos						
Cantidad de pantallas		0	47	45	45	45
Área proyectada		0.000	0.190	0.180	0.180	0.180
Área de lecho		1.900	1.668	1.738	1.765	1.774
η^{+}		0.000	0.114	0.104	0.102	0.101
k_r		0.000	0.040	0.040	0.040	0.040
χ^{++}		0.00000	0.00455	0.00414	0.00408	0.00406
-Cálculo de parámetros						
$C/g^{1/2}$		10.362	1.207	1.133	1.062	1.062
R/χ			17.192	18.914	19.633	19.875
$\log(R/\chi)$			1.235	1.277	1.293	1.298
-Determinación de parámetros por regresión lineal						
A_2				-2.60951		
B_2				4.3272		

[1] Valor del percentil 60 del Anexo 2 para el ángulo de deflexión de 30° (Gráfico 8, Gráfico 13 y Gráfico 18), de 45° (Gráfico 23, Gráfico 28 y Gráfico 33), de 60° (Gráfico 38, Gráfico 43 y Gráfico 47) y de 75° (Gráfico 51, Gráfico 56 y Gráfico 60).

[2] Valor del percentil 60 del Anexo 2 para el ángulo de deflexión de 30° (Gráfico 7, Gráfico 12 y Gráfico 17), de 45° (Gráfico 22, Gráfico 27 y Gráfico 32), de 60° (Gráfico 37, Gráfico 42 y Gráfico 46) y de 75° (Gráfico 50, Gráfico 55 y Gráfico 59).

[#] Ecuación (18)

** Ecuación (77)

[$] Ecuación (11)

[+]Ecuación (132)

[++]Ecuación (131)